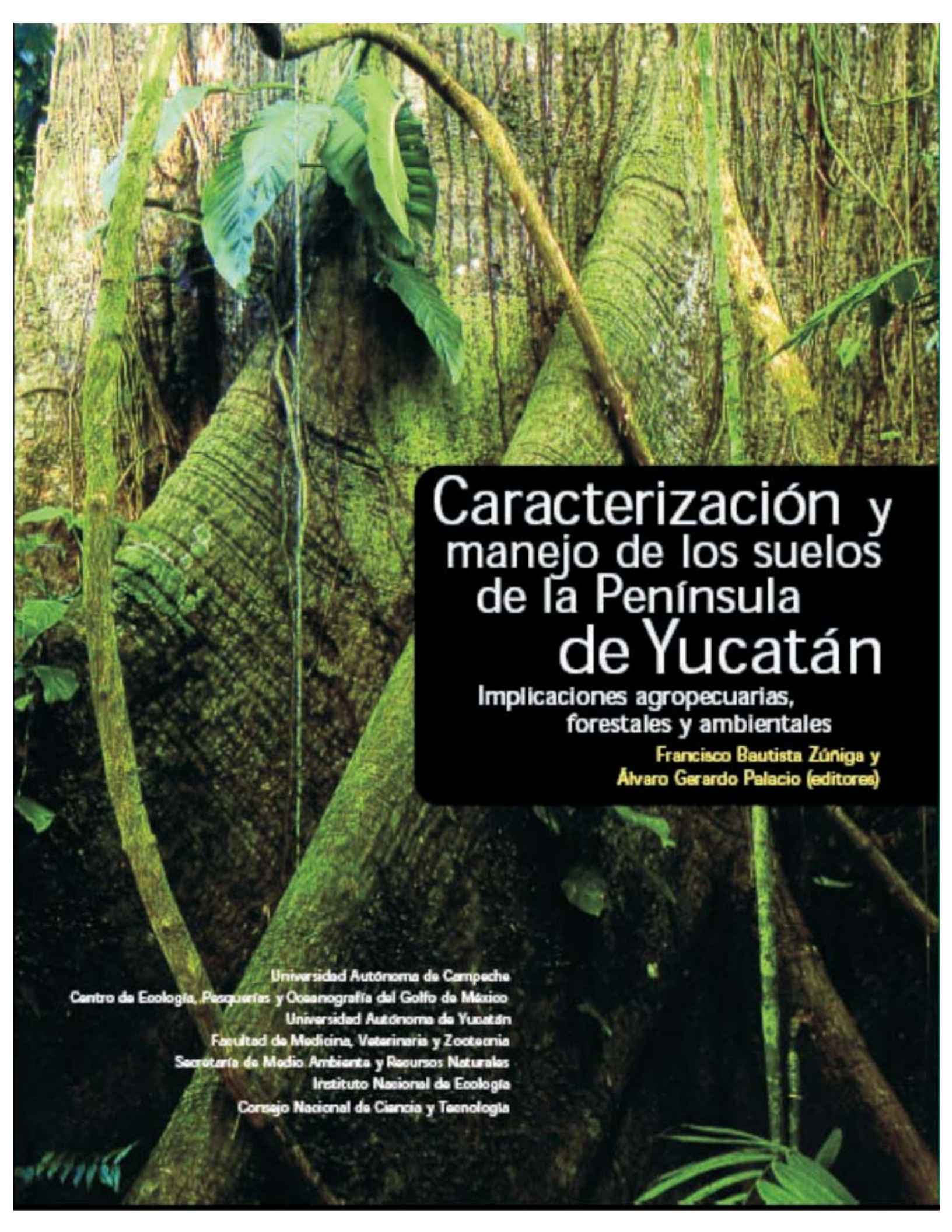




Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán

Implicaciones agropecuarias,
forestales y ambientales

Francisco Bautista Zúñiga y
Álvaro Gerardo Palacio (editores)

Universidad Autónoma de Campeche
Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México
Universidad Autónoma de Yucatán
Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Instituto Nacional de Ecología
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Francisco Bautista Zúñiga es doctor en biología (Ecología y ciencias ambientales) por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Sus líneas de investigación son la edafología, el diseño de agroecosistemas y la ecología del paisaje. Forma parte del cuerpo académico de Ecología tropical en el campus de ciencias biológicas y agropecuarias de la FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán y es autor de cuatro libros, varios capítulos en obras colectivas y artículos científicos y de divulgación. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I desde el año 2000 y profesor titular en cursos de licenciatura en Edafología e Impacto ambiental y en el posgrado en Técnicas de muestreo.

Álvaro Gerardo Palacio Aponte es doctor en Geografía por la Universidad Nacional Autónoma de México. Sus líneas de investigación son la geomorfología ambiental, la ecogeografía y la zonificación de riesgos naturales. Es miembro del cuerpo académico de Manejo costero en el Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche. Ha escrito dos libros, cuatro capítulos en obras colectivas, cinco artículos científicos y ocho de divulgación. Actualmente se desempeña como profesor titular en cursos de licenciatura en Percepción remota y Geología e hidrología y en el posgrado en Riesgo e Impacto ambiental.

CARACTERIZACIÓN Y MANEJO DE LOS SUELOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN: IMPLICACIONES AGROPECUARIAS, FORESTALES Y AMBIENTALES

Francisco Bautista y Gerardo Palacio
Editores

2005

Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán:
Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales

Francisco Bautista y Gerardo Palacio

Editores

Bautista, F. y G. Palacio (Eds.) 2005. Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 p.

D.R. © Universidad Autónoma de Campeche 2005
Av. Agustín Melgar s/n Cd. Universitaria
Col. Buenavista, C.P. 24030
Campeche, Camp. México

Universidad Autónoma de Yucatán 2005
Calle 60 No. 491-A x 57 Centro
C.P. 97000, Mérida, Yucatán

Instituto Nacional de Ecología 2005
Periférico 5000, Col. Insurgentes Cuicuilco,
C.P. 04530, Coyoacán, México D.F.

ISBN: 968-5722-13-7

Impreso y hecho en México

CONTENIDO

Dedicatoria	I
Agradecimientos	III
Dictaminadores	V
Directorio de autores	VII
Prólogo	IX
 I. Introducción	
Información edafológica para el manejo de recursos naturales. <i>Francisco Bautista</i>	1
Suelos, información y sociedad. <i>Alfred Zinck</i>	9
 II. Caracterización de suelos	
1. El origen y el manejo maya de las geoformas, suelos y aguas en la Península de Yucatán. <i>Francisco Bautista, Gerardo Palacio, Mario Ortiz-Pérez, Eduardo Batllori-Sampedro y Miguel Castillo-González</i>	21
2. Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos en la Península de Yucatán. <i>Francisco Bautista, Eduardo Batllori-Sampedro, Mario Ortiz-Pérez, Gerardo Palacio y J. L. Miguel Castillo-González</i>	33
3. Diagnóstico ambiental de la costa del estado de Campeche: enfoques geomorfológico y geopedológico. <i>Gerardo Palacio, Víctor Medina-Medina, y Francisco Bautista</i>	59
4. La nomenclatura maya de suelos: una aproximación a su diversidad y significado en el sur del Estado de Yucatán. <i>Jorge Duch</i>	73
5. Colección de monolitos de suelos de la Península de Yucatán. <i>Claudia May-Acosta y Francisco Bautista</i>	87
6. Actualización de la clasificación de los suelos del Estado de Yucatán. <i>Francisco Bautista, David Palma-López y Wendy Huchin</i>	105
7. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en zonas karst reciente. <i>Francisco Bautista, Jorge Navarro-Alberto, Andrew Manu y Rufino Lozano-Santamaría</i>	123

8. Relación entre relieve y suelos en la zona exhenequenera de Yucatán. <i>Francisco Bautista, Héctor Estrada-Medina</i>	133
9. Mapas parcelarios de suelo en Mérida, Yucatán, México. <i>Ma. de la Soledad Díaz-Garrido, Francisco Bautista, Ma. del Carmen Delgado-Carranza y Miguel Castillo-González</i>	145
10. Relaciones suelo-planta en ecosistemas naturales de la Península de Yucatán: comunidades dominadas por palmas. <i>Armando Escamilla, F. Quintal, F. Medina, A. Guzmán, E. Pérez y L.M. Calvo</i>	159

III. Manejo de suelos

1. Diagnóstico de suelos para el mantenimiento de la fertilidad en áreas tropicales <i>David Palma-López, Sergio Salgado García, y Arnulfo Triano Sánchez</i>	173
2. La nutrición de cultivos en la Península de Yucatán. <i>Manuel Soria</i>	185
3. Manejo campesino de la selva baja y selección de especies arbóreas para barbechos mejorados en Hocabá, Yucatán. <i>Javier García, Aliza Mizrahi y Francisco Bautista</i>	195
4. Inventario de plantas forrajeras utilizadas por los mayas en los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán. <i>Salvador Flores y Francisco Bautista</i>	209
5. Las perspectivas de las unidades de producción campesinas tradicionales en la Península de Yucatán: un estudio de caso. <i>Heriberto E. Cuanalo de la Cerda y Genovevo Ramírez Jaramillo</i>	221
6. Dinámica de la calidad del suelo de la milpa con el uso de leguminosas como cultivos de cobertera. <i>Manuel Amaya Castro, Francisco Bautista y José Castillo Caamal</i>	229
7. Producción y calidad del follaje de árboles forrajeros establecidos sobre minas de cal abandonadas. <i>Efraín Llamas-García, José B. Castillo-Caamal, Carlos Sandoval-Castro y Francisco Bautista</i>	247
8. La macrofuna del suelo y su potencial de manejo para el mejoramiento de la calidad del suelo. <i>Esperanza Huerta Lwanga</i>	259
9. Descomposición de hojarasca y abundancia de macroinvertebrados por el uso de mantillos y cultivos de cobertera. <i>Francisco Bautista y Ma. del Carmen Delgado-Carranza</i>	269

DEDICATORIA

Al Dr. Rubén Puentes por la visión sobre la necesidad de realizar investigación edafológica en la Península de Yucatán.

Al Dr. Alfred Zinck por compartir sus conocimientos con todo el grupo del proyecto Base de datos digital de suelos de la Península de Yucatán incluyendo la nomenclatura maya y FAO”.

A la memoria del Dr. José Armando Escamilla Bencomo[†], colega y amigo.

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Rockefeller por el apoyo económico para el establecimiento del Dr. Francisco Bautista en la Universidad Autónoma de Yucatán.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico a los proyectos "Base de datos digital de suelos de la Península de Yucatán incluyendo la nomenclatura maya y FAO" (Clave R31624-B) y "Base de datos del medio físico para la identificación de las zonas agroecológicas del Estado de Yucatán", de los cuales se derivan varios capítulos de este volumen.

A los autores por la confianza en el proyecto de realización del libro y a los árbitros por dedicar una parte de su tiempo a la revisión de los capítulos.

A los directores del Centro EPOMEX-UACAM, Dr. Domingo Flores y M en C. Guillermo Villalobos, así como al M en C. Fernando Herrera y Gómez director de la FMVZ-UADY por las facilidades para la realización del libro.

Al Departamento de Difusión y Publicaciones del Centro EPOMEX integrado por Carlos Medina Hernández y Jorge Gutiérrez Lara y a la M en C. Ma. del Carmen Delgado-Carranza por la asistencia técnica en la edición, revisión de estilo y elaboración de algunos resúmenes.

A mis asistentes personales la Sra. Teresa Ramírez y al Biól. Esteban Pacheco por las múltiples actividades de apoyo.

DICTAMINADORES

Dr. Iván Armendáriz

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

M en C. Arturo Caamal Maldonado

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Dr. Hugo Delfín González

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Dr. Alexander Feijo

Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Quím. Rafael Mas

Instituto Nacional de Investigaciones
en Caña de Azúcar (INICA), Cuba

Dr. Jorge Mendoza Vega

Colegio de la Frontera Sur, Unidad Campeche.

Dr. Roger Orellana Lanza

Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)

M en C. Luciano Pool

Colegio de la Frontera Sur, Unidad Campeche.

Dr. Roberto Sangines

Instituto Tecnológico Agropecuario No. 2 Conkal

Dra. Christina Siebe

Instituto de Geología,
Universidad Nacional Autónoma de México

DIRECTORIO DE AUTORES

Manuel Amaya Castro

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Héctor Estrada-Medina

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Aliza Mizrahi-Perkulis

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Alfred Zinck

International Institute for Geo-Information Science
and Earth Observation. The Netherlands

Francisco Bautista Zúñiga

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

José Salvador Flores Guido

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Jorge Navarro-Alberto

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Eduardo Batllori-Sampedro

Centro de Investigaciones Estudios Avanzados,
Instituto Politécnico Nacional

Javier García

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Mario Ortíz-Pérez

Instituto de Geografía,
Universidad Nacional Autónoma de México

José Castillo Caamal

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Wendy Huchín Malta

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

David Palma López

Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco

Miguel Castillo-González

FES-Z, Universidad Nacional Autónoma de México

Esperanza Huerta Lwanga

El Colegio de la Frontera Sur
Unidad Villahermosa

Gerardo Palacio-Aponte

Centro EPOMEX,
Universidad Autónoma de Campeche

Luz María Calvo Irabién

Centro de Investigación Científica de Yucatán

Erika Pérez

Centro de Investigación Científica de Yucatán

Heriberto E. Cuanalo de la Cerda

CINVESTAV-Mérida,
Instituto Politécnico Nacional

Rufino Lozano

Instituto de Geología,
Universidad Nacional Autónoma de México

Fausto Quintal Tun

Centro de Investigación Científica de Yucatán

Ma. del Carmen Delgado Carranza

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Efraín Llamas-García

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Genovevo Ramírez Jaramillo

INIFAP, Campo Experimental Mocochoá

Ma. de la Soledad Díaz-Garrido

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Andrew Manu

Texas University.

Sergio Salgado García

Colegio de Posgraduados, Campus Cárdenas Tabasco

Jorge Duch Gary

Universidad Autónoma de Chapingo

Claudia May-Acosta

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Carlos Sandoval-Castro

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia,
Universidad Autónoma de Yucatán

Armando Escamilla Bencomo

Centro de Investigación Científica de Yucatán

Víctor Medina-Medina

Centro EPOMEX,
Universidad Autónoma de Campeche.

Arnulfo Triano Sánchez

Colegio de Posgraduados, Campus Tabasco

PRÓLOGO

Cada vez somos más los que habitamos la Tierra, y todos aspiramos a lograr día con día y generación con generación una mejor calidad de vida y un mayor bienestar. Nuestro crecimiento económico se apoya ampliamente en una explotación de los recursos naturales. Entre ellos, el suelo es un recurso vital, ya que es el sostén de la vegetación y la fauna terrestre, así como de la habitación humana. Además realiza importantes servicios ambientales, como lo es la regulación de la infiltración del agua pluvial, el reciclaje de nutrimentos, y el amortiguamiento, la retención o transformación de sustancias contaminantes.

Una característica particular del recurso suelo es que es muy variable en el espacio. Esta variabilidad resulta de la compleja interacción de factores y procesos que intervienen en su formación, y la detección de los patrones de distribución de suelos con características similares requiere de observación y estudios detallados. Los avances tecnológicos recientes en materia de percepción remota y análisis de imágenes satelitales han facilitado el levantamiento de las características de la vegetación y los cuerpos superficiales de agua. Sin embargo, estas técnicas no son igualmente útiles para caracterizar a los suelos, ya que sólo su superficie está expuesta a la observación inmediata. Generalmente es necesario estar físicamente presente en el lugar, y excavar para describir el suelo en un sitio determinado. Los levantamientos de suelo a escalas detalladas son muy laboriosos y por lo mismo costosos, y cada vez menos personas están dispuestas a realizarlos y menos instituciones los financian.

No obstante, el conocimiento de las características de los suelos sigue siendo de vital importancia para obtener buenos rendimientos agrícolas por un lado, y para aprovechar los servicios ambientales que realizan los suelos, por el otro. El desconocimiento de las propiedades de los suelos y de su alta vulnerabilidad a la degradación bajo prácticas de manejo arbitrarias, está poniendo en riesgo a este vital recurso.

Las antiguas civilizaciones basaban su economía principalmente en la agricultura; dependían del aprovechamiento directo de los recursos naturales en general y del

suelo en particular, y por lo tanto algunas de ellas desarrollaron un conocimiento profundo del mismo. En nuestra sociedad actual, una mayor proporción de la población se ocupa en la industria y en los servicios, y cada vez menos personas dependen directamente de la agricultura. Por ello, el conocimiento sobre el recurso suelo se ha perdido y muy pocas personas están conscientes de los servicios ambientales que proporcionan los suelos. Particularmente los tomadores de decisiones provienen predominantemente de sectores urbanos de la sociedad y su desconocimiento de la importancia del suelo para el bienestar de la sociedad es notable.

El presente libro es el fruto de un gran esfuerzo de generar y recopilar información relevante para encaminar a la sociedad hacia el manejo sustentable del recurso suelo en la península de Yucatán. Esta zona del país se distingue por ser una extensa región cárstica en la que se desarrolló en buena parte la cultura maya. Ambas características la convierten en una zona única del país, que contribuye de manera importante a la gran riqueza natural y cultural de México. El libro aborda en su primera parte una caracterización del recurso suelo tanto a escala regional como a escala local. En ella no sólo se profundiza el conocimiento dentro del marco de la ciencia edafológica moderna, sino también se incluye un análisis del conocimiento que los antiguos mayas tenían de su entorno natural y en particular de los suelos. En la segunda parte del libro se presentan resultados de investigaciones científicas y socio-económicas realizadas por diversos grupos de expertos que se han dedicado a estudiar a detalle algunos aspectos de relevancia para mejorar el manejo del suelo en esta zona tan particular. Los temas abordan temáticas de aprovechamiento y manejo agrícola y ganadero como también de restauración ecológica y uso forestal. El libro representa por lo tanto un documento que informa a usuarios y tomadores de decisiones sobre la distribución de los suelos en la península de Yucatán y sus características y potencialidades, rescata el conocimiento autóctono del recurso e introduce y difunde posibilidades para mejorar su uso y manejo.

Dra. Christina Siebe

I

INTRODUCCIÓN

INFORMACIÓN EDAFOLÓGICA PARA EL MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Francisco Bautista

Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue el de hacer énfasis en la importancia de la información edafológica en la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales de la Península de Yucatán (PY), en los diversos niveles de influencia del suelo. Se elaboró un ensayo en dos aspectos claves, alrededor de los cuales se realizó el discurso: a) La comprensión del suelo como recurso natural no renovable que sirve de base para la obtención de productos (alimento, fibras, madera, recreación, etc.) y , b) El entendimiento de los ámbitos de influencia del manejo del suelo: global, regional y local. El suelo en términos llanos es “la maquinaria natural que el hombre utiliza para elaborar sus alimentos y obtener otros productos para su confort”, es fuente de materiales diversos y sobre él se construyen carreteras y ciudades. Además el suelo contiene la historia de la tierra y de las culturas antiguas y ha sido fuente de inspiración poética, pictórica, musical, estética y religiosa. En este trabajo se comenta la importancia de cada capítulo de este volumen, de acuerdo con su ámbito de influencia. En el ámbito global, la conservación de la biodiversidad junto con el cambio climático mundial son las principales preocupaciones. En el ámbito regional el conocimiento de los suelos es de gran ayuda en la elaboración de planes de manejo de los recursos naturales y en la planificación de medidas de contingencia ambiental. En el ámbito local la importancia del conocimiento del suelo radica en el aumento de la cantidad y calidad de la producción agrícola, pecuaria y forestal. Se presentan trabajos relacionados con la heterogeneidad espacial del suelo en mapas parcelarios y ejemplos de mejoramiento de sistemas productivos, así como el diseño de agroecosistemas con base en el manejo de recursos no convencionales. El estudio y concepción del suelo como ecosistema en lugar de hábitat de plantas y animales, o peor aún, como sustrato, permitirá un mejor entendimiento de su funcionamiento, con lo cual será posible el aumento de su potencial agrícola, pecuario y forestal, así como la preservación del ambiente y la biodiversidad.

ABSTRACT

The aim of this work was to emphasize the importance of the soil information in taking decisions about natural resources management in the Peninsula de Yucatan (PY), this was in several level of the soil influence. An essay was done in two key areas: a) The understanding of the soil as a non renewable natural source which is used as a base to obtain several products (food, fibers, recreation, etc.) and b) The understanding of the different management scales of the soil: global, regional and local. The soil as a plain concept is considered “ the natural machinery that men uses to produce food and to obtain several products for his wellness”, is the source of several materials and on it is built cities and highways, also the

soil contains the land and old culture history and is considered as a poetic, pictorial, musical, esthetic, and religious inspiration. In this work is discussed the importance of each chapter of this volume according with the influence level. In the global scale, the biodiversity conservation together with the global climatic change which are the main concerns. In the regional scale, the soil knowledge is a big help to elaborate natural resource management plans and contingency environmental measures planning. In the local scale, the importance of the soil knowledge is based in the increasing of quantity and quality of crop, animal production, and forest yield. Several works were presented related to the spatial heterogeneity of the soil in farm maps and also some studies related to the productive systems improvement and the agroecosystems design based on no conventional resources management. The study and understanding of the soil as ecosystem instead of animal and plant habitat or even as a substrate it will let a better understanding how it works, this will increase crop, animal and forest potential and also the environmental preservation and the biodiversity.

INTRODUCCIÓN

LOS MOTIVOS DEL ESTUDIO DEL SUELO

A nivel del globo terrestre existen elementos del ambiente que por su magnitud e importancia han recibido nombres de capas terrestres, como la hidrosfera (agua), litosfera (rocas), atmósfera (aire) y aún la biosfera (organismos), así mismo, en la década de los noventa se ha considerado que el suelo debe ser valorado y entendido como un elemento del ambiente denominado pedosfera (Pedos= suelo). La pedosfera es una geomembrana que permite el intercambio de materia y energía entre la litosfera y la atmósfera, sirviendo de protección a la primera ante los efectos climáticos, en sentido figurado es “La piel de la tierra” (Arnold *et al*, 1990).

El suelo es un cuerpo natural, tridimensional, situado sobre la superficie de la tierra, formado a partir de materiales minerales y orgánicos, soporta o es capaz de soportar plantas en forma natural, además esta constituido de una gran variedad de organismos, entre los que se encuentran los virus, bacterias, protozoarios, invertebrados de diversos phyla, hongos, algas y plantas.

El suelo es un elemento dinámico, cambia con el tiempo y en el espacio, contiene material mineral y/u orgánico no consolidado que ha sido sujeto a los factores formadores (clima, roca, organismos, relieve y tiempo). En el suelo se desarrollan diversos procesos físicos, químicos y biológicos, responsables de su morfología, características y funciones (Arnold, 1990; SSSA, 1997). La formación de un suelo es un proceso largo que dura de cientos a miles de años, por lo que este recurso natural debe considerarse como no renovable.

El suelo constituye el medio natural en donde se desarrolla la vegetación y los cultivos agrícolas, en él se inicia y termina la cadena alimentaria: las plantas toman de allí sus nutrientes, agua y oxígeno. Los herbívoros necesitan de las plantas para vivir, en tanto que los consumidores secundarios, los carnívoros, requieren de los herbívoros para su subsistencia. Cuando plantas, herbívoros y carnívoros mueren los desintegradores (invertebrados, hongos y bacterias) los descomponen y se reciclan los nutrientes.

El uso adecuado del suelo influye en: la conservación de la biodiversidad; estabilidad del clima mundial; conservación de los cuerpos de agua; funciona como un reactor

(filtrando, amortiguando y transformando los contaminantes); aumento de la producción agrícola, pecuaria y forestal; conservación de los sitios turísticos y recreativos; y en la disminución de problemas de contaminación ambiental.

El suelo contiene evidencias sobre la historia del mundo y de las culturas antiguas, es fuente de materiales diversos (aluminio, materiales de construcción, filtros moleculares, etc.) y es utilizado con fines urbanos y carreteros.

Además el suelo ha sido fuente de inspiración poética, pictórica y estética. En las culturas mesoamericanas fue motivo de adoración mística: la madre tierra.

LA DEGRADACIÓN DEL SUELO

La degradación del suelo es un problema que ha venido creciendo con el paso del tiempo, generando problemas ambientales de tipo global, regional y local, como por ejemplo, el cambio climático global, el asolve de lagos y la compactación del suelo, respectivamente.

La degradación de suelos es como “una crisis silenciosa” que está avanzando tan rápidamente en América Latina, que pocos países tienen la esperanza de alcanzar una agricultura sostenible en un futuro próximo. Es un problema que, a pesar de estar amenazando la subsistencia de millones de personas en la región, tiende a ser ignorado por los gobiernos y la población en general.

La degradación del suelo en la PY ha ocasionado la baja productividad agrícola, forestal y pecuaria tanto de los sistemas actuales (e.g. fertirriego y manejo de pastizales), como la de los sistemas tradicionales (e.g. milpa y henequén) (Arias, 1995; Cortina, 1995), lo cual ocasiona una baja de rendimiento que perjudica la economía de la región.

Esta situación de degradación del suelo se presenta debido a diversos factores, entre los que se encuentran: a) La operación de prácticas agropecuarias en las que se utiliza el suelo como sustrato, sin considerar sus propiedades, funciones y potencial intrínseco; b) La escasez de estudios edafológicos (debido al alto costo y a la escasa

cantidad de profesionistas que trabajen en el área); c) La dificultad de la comprensión de los conocimientos edafológicos generados; d) La escasez de planeación en el uso del suelo; y e) La falta de conciencia ambiental al desconocer la importancia del suelo (Zinck 1990; Valenzuela y Zinck 1994). Además de la presencia de problemas de degradación edáfica, el sobre uso de insumos agrícolas y la deficiente disposición de desechos se traduce en contaminación del ambiente (suelo, agua y aire) y en la pérdida de la biodiversidad.

Los tomadores de decisiones que participan en la administración del espacio físico de la región, así como los productores agrícolas, pecuarios y forestales, no han contado con la suficiente información (en cantidad y calidad) que les permita tener los elementos de juicio suficiente para fundamentar técnicamente la toma de sus decisiones.

A pesar de la realidad de la región, en la PY, se cuenta con los mapas de suelo a escala 1:250000 generados por el INEGI y con la valiosa información producida por Duch (1980, 1988; 1991; 1992, 1995) para el estado de Yucatán, así como información de carácter agronómico generada por diversos investigadores, entre los que destaca el grupo del Dr. Efraím Hernández Xolocotzi (Hernández y Padilla, 1980; Hernández, 1985; Pool y Hernández, 1987ab; Hernández *et al*; 1995).

Sin embargo, es claro que en investigación sobre aspectos pedológicos, geográficos, ambientales, agrícolas, urbanos, etc. queda mucho por estudiar, por ejemplo, se requiere investigación para generar recomendaciones sobre el uso de la quema, fertilización, aplicación de abonos, labranza, riego, control de arvenses, plagas y enfermedades, en los manchones y asociaciones de suelos. La información de carácter técnico sobre los suelos es puntual y escasa.

Por los problemas arriba mencionados, se hace necesaria la divulgación de los avances científicos actuales sobre el estudio del recurso suelo, función que, en parte, se realizará con el presente volumen.

A continuación se mencionan diversos aspectos que se consideran relevantes y que son tratados en este volumen. Son líneas de investigación que se recomienda continuar, para lo cual es importante concebir al suelo de acuerdo a sus ámbitos de influencia y de uso: nivel local, regional y global. Así como concebir al suelo como un recurso natural no renovable que sirve de base para la obtención de productos (alimento, fibras, madera, recreación, etc.), es decir, en términos más llanos el suelo es "la maquinaria natural que el hombre utiliza para elaborar sus alimentos y obtener otros productos para su confort", además de tener una función en la calidad del ecosistema, "constituirse en una propiedad nacional" y tener una influencia global en la regulación del clima.

EL ÁMBITO MUNDIAL

En la mayoría de los países de América Latina y el Caribe, así como en la PY, se ha restringido y, en la mayoría de los casos, suspendido la realización de levantamientos de suelo debido a que presentan problemas coyunturales y estructurales como lo menciona Zinck (2005) en este volumen.

La información edafológica en el nivel global o mundial adquiere importancia debido a que su uso inadecuado repercute en dos grandes problemas de la humanidad: la pérdida de la biodiversidad y el cambio climático mundial. Ambos son tratados en este volumen (Bautista y Delgado, 2005; Escamilla *et al.*, 2005; Huerta, 2005).

El uso agrícola de los suelos y en especial con monocultivos genera la disminución de la diversidad de los macroinvertebrados edafícolas, este hecho se discute y documenta en este volumen, a nivel mundial y regional el estudio de Huerta (2005) constituye un avance importante en el reconocimiento de la importancia agrícola de los macroinvertebrados. A nivel local y muy específico Bautista y Delgado (2005) demuestran que el uso de cultivos de cobertera, en condiciones de karst, tiene un efecto positivo en la conservación de la abundancia de lombrices y caracoles.

El uso prudente de los suelos es de suma importancia en la conservación de la biodiversidad. Este hecho ya es

reconocido por la sociedad y como resultado se tienen reservas de diversos tipos, con reconocimiento mundial (reservas de la biosfera), federal, estatales y comunitario; con fines diversos, como morales, turísticos, estéticos, de manejo, de protección a otros ecosistemas, etc.

Los diversos niveles de gobierno podrán dar un mayor y mejor fundamento a su toma de decisiones sobre la protección y manejo de las reservas si se conoce y considera la función de los suelos en los que se encuentran.

El estudio y concepción del suelo como ecosistema en lugar de hábitat de plantas y animales, o peor aún, como sustrato, permitirá un mejor entendimiento de su funcionamiento, con lo cual será posible el aumento de su potencial agrícola, pecuario y forestal, así como la preservación del ambiente y la biodiversidad.

Es ya ampliamente conocido el papel del suelo en la fijación de carbono, lo cual contribuye a la captura de un elemento que participa de manera fundamental en la formación de gases que provocan el efecto invernadero en la atmósfera, lo cual propicia el cambio climático global o, más propiamente dicho, el cambio climático mundial.

EL ÁMBITO REGIONAL

LA PLANEACIÓN EN EL MANEJO DE RECURSOS NATURALES

En este ámbito, la planeación en el manejo de los recursos naturales es de reconocida importancia, considerando los problemas globales y teniendo en cuenta las actividades a nivel parcela. El objetivo de la planeación de las actividades productivas radica en lograr el balance entre la obtención de la máxima ganancia y la conservación de la calidad del ambiente. En este sentido, cada uno de los estados de la PY está elaborando los planes de ordenamiento ecológico, para lo cual requieren, en primera instancia la elaboración de un diagnóstico ambiental con base en la geomorfología, suelos, hidrología, uso de suelo y vegetación, entre otros.

En la elaboración del diagnóstico ambiental en cada estado hay mucho por hacer, como por ejemplo decidir la forma de integración de la información “ambiental”. Algunos autores han recomendado el uso del enfoque geomorfológico (Bocco *et al.*, 1998; 1999), otros recomiendan el enfoque morfopedológico (Geissert, 2000). Sin embargo, se requiere la realización de investigación tendiente a identificar los enfoques y los métodos más adecuados a las diversas condiciones del karst ya que en la PY la identificación de las cuencas se dificulta debido a la escasa expresión del relieve.

En este volumen, se discute el origen de las geoformas, acuíferos y suelos de la PY y se realiza una propuesta de integración del conocimiento actual sobre los paisajes naturales, información que esperamos sirva de base para la toma de decisiones en torno a la realización del diagnóstico ambiental por cada estado (Bautista *et al.*, 2004a; Bautista *et al.*, 2005b). Se presentan mapas de la Costa de Campeche cada uno de ellos realizados con diferentes enfoques, como el geomorfológico, geopedológico y edafológico (Palacio *et al.*, 2005).

De manera general se recomienda que la base cartográfica para la integración de la información ambiental se realice con base en el conocimiento de las formas de evolución del karst y con el conocimiento de la dinámica de la hidrología superficial.

LA COLECCIÓN DE MONOLITOS Y BASE DE DATOS DIGITAL DE SUELOS

La toma de decisiones acertadas en el manejo de los recursos naturales, entre ellos el suelo, requiere de información confiable, de fácil acceso y expedita. La creación de colecciones científicas de suelos o también llamados centros de referencia de suelos o museos de suelos ha sido la respuesta a las necesidades de información edafológica.

La colección de monolitos de suelo más importante en el mundo es la del *Information Soil Reference International Center* (ISRIC) que cuenta con un museo con más de 1200 monolitos de todo el mundo y con una base de datos.

Los monolitos se exhiben en el museo junto con información pictórica y de las propiedades físicas y químicas del sitio. Han desarrollado la base de datos de suelos denominada SOTER que contiene además, datos de área de los suelos del mundo a escala 1:1 millón, el proyecto se denominó “Suelos del mundo y base de datos digital de terreno”. Este sistema presenta diversas aplicaciones, por ejemplo, evaluación de tierras, estudios de producción potencial de cultivos y capacidad de soporte de poblaciones. La base de datos ligada a un sistema de información geográfica, permite la cuantificación geográfica y la caracterización de áreas, que es de importancia en el ordenamiento del territorio (planeación) y en la generación de modelos (Batjes *et al.*, 1990). Los modelos son de importancia porque, a partir de observaciones cualitativas y cuantitativas, es posible la construcción de escenarios, que a la vez son de utilidad en la toma de decisiones.

Existen base de datos de suelos como la del proyecto titulado “Inventario mundial de emisiones potenciales del suelo” (WISE), así como algunas de tipo nacional, como por ejemplo en Alemania, Canadá, EUA y Filipinas, entre otros. En Latinoamérica, los centros de referencia de suelos son: Colombia (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), Cuba (Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar) y Venezuela (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables).

En la PY, la Universidad Autónoma de Yucatán cuenta con colecciones Botánica, Zoológica y se comienza a formar una colección de monolitos de suelo, que se describe en este volumen en el capítulo de May y Bautista (2005). De la misma manera, se está elaborando una base de datos digital con la información edafológica de la región.

Los objetivos de la elaboración de la colección de monolitos de suelo y la base de datos digital son: a) Apoyo a la docencia y fomento de una cultura ambiental en todos los niveles (primaria a doctorado); b) Investigación edafológica, agronómica, pecuaria, forestal y ambiental; c) Extensión en el ámbito agropecuario y forestal; d) Fuente de información para el apoyo a la toma de decisiones relacionadas con cuestiones agrícolas, pecuarias y forestales, así como ambientales.

LA CLASIFICACIÓN DEL SUELO

La clasificación de suelos tiene como finalidad su ordenamiento con base en las características principales, de tal manera que con el nombre se da información sintetizada; de esta forma, la clasificación del suelo se conforma en un medio de comunicación con base en conceptos previamente acordados y entendibles entre el grupo de personas que la conoce y maneja, es decir, la clasificación de suelos es un medio de comunicación entre especialistas.

La clasificación de suelos es necesaria para la toma de decisiones relacionada con la propagación de técnicas exitosas en los ámbitos agrícola, pecuario, forestal, urbano, ambiental y de salud. Así por ejemplo, el servicio de extensión agrícola requiere el manejo de la clasificación

edafológica o el nombre vernáculo del suelo para propagar las dosis de fertilizante, herbicida, abono, etc. Otros ejemplos son las recomendaciones sobre: a) Técnicas de manejo de cultivos de cobertera; b) Tipo y forma de labranza; c) Técnicas de remediación de suelos contaminados; d) Técnicas de construcción; etc. Todas ellas requieren del conocimiento del tipo de suelo.

La toma de decisiones sin considerar la unidad de suelo o la clase de tierra repercutirá negativamente en el éxito del servicio de extensión. Además, en el manejo del suelo se requiere de la consideración de la heterogeneidad espacial mediante la elaboración de mapas de suelo a diver-

sas escalas, con el fin de lograr aumentos en la producción agrícola, evitar problemas de degradación del ambiente y evitar problemas de salud humana.

En la mayoría de los trabajos presentados en este volumen se hace uso del nuevo esquema de clasificación denominado "Base de referencia mundial del recurso suelo" (WRB, 1998).

Se cuenta con una base de datos digital de la PY en el formato del software "Base de datos multilingual de suelos" que contiene información de más de 300 perfiles de Campeche, Quintana Roo y Yucatán.

EL ÁMBITO LOCAL

En este volumen se reportan diversos trabajos elaborados con nuevos enfoques en la elaboración de mapas de suelo, que son: a) Elaboración de mapas de atributos de suelo y clasificación y manejo de los epipedones; b) Tratamientos geoestadísticos (Díaz *et al.*, 2005); c) Levantamientos superdetallados para agricultura de precisión o de sitio específico; d) Mapas participativos de suelos/clases de tierra, con la participación activa de campesinos/agricultores considerando el conocimiento indígena o local; e) Mapas de paisaje edáfico, considerando la integración de la geomorfología como base cartográfica y de la pedología como el contenido edáfico (Bautista *et al.*, 2005c; Palacio *et al.*, 2005).

En el mismo sentido, la utilización de los nuevos enfoques para el manejo de la información edafológica deben ser adoptados y adaptados, principalmente el enfoque etnopedológico ya que en la región existe una gran cantidad de conocimiento local.

Ante la escasez de información edafológica escrita, la compilación de datos de suelos en la PY debe considerar ambas tendencias (tecnología de la información y nuevos enfoques). Ambas tendencias se complementan.

En el ámbito local la productividad agropecuaria y forestal es el eje que determina la pertinencia de los estudios edafológicos y por lo tanto la investigación está enfocada a la resolución de problemas prácticos; sin embargo, es pertinente tener en cuenta que las actividades que se hacen en este nivel no disminuyan la calidad de los recursos naturales, como por ejemplo la calidad del agua del acuífero, que en algunas zonas del karst de la PY se encuentran a una profundidad de algunos cientos metros (< 15 m). De la misma manera las actividades agropecuarias y forestales deben ser diseñadas o adaptadas a las condiciones cársticas de la PY.

En la administración de los sistemas agropecuarios y forestales la utilización de mapas de suelos a nivel parcela es de utilidad para conocer: a) Los grupos, unidades, órdenes o clases de suelos con los que se cuenta; b) Localización de los suelos; c) La extensión que abarcan; y d) El estado en el que se encuentran, es decir, su calidad. Con esta información la toma de decisiones es más acertada, por ejemplo, es posible estimar los costos de la adquisi-

ción de fertilizantes y abonos; seleccionar los cultivos; definir las densidades de siembra por manchones; estimar la cantidad de agua de riego a aplicar, etc.

En este volumen se presentan tres capítulos (Bautista *et al.*, 2005cd; Díaz *et al.*, 2005) en los que se estudia la heterogeneidad espacial y se realizan recomendaciones para la elaboración de mapas parcelarios, así como de sus posibles uso.

La conservación del ambiente y la producción agropecuaria y forestal han dado origen al redescubrimiento de una práctica realizada por las culturas mesoamericanas prehispánicas la agricultura de precisión o también llamada de sitio específico. El concepto se refiere a la identificación y manejo de la heterogeneidad espacial el suelo, en el que a cada uno se le agrega lo que la planta requiere, teniendo cuidado de no contaminar el ambiente, por ejemplo los cuerpos de agua superficiales y subterráneos. En este volumen Palma y colaboradores (2005) y Soria (2005) presentan capítulos sobre el uso eficiente de los fertilizantes en zonas tropicales que pudiera servir de base para la elaboración de planes agropecuarios y forestales en cada uno de los estados de la PY e incluso al interior de los municipios de los estados. Se promueven los fertilizantes considerando el uso eficiente y el cuidado del ambiente.

En este volumen Flores y Bautista (2004) reportan un inventario de plantas forrajeras de la PY de acuerdo al uso del suelo en las comunidades mayas, que servirá de base para la elaboración de investigación y ensayos tendientes a la utilización de las plantas forrajeras locales para la alimentación de ganado bovino, porcino y ovino, entre otros.

Llamas y colaboradores (2005) recomiendan tres especies de árboles forrajeros que pueden crecer en las minas de cal abandonadas, para forraje consumido por ovinos. Atienden tres problemas: 1) La recuperación o rehabilitación de áreas degradadas; 2) La producción de ovinos; y 3) La disminución de la contaminación del acuífero por el mal uso que se les da como sitios para la disposición de basura.

Cuanalo y Ramírez (2005) reportan las ventajas del mejoramiento de los sistemas productivos de los campesinos mayas, abordados de manera integral y con financia-

miento externo. El mejoramiento de la milpa y solar (ganadería de traspatio, frutales, especies maderables y hortalizas) al mismo tiempo logra una producción sostenible, financieramente atractiva y socialmente viable.

EL CONOCIMIENTO MAYA PARA EL MANEJO DE RECURSOS NATURALES

En la PY la gente local a través de su experiencia ha acumulado conocimiento sobre las propiedades, funcionamiento y manejo de los recursos naturales. El conocimiento local sobre los recursos naturales es amplio, incluye la información sobre el paisaje, geoformas, tipo de vegetación, plantas, animales, hongos, algunos microorganismos, minerales, suelos, ríos y acuíferos, entre otros aspectos. El conocimiento local presenta las siguientes características: restringido geográficamente, considera la dinámica temporal, es colectivo, diacrónico y holístico, producto de una larga historia de observación, análisis y manejo de los recursos naturales que es transmitido de forma oral de generación en generación (Toledo, 2000).

Los sistemas productivos diseñados con base en el conocimiento local se sustentan principalmente en las interacciones ecológicas (por lo cual a menudo son energéticamente eficientes); sin embargo, presentan limitaciones económicas al no estar dirigidas al mercado sino al autoconsumo (Bautista y Estrada, 1998; Barrera y Zinck, 2000).

Los campesinos han desarrollado una nomenclatura maya de las tierras, que es un reflejo de la heterogeneidad espacial a gran escala o de mayor resolución. En el medio rural, los productores realizan observaciones y comparaciones del funcionamiento de la *tierra* en el tiempo en relación con el ambiente y los organismos (plantas y animales) en procesos de corto y mediano plazos (Ortiz *et al*, 1990). En la PY, la nomenclatura maya es la que se usa tanto a nivel técnico como por los campesinos.

La nomenclatura maya podría ser en realidad una clasificación ecológica, al respecto Duchaufour (1977) menciona que: “una verdadera clasificación ecológica de los suelos no debería basarse en una jerarquía piramidal de órdenes o clases y subórdenes o subclases necesariamente arbitraria, sino en el establecimiento de *cadena de evolución*, llamadas secuencias evolutivas, establecidas en función de los diferentes factores del medio: cada suelo queda situado con relación a sus vecinos de los cuales se diferencia, ya sea por una intensificación del proceso ecológico de base, ya sea por la superposición de otro proceso, sobre el proceso de base, acercándolo a otra clase”.

Desgraciadamente no existe suficiente información escrita que permita entender cabalmente la nomenclatura o clasificación maya de los suelos, lo que repercute en la conservación y manejo. Al respecto, Duch (1995) menciona que: “a pesar del uso generalizado de la nomenclatura maya, no existe suficiente evidencia respecto a si el conjunto de términos mayas que son utilizados para identificar distintos tipos de suelo en Yucatán, se encuentran organizados en un sistema de clasificación o si solo conforman

un sistema de nomenclatura de carácter no jerárquico”. Si la nomenclatura maya llegara a tener un sistema de clasificación, al igual que en otras clasificaciones campesinas, ésta se encontraría en los rasgos evidentes como lo son: pedregosidad, rocosidad, color, posición topográfica y profundidad, así como en su manejo.

Las clasificaciones campesinas de tierras tienen un fin utilitario, relacionado con: a) Cultivos adaptables; b) Labores de cultivo; c) Manejo de abonos; d) Manejo de arvenses; y e) Métodos de conservación y recuperación del suelo (Ortiz *et al*, 1990). Por ello, la realización de bases de datos de tierras campesinas permitirían detectar tecnologías propias para cada localidad ya que las tierras se encuentran en una gran amplitud espacial o con una dispersión amplia y con diferente predominancia, lo cual ha ocasionado que los productores se especialicen en el manejo de alguna tierra en especial, en ese sentido, este conocimiento puede ser propagado entre los productores menos especializados.

Los intentos por encontrar relaciones entre la nomenclatura FAO y la maya han detectado que se dificulta relacionar directamente una clase de tierra con una unidad de suelo, por ejemplo, Duch (1988) encontró que la denominación *kan kab* puede aplicarse a Cambisoles, Nitosoles y Lixisoles.

Ante la escasez de reportes escritos se dificulta el entendimiento de la nomenclatura maya, la utilización de los mismos términos para diferentes clases de tierra en diferentes regiones y la aparentemente compleja estructura de esta nomenclatura y/o clasificación, hacen que tenga escasa repercusión en las políticas de uso de suelo, así como en la incorporación exitosa de tecnología (fertilizantes, herbicidas, riego, uso de mantillos, cultivos de cobertura, aplicación de abonos, etc.).

El conocimiento local sobre los suelos con base en la percepción, clasificación y aprovechamiento (etnopedología) debe ser un recurso intelectual utilizado para el mejoramiento de las prácticas de manejo de suelo y para el diseño de nuevos agroecosistemas con mayores posibilidades de inserción en el mercado y conservando las ventajas ecológicas de los agroecosistemas tradicionales. En este volumen se presentan tres capítulos relacionados con el tema, en ellos se hace énfasis en las ventajas y desventajas de este enfoque campesino.

Bautista y colaboradores (2005a) comentan el uso maya de las geoformas, suelo y agua en la PY, resaltando algunas prácticas de manejo de los recursos naturales en los cuatro principales tipos de paisajes geomorfológicos: montañas, pantanos, planicies cársticas y planicies costeras. Por ejemplo, las terrazas en las montañas de Campeche y Quintana Roo; los campos elevados y los canales de riego y el drenaje en los pantanos de Campeche; la nomenclatura maya de tierras y la roza tumba y quema en las planicies cársticas de Yucatán; y el canche, pesca y extracción de la sal en la planicie costera. Duch (2005) realiza un ensayo sobre la nomenclatura maya de suelos con base en el lenguaje y los usos de las tierras. García y colaboradores (2005) fundamentan la importancia de tener en cuenta el conocimiento campesino en el diagnóstico de los problemas agropecuarios y forestales.

CONCLUSIÓN

La promoción de la agricultura, en el sentido amplio del concepto, es de relevante importancia debido a que esta actividad da empleo a miles de personas que no tienen otra forma de vida o que les es muy difícil cambiarla.

La gran cantidad de desechos, producto de las actividades pecuarias intensivas en granjas y establos (cría de pollos, cerdos y reses), deben ser recicladas, aprovechadas y, finalmente, reutilizadas como abonos, de otra forma se convierten en desechos orgánicos potencialmente contaminantes del acuífero.

El turismo que es la principal actividad productiva en Quintana Roo y Yucatán y también de cierta importancia en Campeche, requiere de una amplia promoción de la agricultura ya que mediante esta actividad se genera empleo, se fomenta el reuso de desechos, todo lo cual propicia bienestar y paz social.

Algunos elementos tecnológicos se encuentran al alcance de las economías de los gobiernos, instituciones de investigación y extensión y productores. Dicha tecnología debería utilizarse en la generación, captación, almacenamiento, análisis, procesamiento y despliegue de informa-

ción edafológica. El problema mayor es la formación de personal al no contar con la materia de edafología en el currículo del biólogo, agrónomo, zootecnista, ingeniero forestal, ingeniero ambiental y demás profesionistas relacionados con el ambiente.

La capacitación de los nuevos profesionistas en el manejo de tecnología de la información relacionada con los recursos naturales es una tarea urgente y se espera que este volumen ayude a motivar a los estudiantes a abordar estos temas.

Las oportunidades de trabajo en el área edafológica en la PY pueden englobarse en dos grandes temas: a) El desarrollo de un nuevo tipo de agricultura de acuerdo con las condiciones del karst; y b) La creación y adaptación de tecnología agrícola, pecuaria y forestal, así como en el cuidado del ambiente.

Los editores esperamos que este volumen sirva de motivación a estudiantes y profesionales, investigadores y tomadores de decisiones para realizar trabajos de investigación y desarrollo en tan peculiar área del planeta: el karst de la Península de Yucatán.

REFERENCIAS

- Arias, L., 1995.** La producción milpera actual en Yaxcaba, Yucatán. *En: Hernández, E., E. Bello y S. Levy. La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 1. Colegio de Postgraduados.*
- Batjes, N. H., 1990.** Macroscale land evaluation using the 1:1 M World Soils and Terrain Digital database: Identification of a possible approach and research needs. SOTER Report No. 5, International Society of Soil Science, Wageningen, The Netherlands.
- Barrera, N. y J.A. Zinck, 2000.** Ethnopedology in a worldwide perspectives: an annotated bibliography. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. Enschede, The Netherlands.
- Bautista-Zúñiga, F y H. Estrada Medina, 1998.** Conservación y manejo del suelo. *Ciencias* (50): 50-55.
- Bautista, F., H. Rivas, C. Durán y G. Palacio, 1998.** Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*, 36:21-33.
- Bautista, F. y C. Delgado, 2005.** Abundancia de oligoquetos y gasterópodos con el uso de mantillos y cultivos de cobertura. *En: F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.*
- Bautista, F., G. Palacio, M. Ortiz, E. Batllori y M. Castillo, 2005a.** El origen y el manejo maya de los paisajes geomorfológicos, suelos y aguas en la Península de Yucatán. *En: F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.*
- Bautista, F., E. Batllori, M. Ortiz, G. Palacio y M. Castillo, 2005b.** Integración del conocimiento actual sobre los paisajes naturales en la Península de Yucatán. *En: F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.*
- Bautista, F., J. Jiménez, J. Navarro, A. Manu y R. Lozano, 2005c.** Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico. *En: Bautista F. y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.*
- Bautista, F., H. Estrada, J. Jiménez y J. González, 2005d.** Relación entre relieve y suelos en la zona exhenequenera de Yucatán. *En: F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.*
- Bocco, G. V., A. T. García, J. A. Velásquez, Ch. Siebe, 1998.** Geomorfología y recursos naturales en comunidades rurales: el caso de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. *Geografía y Desarrollo* 16: 71-99.
- Bocco, G. V., M. E. Mendoza, A. Velásquez, A. Torres, 1999.** La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México: el caso de Michoacán Ocampo. *Investigaciones Geográficas* 40: 7-47.
- Cortina, S., 1995.** La milpa tradicional en Becanchen. *En: E. Hernández, E. Bello y S. Levy. La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 1. Colegio de Postgraduados.*
- Cuanalo, H. y G. Ramírez, 2005.** Las perspectivas de las unidades de producción campesinas tradicionales en la Península de Yucatán: un estudio de caso. *En: F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.*
- Díaz, S., F. Bautista, C. Delgado y M. Castillo, 2005.** Mapas parcelarios de suelo en zonas de karst reciente. *En: F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.*

Duch, G.J., 1980. Proposiciones metodológicas para la determinación del uso potencial. *En:* E. Hernández y R. Padilla. Seminario sobre producción agrícola en Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán-Colegio de postgraduados. Yucatán, México.

Duch, G.J., 1988. La conformación territorial del Estado de Yucatán. Los componentes del medio físico. Centro Regional de la PY. UACH, México.

Duch, G.J., 1991. Fisiografía del estado de Yucatán: su relación con la agricultura. Centro Regional de la Península de Yucatán. UACH, México.

Duch, G.J., 1992. Condicionamiento ambiental y modernización de la milpa en el estado de Yucatán. *En:* D. Zizumbo, Ch. Rasmussen, L.M. Arias, S. Terán (eds). La modernización de la milpa en Yucatán: utopía o realidad II. Ambiente y Recursos Genéticos. CICY-DANIDA. Yucatán, México.

Duch, G.J., 1995. Los suelos, la agricultura y vegetación en Yucatán. *En:* Hernández, E., E. Bello y S. Levy. La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 1. Colegio de Postgraduados.

Duch, G.J., 2005. La nomenclatura maya de suelos: Una aproximación a su diversidad y significado en el sur de Yucatán. *En:* Bautista F. y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

Duchaufour, P., 1977. Atlas ecológico de los suelos del mundo. Toray-Masson. Barcelona, España.

Dunning, P. N., 1992. Soils and vegetation, Chapter 3. Lords of the hills: ancient maya settlement in the Puuc region, Yucatán, México. Monographs in world archeology No 15. Prehistory press. EUA.

Escamilla, A., F. Quintal, E. Pérez y L. Calvo, 2005. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

Flores, S. y F. Bautista, 2005. Plantas forrajeras de la PY de acuerdo al uso del suelo en las comunidades mayas. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

García, J., A. Mizrahi y F. Bautista, 2005. Manejo de la selva baja y selección de árboles para barbechos mejorados. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

Geissert, K.D., 2000. La cartografía morfoedafológica: un método integral para la evaluación del recurso suelo, 1-14 pp. *En:* J. López, A. Aragón y M. Valera. (Eds) Métodos de investigación en las ciencias ambientales. Publicación especial de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Hernández, E. y R. Padilla, 1980. Seminario sobre producción agrícola en Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán-Colegio de postgraduados. Yucatán, México.

Hernández, E., 1985. La agricultura en la PY. *En:* E. Hernández. (Ed). *Xolocotzia*: Tomo I. Revista de Geografía Agrícola, Universidad Autónoma de Chapingo. Edo. Méx. México.

Hernández, E., E. Bello y S. Levy, 1995. La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 1 y 2. Colegio de Postgraduados. Edo. México, México.

Huerta, E., 2005. La macrofauna del suelo y su potencial de manejo para el mejoramiento de la calidad del suelo. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

Llamas, E., J. Castillo, C. Sandoval y F. Bautista, 2005. Producción y calidad del follaje de árboles forrajeros establecidos sobre minas de cal abandonadas. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

May, C. y F. Bautista, 2005. Colección de monolitos de la Península de Yucatán. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

Ortiz, C. A., D. Pájaro y V.M. Ordáz, 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie cuadernos de edafología 15. Centro de edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México.

Palacio, G., V. Medina y F. Bautista, 2005. Diagnóstico ambiental de la costa de Campeche: enfoques geomorfológico, pedológico y geopedológico. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

Palma, D., S. Salgado y J. Obrador, 2005. Diagnóstico de suelos para el mantenimiento de la fertilidad en áreas tropicales. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

Pool, P. y E. Hernández, 1987a. La intensificación de la producción maicera bajo roza-tumba-quema en Yaxcaba, Yucatán, México. *Terra* 5(2):149-162.

Pool, L. y E. Hernández, 1987b. Los contenidos de materia orgánica de suelos en áreas bajo el sistema agrícola de roza tumba y quema: importancia del muestreo. *Terra* 5(1): 81-92.

Soria M. 2005. La nutrición de cultivos en la Península de Yucatán. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implementaciones agropecuarias, forestales y ambientales. Uacam-Uady. Campeche, México. 282 p.

Toledo, 2000. Indigenous knowledge on soils: an ethnoecological conceptualization. *En:* Ethnopedology in a worldwide perspectives: an annotated bibliography. N. Barrera y J. A. Zinck. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. Enschede, The Netherlands.

Valenzuela, C.R. y J.A. Zinck, 1994. Information technology requiring soil data. Symposium: Utilization of soil information in systems modeling for sustainable agriculture and global climate change. 15th World congress of soil science. Acapulco, México.

Zinck, J.A., 1990. Soil survey epistemology of a vital discipline. International Institute for aerospace survey and earth science. Enchede, The Netherlands.

Zinck, J.A. y C. Valenzuela, 1990. Soil geographical database: structure and applications examples. *ITC Journal*, 3:270-294.

Zinck, J.A., 2005. Suelos, información y sociedad. *En:* F. Bautista y G. Palacio. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales. UACAM-UADY. Campeche, México. 282 p.

SUELOS, INFORMACIÓN Y SOCIEDAD

Alfred Zinck

International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)

RESUMEN

La sociedad en general se siente menos impactada por la degradación del suelo que por la pérdida de otros recursos naturales, debido a que el recurso suelo no es un bien de consumo directo y porque comúnmente se asume que es renovable en tiempos humanos. Sin embargo, se estima que las pérdidas físicas y económicas son alarmantes. A escala global, la pérdida anual de 75 mil millones de toneladas de suelo le cuesta al mundo alrededor de \$ 400 000 millones US. Tradicionalmente, los datos de degradación de suelos eran colectados por estudios sistemáticos, sin embargo, en las últimas décadas han disminuido considerablemente debido a la recesión económica mundial y a la calidad poco satisfactoria de la información de suelos. Para hacer el estudio de los suelos rentable y más atractivo a los usuarios, se han desarrollado innovaciones tecnológicas y metodológicas para la obtención y conversión de los datos, en tres áreas principales: percepción remota, sistemas de información geográfica y estadística espacial. La taxonomía convencional de suelos es reemplazada por aproximaciones parciales en mapas monoatributos asociados a aplicaciones específicas. Se describen brevemente algunos de los acercamientos actuales para el mapeo de suelos, incluyendo los mapas temáticos, pedométricos, geopedológicos y participativos. Se subraya que si la información de suelos no es de fácil acceso e implementación, el usuario podría ignorarla y tomar decisiones sin ella. Por lo tanto es importante ofrecer aplicaciones creativas de información de los suelos para contribuir a la solución de problemas relacionados con su uso y manejo. Se hace referencia al trabajo de investigación aplicada que canaliza información de suelos en temas actuales como: degradación de suelos como resultado del manejo inadecuado de la tierra, el manejo de suelos y la agricultura sustentable, el conocimiento indígena y el manejo de los suelos, suelos y planificación del territorio, suelos relacionados con procesos ambientales y riesgos y suelos y cambio climático. Se concluye que el inventario de suelos tiene la capacidad de proveer valiosa información para el manejo de suelos, la planificación del uso del suelo y la valoración del riesgo ambiental, a través de la combinación convencional de técnicas de investigación.

ABSTRACT

Society at large feels less concerned by soil degradation than by the depletion of the other natural resources, because the soil resource is not a directly consumable good and because it is commonly assumed that soils are renewable at human scale. However, estimates of physical and economic losses are alarming. At global scale, the annual loss of 75 billion tons of soil costs the world about US\$ 400 billion per year. Traditionally, data on soil degradation were collected by systematic soil surveys, but the latter have considerably decreased over the last decades both because of global economic recession and unsatisfactory quality of the soil information. To make soil survey cost-effective and more

attractive to users, technological and methodological innovations for data gathering and data conversion into information have been developed, basically through increasing use of information technology, in three main areas: remote sensing, geographic information systems and spatial statistics. The conventional taxonomic soil map is increasingly replaced by more partial, often mono-attribute maps, geared towards specific applications. Some of the current approaches to soil mapping are briefly addressed, including thematic soil maps, pedometric maps, geopedologic maps and participative soil maps. But, if soil information is not easy to access and implement, the user might ignore it and make decisions without it. It is thus important to offer creative applications of soil information, to contribute to the solution of problems related with soil use and management. Reference is made to applied research work, which mobilizes soil information to integrate it into current topics such as: soil degradation resulting from inappropriate land management, soil management and sustainable agriculture, indigenous knowledge and soil management, soils in land use planning, soil-related environmental processes and hazards, soils and climate change. It is concluded that soil inventory is able to provide valuable information for soil management, land use planning, and environmental hazard assessment, through combining conventional survey techniques, local knowledge, remote sensing, and GIS-assisted data processing and modeling.

INTRODUCCIÓN

El recurso suelo no goza de la misma consideración y del mismo aprecio que los demás recursos naturales como son, por ejemplo, las aguas, los bosques o los yacimientos minerales, porque no es un bien directamente consumible y también porque existe la creencia común pero errónea de que los suelos son renovables a escala humana. Probablemente es por esta razón que la sociedad en general se siente menos interesada por la degradación de suelos que por el agotamiento de otros recursos naturales. En efecto, los seres humanos logran destruir en unos pocos años un recurso, que a la naturaleza le cuesta miles de años formar. En la primera parte de este trabajo, se llama la atención sobre la gravedad y la magnitud de la degradación de suelos, con énfasis en los daños causados por acciones humanas. Los datos actualmente disponibles sobre degradación de suelos han sido ampliamente derivados de la información generada por los levantamientos de suelos. Muchos de estos datos tienen entre 10 y 15 años de antigüedad, o inclusive más, y no han sido actualizados desde entonces, porque el inventario sistemático de suelos se ha descontinuado en muchos países, parcialmente debido a que los levantamientos convencionales de suelos

son caros y la información edáfica se presenta frecuentemente en forma poco amigable para los usuarios. Esto ha conducido a una situación de crisis, un aspecto que se aborda en la segunda parte del trabajo. Pero la crisis resultó también ser saludable, porque creó la oportunidad para idear y desarrollar nuevos enfoques de cartografía de suelos, estimulados por los avances realizados en el campo de la tecnología de la información. En la tercera parte, se describen algunas de estas nuevas tendencias en el mapeo de suelos. Sin embargo, por más sofisticadas que se pongan las técnicas de levantamiento, lo más importante al fin y al cabo es que se utilicen efectivamente los datos y la información de suelos para la solución de problemas prácticos por parte de las comunidades locales y la sociedad en general. En la última parte, se describe una serie de aplicaciones de la información de suelos, desarrolladas mediante obras de investigación a nivel doctoral y de maestría en el ITC de Holanda, como ejemplos ilustrando el carácter polivalente de la información edáfica. Tal como lo sugiere el título, el objetivo general del trabajo consiste en establecer puentes entre el recurso suelo y la comunidad de usuarios mediante flujos de información.

SUELO, UN RECURSO EN PELIGRO

LA DEGRADACIÓN DE SUELOS EN TÉRMINOS FÍSICOS

El concepto de degradación de suelos y el de degradación de tierras no son sinónimos, pero el primero es indudablemente el componente más importante del segundo. Existen algunas aproximaciones cuantitativas de la degradación de suelos a nivel global y continental, pero resulta frecuentemente difícil comparar datos provenientes de fuentes diferentes porque no se utilizaron los mismos criterios en la evaluación de la degradación.

A escala global, la erosión hídrica es el proceso dominante en la degradación de suelos inducida por intervenciones humanas, el cual afecta cerca de 11 millones de

km² (igual al 8.5% de los 130 millones de km² de tierras en la superficie del globo terráqueo). En conjunto, la erosión por agua (10.94 millones de km²), la erosión por viento (5.49 millones de km²), la degradación química (2.39 millones de km²) y la degradación física (0.83 millones de km²) afectan, en diferentes niveles de gravedad, casi 20 millones de km², representando 15% de la superficie global de tierras, lo que es aproximadamente 66% de las tierras potencialmente arables a nivel mundial (Oldeman, 1994). Estas cifras, muy posiblemente, están por debajo de la extensión real de tierras degradadas. A escalas más grandes, los datos son más precisos, revelando proporciones mayores de degradación.

En las regiones secas del mundo, los suelos son particularmente vulnerables al uso y, como consecuencia, cer-

ca del 70% de los 52 millones de km² de su extensión se encuentra afectado por algún tipo de degradación o por una combinación de procesos de degradación (Dregne & Chou, 1994). En las mismas regiones secas, cerca de 10 millones de km² corresponden a suelos afectados por salinidad primaria en condiciones naturales, en una extensión que representa el 7.7% de la superficie global de tierras, o sea 20 veces la superficie de un país como Francia, y que equivale a 33% de las tierras potencialmente arables a nivel mundial. En suma, 0.8 millones de km² sufren de salinización secundaria por el manejo inadecuado de tierras agrícolas, con el 58% de éstas en áreas de regadío. Aproximadamente el 20% de todas las tierras regadas se encuentran afectas por sales, y esta cifra incrementa constantemente (Ghassemi *et al.*, 1995). En algunas regiones de África, expuestas a erosión de suelos y desertificación, la productividad de las tierras ha mermado casi en un 50% (Dregne, 1990).

Todavía no se dispone de buena información sobre las tasas de degradación de tierras, porque esto requiere seguimiento temporal. Se estima que cada segundo se pierden 8.5 hectáreas de tierras productivas (Movillon *et al.*, 2001).

LA DEGRADACIÓN DE SUELOS EN TÉRMINOS ECONÓMICOS

A escala global, se pierden anualmente 75 mil millones de toneladas de suelo, que representan un costo de US\$ 400 mil millones, o sea aproximadamente US\$ 70 por persona

cada año (Lal, 1998). Para el conjunto de los países del sur de Asia, se estima la pérdida de productividad de suelo por erosión hídrica en US\$ 5.4 mil millones por año y la pérdida de productividad de suelo por erosión eólica en US\$ 1.8 mil millones por año (UNEP, 1994). En los EUA, el costo total de la erosión en tierras agrícolas representa US\$ 44 mil millones por año, lo que significa US\$ 250 por hectárea (Lal, 1998).

También se ha estimado el impacto económico de procesos específicos de degradación como consecuencia del mal manejo de las tierras. Por ejemplo, la compactación de suelo en los USA genera pérdidas a nivel de finca de cerca de US\$ 1.2 mil millones por año (Gill, 1971). En Zimbabwe, el agotamiento de la fertilidad del suelo causa pérdidas del orden de US\$ 1.5 mil millones (UNEP, 1994). El daño económico por salinización secundaria en la cuenca del Río Colorado se estima en US\$ 750 millones por año (Ghassemi *et al.*, 1995).

Todas estas cifras son alarmantes. En realidad, se trata solamente de aproximaciones generales. Para obtener datos más precisos sobre el nivel de severidad, la extensión y la tasa de degradación de las tierras por tipo de proceso, se requieren evaluación y monitoreo a escalas más grandes.

LOS LEVANTAMIENTOS DE SUELO EN CRISIS

Tradicionalmente, el inventario sistemático de suelos a nivel de país o de región era la fuente principal de datos sobre degradación de suelos. Pero, desde principios de los años 1990, muchos países han discontinuado o disminuido drásticamente los proyectos y las operaciones de levantamiento de suelos por una serie de razones, que revelan tanto el contexto económico de la época (razones "coyunturales") como de fallas en la calidad de la información edáfica (razones "estructurales").

RAZONES COYUNTURALES

Las razones coyunturales están relacionadas con la situación económica general y son por lo tanto exteriores al levantamiento de suelos.

- La recesión económica global, relacionada mayormente con la crisis del petróleo, lleva a restricciones presupuestarias a nivel nacional, lo que causa una reducción de las actividades de inventario de los recursos naturales en general y de los suelos en particular.

- La expansión del neo-liberalismo económico y la prerrogativa de la economía de mercado tienden a favorecer el control de las decisiones de ocupación del suelo por los mecanismos del mercado, mientras que las instancias gubernamentales pierden sus directrices o abandonan sus responsabilidades en la planificación del uso de las tierras. Como consecuencia, la demanda y/o implementación de información edáfica disminuyen.
- En muchos países desarrollados (occidentales), la cobertura cartográfica sistemática de suelos a escalas apropiadas está completa o por terminarse. En consecuencia, intereses y fondos se desplazan hacia levantamientos de suelos relacionados con proyectos específicos, generalmente a escala local y aplicaciones innovadoras de la información edáfica existente.

RAZONES ESTRUCTURALES

Las razones estructurales son inherentes al levantamiento de suelos y se refieren básicamente a relaciones desfavorables entre productor y usuario de la información edáfica.

Visibilidad insuficiente y presentación inapropiada de la información edáfica

- El lenguaje y el formato de los informes técnicos, de los mapas y de las leyendas no son amigables y difícilmente accesibles al no-especialista (nomenclatura complicada).
- Los mapas muestran excesivos detalles, que oscurecen los patrones de distribución de los suelos y de sus potenciales de uso.
- El estilo de presentación y publicación no resulta atractivo (p.e. mapas en blanco-y-negro), llevando al usuario a subestimar la calidad de la información proporcionada.
- Los mapas generales de suelos se utilizan para tomar decisiones y solucionar problemas, que pueden situarse en realidad fuera de los objetivos de los mapas concernientes, lo que lleva a cuestionar injustamente la confiabilidad de la información edáfica.
- El usuario no está interesado en el mapa taxonómico básico de suelos, sino en los mapas interpretativos derivados del documento básico, con leyendas simples diseñadas para propósitos específicos.

Falta de precisión en los mapas de suelos

- Los límites cartográficos no pasan por donde deberían pasar debido a imprecisiones en el levantamiento de campo o por desplazamiento de delineaciones resultando de la manipulación cartográfica.
- Las unidades cartográficas no son suficientemente homogéneas para los propósitos de uso. La presencia de

amplias impurezas y la inclusión de suelos contrastantes disminuyen la calidad de las predicciones sobre el potencial de uso de los suelos. Raramente, se menciona el grado de confiabilidad del mapa de suelos.

- Las propiedades edáficas, que se requieren para usos específicos, no se encuentran mencionadas en la leyenda del mapa o en el informe, porque el inventario se diseñó y ejecutó para planificación general del uso de las tierras y no para aplicaciones locales.

Altos costos de los levantamientos de suelos

- El levantamiento sistemático de suelos es una operación lenta y costosa. El mismo involucra personal de nivel universitario especializado, equipos y determinaciones de campo y de laboratorio, y datos de teledetección, que contribuyen todos a encarecer la información edáfica.
- Los costos de oportunidad son altos, porque la información no se suministra en el momento adecuado, lo que hace que las decisiones sobre uso y manejo de los suelos se tomen sin ella.
- En la evaluación de los costos, no se toma en cuenta el valor agregado generado por las interpretaciones con fines de usos múltiples, que se derivan del mismo mapa básico de suelos.
- El levantamiento de suelos no se considera una actividad directamente productiva. Los beneficios derivados y la relación costo/beneficio son difíciles de evaluar en términos cuantitativos.

Esta situación no ha cambiado fundamentalmente en los últimos 10 años y todavía sirve de tela de fondo a los cambios, que se están perfilando en la actualidad. Sólo unos pocos países continúan realizando levantamientos sistemáticos de suelos, a pesar de que el 30% de los países del mundo, representando el 70% de las tierras emergidas y el 60% de la población mundial, todavía no tiene una cobertura cartográfica de suelos completa a escalas cercanas al 1:1 millón (datos de 1992 según Purnell, 1995), sin mencionar la falta de información cartográfica de suelos a escalas más detalladas.

TENDENCIAS ACTUALES EN INFORMACIÓN DE SUELOS

Para abaratar los levantamientos de suelos y hacerlos más atractivos a los usuarios, se han desarrollado innovaciones tecnológicas y metodológicas para la recolección de datos y la conversión de éstos en información, básicamente a través de uso creciente de la tecnología de la información en tres áreas principales: teledetección, sistemas de información geográfica y estadísticas espaciales.

- **Teledetección (+GPS):** para la captura y el monitoreo de datos, aprovechando los progresos sostenidos en términos de resolución espectral, espacial y temporal, y las ventajas derivadas de la fusión de datos espectrales multi-fuentes y la integración de éstos con información contextual.

- **Sistemas de información geográfica (SIG):** para el almacenamiento, el procesamiento y la modelización de datos, así como para el despliegue de la información en términos amigables a los usuarios, con énfasis creciente en la calidad de los datos de entrada, la cual controla a su vez la calidad de la información de salida.

- **Estadísticas espaciales:** para evaluar, controlar y mejorar la calidad de los datos en términos de confiabilidad y precisión (kriging, lógica difusa, geometría fractal, inferencia de datos mediante funciones de transferencia, etc).

Estos avances tecnológicos y metodológicos han conducido a disminuir la recolección de datos de campo y de determinaciones de laboratorio, sin poder substituirlos cabalmente. En algunos países, se reciclan datos de suelos viejos de 30-40 años en importantes proyectos de desarrollo o para la evaluación de riesgos ambientales, sin perspectiva clara de que estos datos vayan a ser actualizados a corto plazo.

En términos de cartografía de suelos, el tradicional mapa taxonómico, rica base para múltiples interpretaciones con fines agrícolas, ingenieriles, sanitarias, ambientales, ecológicas, turísticas y estéticas, está siendo reemplazado por mapas parciales, enfocados hacia propósitos más específicos. A continuación, se mencionan algunas de estas orientaciones actuales en el dominio de la cartografía de suelos, incluyendo mapas temáticos de suelos, mapas pedométricos, mapas geopedológicos y mapas participativos de suelos.

MAPAS TEMÁTICOS DE SUELOS

Los mapas temáticos de suelos muestran un solo atributo edáfico a la vez (p.e. C, CE, pH, etc.) o una combinación de pocos atributos interrelacionados. Usualmente, los datos se refieren a la capa superficial del suelo, se procesan mediante técnicas geoestadísticas y se relacionan con algún problema específico de uso o manejo del suelo, frecuentemente de carácter ambiental (p.e. degradación o contaminación de suelos). Este enfoque consiste en cartografiar una rebanada de dos dimensiones de suelo y conlleva a ver el manto edáfico en forma fragmentaria, algo corta en comparación con el concepto de suelo como entidad tridimensional y como cuerpo organizado con múltiples interacciones. En los casos donde se requiere alta confiabilidad de la información edáfica, como por ejemplo en aplicaciones para agricultura de precisión, los mapas de atributos se realizan a nivel super-detallado.

MAPAS PEDOMÉTRICOS

Típicamente, en la elaboración de los mapas pedométricos, los modelos digitales de elevación o de terreno (MDT) sirven de sustento a la cartografía de suelos. Combinados con datos derivados de la teledetección para caracterizar propiedades de la cubierta vegetal (p.e. NDVI), de la superficie del terreno (p.e. rugosidad, costra salina) y de la capa arable (p.e. materia orgánica, humedad), los MDT se utilizan para inferir atributos edáficos y modelar la distribución espacial de los suelos, con lamentablemente pocas averiguaciones de campo. Los datos faltantes se generan mediante funciones de transferencia a partir de los pocos datos primarios disponibles. En casos extremos de modelización "in-vitro", se ha llegado a considerar el mapa de pendientes como un sustituto del mapa de suelos.

MAPAS GEOPEDOLÓGICOS

El enfoque geopedológico para cartografiar suelos combina activamente la contribución de la geomorfología y de la pedología, considerando el suelo como un cuerpo tridimensional en el paisaje (soilscape o paisaje edáfico). El levantamiento geomorfológico suministra los límites cartográficos de las unidades de mapeo de suelos, mientras que la pedología proporciona el contenido edáfico de estas unidades de mapeo en términos de componentes taxonómicos, su porcentaje areal y su patrón de distribución espacial. Este enfoque es particularmente robusto, porque combina los procedimientos convencionales de campo con las ventajas de la teledetección para la captura de datos y de los SIG para su procesamiento.

MAPAS PARTICIPATIVOS DE SUELOS

En sociedades rurales tradicionales, se movilizan conjuntamente el conocimiento empírico de los campesinos y el conocimiento técnico de los pedólogos, para preparar mapas de suelos integrados. La colaboración de antropólogos, pedólogos y geógrafos, entre otros, permite abordar la cartografía de suelos y tierras y su interpretación a fines prácticos en forma multidisciplinaria, donde los agricultores/campesinos participan activamente en la elaboración de los mapas de suelos y paisajes edáficos (básicos e interpretativos) de su territorio. Los mapas participativos de suelos gozan de la deferencia de los actores involucrados, lo que garantiza un uso efectivo de la información.

APLICACIONES DE LA INFORMACIÓN DE SUELOS

Al fin y al cabo, la necesidad de mejorar el inventario de suelos con base al uso de sofisticada tecnología de la información es posiblemente un problema menos relevante que el de llenar la brecha entre productor de información y

usuario potencial de la misma. Si la información de suelos no es de fácil acceso e implementación, el usuario estará inclinado a ignorarla en su toma de decisiones. Resulta por lo tanto importante anticipar la demanda y ofrecer aplica-

ciones creativas de la información de suelos, para así contribuir a la solución de problemas relacionados con el manejo y la degradación de suelos, el uso sostenible de las tierras, la planificación del uso de las tierras, o la evaluación de riesgos ambientales, entre otras cosas.

A continuación, se hace referencia a trabajos de investigación aplicada desarrollados en la División de Suelos del ITC con base en tesis doctorales, algunas tesis de maestría y unos pocos proyectos cooperativos de investigación. Todos estos trabajos han utilizado teledetección para recolectar y monitorear datos, así como técnicas de SIG para procesar datos y generar información, pero con claro énfasis en la solución mas bien de problemas de desarrollo que de mejoras tecnológicas de la información. Son ejemplos ilustrativos de las múltiples posibilidades de implementar información edáfica en un amplio espectro de aplicaciones, incluyendo degradación de suelos, manejo de suelos, riesgos ambientales inducidos por propiedades edáficas, los suelos en la planificación del uso de las tierras, y los suelos en los estudios sobre cambio climático. En todos estos trabajos, la geopedología constituye la piedra angular del marco conceptual y metodológico que sustenta la investigación. Se usó también este marco para estructurar un modelo conceptual de base de datos geográfica de suelos (Zinck & Valenzuela, 1990) y para analizar patrones espaciales de distribución de los suelos mediante índices cuantitativos (Saldaña, 1997; Saldaña, Stein & Zinck, 1998).

DEGRADACIÓN DE SUELOS RESULTADO DE MANEJO INAPROPIADO

Compactación de la capa arable

La creciente demanda de alimentos requiere un constante incremento de la producción agrícola. Esto puede lograrse de dos maneras: mejorando la productividad de los cultivos o ampliando la superficie cultivada. La tendencia actual es hacia la expansión de la frontera agrícola con base en la deforestación (100.000 km² por año a nivel mundial) e incorporación de tierras nuevas, especialmente en dos zonas agro-ecológicas: los trópicos húmedos y las áreas sub-húmedas a semi-áridas. Resulta que en ambas zonas los suelos son particularmente frágiles y de baja resiliencia, frecuentemente con aptitudes marginales para agricultura y por lo tanto expuestos a degradación rápida, especialmente mediante la compactación de la capa arable.

Se ha hecho un seguimiento de la compactación de suelos en la planicie sub-húmeda a semi-árida del Chaco, Provincia de Tucumán, en el noroeste de Argentina, un área de frontera agrícola en plena expansión gracias a los precios muy favorables de la soya en los mercados internacionales. A este efecto se utilizó una serie temporal de datos de teledetección multi-fuentes, cubriendo un período de 25 años (Flores, 1997; ITC-INGEMA, 2003). Los valores de los indicadores de compactación, incluyendo resistencia a la penetración y densidad aparente del suelo, aumentaron de 10-50% en la capa arable después de apenas dos décadas de agricultura mecanizada. De igual ma-

nera, en la región semi-árida de Shiraz, Provincia de Fars, en Irán central, los altos valores de densidad aparente causados por el monocultivo mecanizado de trigo resultaron ser el factor más limitante para el manejo sostenible del suelo (Moameni, 1999; Moameni & Zinck, 1999).

En los trópicos húmedos, la mayor causa de compactación del suelo es el pisoteo por bovinos en pastos establecidos. Se ha analizado este problema en el área de San José del Guaviare, en la Amazonia colombiana, donde 350,000 hectáreas de bosque han sido deforestadas para pastos durante las últimas dos a tres décadas. Después de unos pocos años dedicados a cultivos anuales, se establecen pastos *Brachiaria* para la cría de ganado bovino, con densidades de animal relativamente altas (0.5-0.7 UA/ha) en los primeros años, pero sin rotación de potreros. En el plazo de unos diez años, la calidad y la cantidad de los pastos disminuyen bajo el efecto de compactación del suelo por pisoteo, a tal punto que se abandonan los potreros y se rozan nuevas áreas de bosque mediante tala y quema (Martínez & Zinck, 1994, 2003).

Salinización de suelos

La salinización es un problema creciente de degradación de suelos en regiones sub-húmedas, semi-áridas y áridas, especialmente en áreas de regadío. Resulta relativamente fácil identificar y monitorear la presencia de sales en la superficie del terreno con datos de teledetección, pero el origen de las sales se encuentra frecuentemente en las capas profundas del manto edáfico, en el contacto con el material parental o el manto freático, lo que necesita detallado trabajo de campo para diagnosticar el problema y seguir su evolución. Se han utilizado diversos enfoques para monitorear el riesgo ambiental de la salinización de suelos: (1) Mediante la comparación de series temporales de datos de teledetección en el área de Cochabamba, Andes orientales de Bolivia (Metternicht, 1996; Metternicht & Zinck, 1996, 1997, 2003), y en el área de Shiraz, Irán central (Moameni, 1999); y (2) Mediante la comparación de mapas históricos y mapas actuales de salinidad en el área de Gorgan, en el norte de Irán (Naseri, 1998).

Agotamiento de la fertilidad de suelos

En agricultura mecanizada moderna, se utilizan fertilizantes químicos para suministrar nutrimentos a los cultivos. En cambio, se aplica raramente estiércol, lo que resulta en que el contenido de materia orgánica en los suelos se encuentra usualmente por debajo de los niveles de requerimiento de las plantas. El diagrama de control de calidad, comúnmente utilizado en el campo de la producción industrial, es una técnica adecuada para evaluar y monitorear el estado de los nutrimentos en el suelo por comparación con los niveles de aceptación/suficiencia específicos de cada cultivo. Se implementó esta técnica en el área de Shiraz, Provincia de Fars, en Irán central, para diagnosticar el agotamiento de los nutrimentos en el suelo bajo cultivo continuo de trigo. Esto permitió demostrar que los contenidos de carbono orgánico y de nitrógeno se encontraban completamente fuera de control agronómico en comparación con los requerimientos del trigo (Moameni & Zinck, 1997).

Modelización integrada de la degradación de suelos

Frecuentemente, los procesos de degradación de suelos operan en cadena. Por ejemplo, el agotamiento de la materia orgánica contribuye a debilitar la estructura del suelo, una situación que a su vez favorece la compactación de la capa arable y, por vía de consecuencia, la erosión laminar. El uso de indicadores monitoreando estos procesos en el tiempo, junto con mapas multi-temporales de uso de las tierras, permitió construir modelos de degradación continua del suelo en un dominio combinado tiempo-profundidad, en un área de producción de soya de la Provincia de Rio Grande do Sul, en el sur de Brasil (Wöhl-Coelho, 1999).

MANEJO DE SUELOS Y AGRICULTURA SOSTENIBLE

La degradación de los suelos afecta negativamente la sostenibilidad agrícola. Se han hecho grandes esfuerzos para identificar indicadores y calcular índices de sostenibilidad (Farshad & Zinck, 1993; Zinck & Farshad, 1995). Los términos de la sustentabilidad agrícola, incluyendo criterios e indicadores para la evaluación, son específicos, entre otras consideraciones, a las escalas espaciales y temporales, a los niveles jerárquicos del ámbito agrícola, y a los tipos de sistemas de producción a nivel de finca. Por lo tanto, se necesita una amplia variedad de enfoques para evaluar correctamente la sostenibilidad a diferentes escalas, niveles y tipos de agricultura. Se abordó este problema mediante una metodología de pasos sucesivos, que consiste en una serie de enfoques anidados movilizando indicadores simples o compuestos con fines de evaluar la sostenibilidad agrícola a cuatro niveles jerárquicos, incluyendo el sistema de manejo del suelo, el sistema de cultivo parcelario, el sistema de producción, y el sistema del sector agrícola como un todo.

Se han realizado varios estudios de caso para ensayar y calibrar una serie de técnicas de evaluación específicas a cada nivel del macro-sistema agrícola (Zinck et al., 2003a).

- **Sistema de manejo del suelo.** Un estudio de caso en Irán enfoca el sistema de manejo del suelo a nivel de las unidades individuales de suelo, utilizando diagramas estadísticos de control de calidad para evaluar el estado de la fertilidad de suelo y su efecto en la sostenibilidad agrícola. Límites estadísticos son adecuados para monitorear el comportamiento de una población de datos durante un lapso de tiempo determinado, pero los mismos tienen que ser substituidos por estándares de aceptación/suficiencia para evaluar la sostenibilidad. Una limitación importante de esta técnica es que se necesitan grandes series de datos para poder seleccionar al azar muestras representativas a partir de la población total y comprobar su distribución normal (Moameni & Zinck, 1997; Moameni, 1999).
- **Sistema de cultivo parcelario.** Un segundo estudio de caso en Kenya concentra en el sistema de cultivo a nivel de parcela, utilizando el análisis de la brecha de rendimientos para evaluar la sostenibilidad de la

productividad de los cultivos. Aunque esta técnica no indica directamente que nivel de rendimiento es sostenible, la misma señala que hay niveles de productividad de los cultivos más altos que los rendimientos actuales de los agricultores, que podrían alcanzarse con el uso de insumos adicionales y de prácticas de manejo mejoradas. Si el agricultor pudiese elevar el rendimiento a un nivel superior, su actividad agrícola sería más provechosa y por lo tanto económicamente más sostenible (Wokabi, 1994).

- **Sistema de producción.** Un tercer estudio de caso en Irán se refiere al sistema agrícola a nivel de la unidad de producción, o sea a nivel de finca, utilizando el análisis del balance energético para comparar la sostenibilidad de sistemas agrícolas modernos y tradicionales. Esta técnica presenta la ventaja de expresar todos los parámetros de entrada y salida en una misma y sola unidad de medición. También permite establecer razones de entrada/salida y comparar diferentes sistemas de producción en términos cuantitativos con el fin de evaluar su sostenibilidad. Sin embargo, este enfoque debe ser combinado con técnicas complementarias para cubrir las muchas facetas del concepto de sostenibilidad (Farshad, 1997; Farshad & Zinck, 2000).
- **Sistema del sector agrícola.** Un último estudio de caso realizado en Venezuela aborda el sector agrícola como un todo, utilizando un índice agregado para monitorear la sostenibilidad de la actividad agrícola a nivel regional/nacional. Los indicadores componentes del índice fueron seleccionados de acuerdo a la disponibilidad de datos, la sensibilidad de estos datos a cambios temporales, y su capacidad de describir cuantitativamente el comportamiento del sector agrícola de una región o de un país. El índice que se utilizó necesita ser afinado con la integración de indicadores adicionales y la ubicación de pesos diferenciales a los indicadores para reflejar adecuadamente su relevancia y su dinámica (Berroterán & Zinck, 2000).

En general, se necesitan todavía esfuerzos para integrar los varios enfoques metodológicos en un marco coherente, que permita navegar a través de los niveles jerárquicos del macro-sistema agrícola y tomar en cuenta los muchos requerimientos involucrados en un modelo holístico de la sostenibilidad.

CONOCIMIENTO INDÍGENA Y MANEJO DE SUELOS

En sociedades rurales tradicionales, la co-evolución entre ecosistema y sociosistema dio a los campesinos/agricultores un profundo conocimiento sobre manejo de suelos. Partiendo de esta realidad, se analizaron prácticas y sistemas integrados de manejo de suelos y aguas, que han demostrado su sostenibilidad gracias a una co-evolución milenaria, en la Provincia de Hamadan, Irán occidental (Farshad & Zinck, 1998). Paralelamente, gran atención fue dedicada a la definición del campo conceptual y metodológico de la etnopedología, la disciplina que estudia el conocimiento local (o indígena) de suelos (Barrera-Bassols, 2003; Barrera-Bassols & Zinck, 2003).

La etnopedología, una disciplina híbrida alimentada por las ciencias naturales y sociales, abarca todos los sistemas cognitivos de suelos y tierras en comunidades rurales, desde los más tradicionales hasta los modernos. Inicialmente, los estudios etnográficos clásicos concentraban su atención en el análisis lingüístico de los sistemas locales de clasificación de suelos y tierras, mientras que el enfoque comparativo se proponía de establecer similitudes y diferencias entre conocimiento local y la información científica. Más recientemente, el interés cambió y se dirigió hacia un enfoque más integral, que hace hincapié en el contexto cultural como base para la modelización del manejo sostenible de suelos a nivel local. La investigación etnopedológica cubre un amplio abanico de tópicos, centrados alrededor de cuatro áreas mayores: (1) La formalización del conocimiento local sobre suelos y tierras en esquemas de clasificación, (2) La comparación entre clasificaciones de suelos locales y técnicas, (3) La descripción de los sistemas locales de evaluación de tierras, y (4) La evaluación de prácticas de manejo agro-ecológicas.

Se ha evaluado la situación actual de la etnopedología a nivel mundial con base en una compilación de 895 referencias con respecto a la abundancia, la distribución y la diversidad de los estudios etnopedológicos (EPS) (Barre-ra-Bassols & Zinck, 2000). Los EPS recopilados se distribuyen en 61 países, esencialmente en África, América y Asia, abarcando 217 grupos étnicos. La densidad geográfica de EPS se correlaciona positivamente con la diversidad lingüística y la diversidad biológica, respectivamente. La mayoría de los EPS se ejecutó en zonas agro-ecológicas frágiles, donde las comunidades locales han desarrollado sistemas complejos de manejo de tierras y aguas para compensar la escasez de recursos. Entre los tres componentes principales de la etnopedología, los sistemas cognitivos locales (Corpus) y los sistemas de manejo locales (Praxis) han recibido hasta ahora más atención que los sistemas locales de creencias y percepción (Kosmos). Si la investigación etnopedológica le diera más importancia a la cosmovisión de las comunidades locales, los EPS podrían mejorar su contribución a la formulación e implementación de los programas de desarrollo rural.

LOS SUELOS EN LA PLANIFICACIÓN DEL USO DE LAS TIERRAS

La planificación del uso de las tierras puede abordarse desde diferentes perspectivas. Se trata claramente de un área multidisciplinaria, que necesita la contribución concertada de una variedad de especialistas. Hay una carencia de estudios de suelos, y ésta es la brecha que hemos tratado de ocupar con el propósito de contribuir a la planificación física a nivel local y al análisis de los conflictos de uso de las tierras a nivel regional. La planificación física en áreas rurales necesita información edáfica para agricultura, instalaciones sanitarias y obras de ingeniería civil, entre otras aplicaciones. Diseñar y desarrollar un sistema de riego, por ejemplo, necesita información de suelos para la selección de cultivos, método de riego y frecuencia de riego. La construcción de un centro poblado para los regantes requiere información de suelos para casas, carreteras, rellenos sanitarios y campos de absorción de los pozos sépticos (Zinck, 1990).

Otro tipo de ambiente donde la información edáfica demostró ser de mucha utilidad son las áreas peri-urbanas, por donde las ciudades se expanden rápida y desordenadamente, en general a expensas de tierras agrícolas de primera calidad. Las periferias urbanas son áreas volátiles, donde ocurren cambios repentinos y no planificados en el uso de las tierras. En una economía de mercado global, planificar la ocupación del suelo puede resultar ser una actividad frustrante, ya que el uso de las tierras se encuentra controlado por el comportamiento de los mercados financieros. Aún con estas limitaciones, la información de suelos es útil para detectar conflictos de uso, evaluar las aptitudes de las tierras para uso agrícola y uso urbano, establecer escenarios de uso de las tierras y proponer esquemas de usos preferidos. Se desarrolló un estudio de este tipo en la periferia occidental de Caracas, Venezuela (Rodríguez, 1995).

PROCESOS Y RIESGOS AMBIENTALES INDUCIDOS POR SUELOS

Las propiedades edáficas y la posición de los suelos en el paisaje determinan su susceptibilidad a ser dañados por procesos como son erosión laminar, incisión de cárcavas y movimientos en masa.

Erosión laminar

La erosión laminar es mucho menos espectacular que la erosión por cárcavas o por deslizamientos, pero la misma contribuye al truncamiento de los suelos años tras años y causa así pérdidas considerables de capa arable. Para entender los mecanismos involucrados en la erosión laminar y evaluar la magnitud de la pérdida de suelo que ocasiona, un buen enfoque consiste en caracterizar el comportamiento del suelo en pequeñas parcelas experimentales sometidas a lluvia artificial. Esto permite medir con precisión la contribución de la saltación pluvial y del escurrimiento superficial, respectivamente, a la producción de sedimentos. Los resultados así obtenidos pueden extrapolarse a la totalidad de una cuenca hidrográfica con base en un mapa de suelos. Se ejecutó un estudio de esta naturaleza en la región semi-árida de Maroua, en el norte de Camerún (Mainam & Zinck, 1998; Mainam, 1999; Mainam *et al.*, 2002).

Erosión por cárcavas

Los mecanismos que intervienen en la erosión por cárcavas todavía no se entienden cabalmente, lo que contribuye a hacer una modelización determinística engorrosa (Zinck *et al.*, 2001). Una cárcava, por ejemplo, puede iniciarse a partir de un entalle de surco, o a partir de un deslizamiento de suelo, o aún a partir de un conducto subterráneo de su-fusión. La fusión de datos de teledetección para el reconocimiento de rasgos en la superficie del terreno y la modelización cartográfica en SIG ofrecen interesantes posibilidades para vencer las limitaciones de la modelización

determinística. En la cuenca de Cochabamba, encastrada en la cordillera oriental de los Andes bolivianos, se logró discriminar áreas con cárcavas de otros rasgos de superficie gracias a la fusión de datos de Landsat TM y de JERS-1 SAR (Metternicht & Zinck, 1998). La exploración de relaciones de causa efecto entre factores ambientales y cárcavas resultantes permite identificar los factores más favorables a la formación de cárcavas y sus valores umbrales. Estos valores pueden incorporarse en sistemas expertos para detectar áreas potencialmente susceptibles al entalle de cárcavas. Se implementó un enfoque de este tipo en dos pasos, exploratorio-predictivo, para evaluar el riesgo de erosión por cárcavas en un área de altiplanicie de la faja volcánica transmexicana, en México central (Vázquez-Selem & Zinck, 1994).

Movimientos en masa

De manera similar a la formación de cárcavas, los movimientos en masa todavía escapan substancialmente a la modelización determinística. Las propiedades de suelo (físicas, mecánicas, químicas y biológicas) controlan en gran parte la susceptibilidad intrínseca de la cobertura edáfica a la erosión por movimientos en masa (Zinck *et al.*, 2001). Este estrecho control permitió establecer relaciones de causa efecto y preparar mapas de severidad de riesgos, a partir de una combinación de información geomorfológica y edáfica, en las altiplanicies de México central (Bocco, 1990) y en los Andes colombianos (López & Zinck, 1991).

Fragilidad y vulnerabilidad de ecosistemas naturales

Los ecosistemas tropicales son intrínsecamente frágiles y altamente vulnerables a tensores externos. En estas condiciones, intervenciones humanas inadecuadas pueden causar daños irreversibles. Las sabanas de arenas blancas sobre podzoles gigantes en la Cuenca Amazónica son muy vulnerables a la construcción de carreteras, mientras que los suelos rojos de baja fertilidad natural son muy vulnerables a la sedentarización de tribus nómadas, que practican la tradicional agricultura itinerante de roza-tum-

ba-quema. Se analizó el impacto de acciones de este tipo en la Amazonia venezolana (Bastidas de Calderón, 1998; Bastidas & Zinck, 1998).

Balance de erosión-sedimentación a nivel de cuenca

Un estudio en el Himalaya de Nepal central permitió determinar relaciones dinámicas entre áreas de erosión, almacenamiento (entrampamiento) y sedimentación en la cuenca del Río Trisuli (Shrestha, 2000). En las altas montañas, la producción de sedimentos por movimientos en masa y erosión glaciaria se encuentra controlada esencialmente por procesos naturales de ablación, sin intervención humana. Las cuencas de las montañas medias, densamente pobladas e intensivamente utilizadas para el cultivo de arroz en terrazas, se comportan como sistemas cerrados, que retienen *in-situ* una amplia proporción de los sedimentos producidos. Los sedimentos, que vienen de las altas montañas a través de grandes ríos troncales, causan degradación de tierras en las cuencas bajas debido al azolvamiento de los sistemas de riego y de su infraestructura de bombeo y conducción de agua.

SUELOS Y CAMBIO CLIMÁTICO

Los cambios climáticos, un tema de fuerte preocupación para la sociedad, pueden ser considerados desde varias perspectivas. El conocimiento sobre cambios climáticos pasados ayuda a predecir eventos futuros. La información edáfica puede contribuir a mejorar este conocimiento, ya que los suelos registran fielmente las condiciones climáticas en el pasado. Se abordó este tema a través de la datación radiocarbónica de paleosuelos, que cubren el Pleistoceno Superior y el Holoceno en diferentes tipos de ambientes: turbas (Histosoles) en las altas mesetas ("tepales") de la Amazonia venezolana (Zinck *et al.*, 2003b), secuencias de loess-paleosuelos en los Andes secos y la planicie del Chaco en el noroeste de Argentina (Zinck & Sayago, 1999, 2001), y paleodunas en la cuenca del Río Branco, en el norte de la Amazonia brasileña (Carneiro Filho & Zinck, 1994).

CONCLUSIÓN

Combinando técnicas convencionales de levantamiento (incluyendo datos de campo y de laboratorio), teledetección, y procesamiento y modelización de datos en SIG, el inventario de suelos está en condiciones de suministrar

una valiosa información para el manejo de suelos, la planificación del uso de las tierras y la evaluación de riesgos ambientales.

REFERENCIAS

- Barrera-Bassols, N., 2003.** Symbolism, knowledge and management of soil and land resources in indigenous communities: ethnopedology at global, regional and local scales. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium.
- Barrera-Bassols, N. y J. A. Zinck, 2000.** Ethnopedology in a worldwide perspective: An annotated bibliography. ITC Publication 77. ITC, Enschede, The Netherlands, 636pp.
- Barrera-Bassols, N. y J. A. Zinck, 2003.** Ethnopedology: a worldwide view on the soil knowledge of local people. *Geoderma* 111 (2003): 171-195.
- Bastidas de Calderón, M., 1998.** Environmental fragility and vulnerability assessment of Amazonian landscapes and ecosystems in the middle Orinoco River Basin, Venezuela. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 394p.
- Bastidas, M. y J. A. Zinck, 1998.** The vulnerability of fragile ecosystems in the Venezuelan Amazon. Impact assessment of road construction. Proceedings 16th World Congress of Soil Science, Symposium 36, Montpellier, France. 7 pages, CD-ROM.
- Berroterán, J.L. y J. A. Zinck, 2000.** Indicadores de la sostenibilidad agrícola nacional cerealera. Caso de estudio: Venezuela. *Revista Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, Issue 17: 138-154.*
- Bocco, G., 1990.** Gully erosion analysis using remote sensing and geographic information systems. A case study in Central Mexico. University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands, 130p.
- Carneiro Filho, A. y J. A. Zinck, 1994.** Mapping paleo-aeolian sand cover formations in the northern Amazon Basin from TM image. *ITC Journal* 1994-3: 270-282.
- Dregne, H.E., 1990.** Erosion and soil productivity in Africa. *Journal of Soil and Water Conservation* 45: 431-436.
- Dregne, H.E. y N.T. Chou, 1994.** Global desertification dimensions and costs. In: H.E. Dregne (ed.). *Degradation and Restoration of Arid Lands*. Texas Technical University, Lubbock, USA.
- Farshad, A., 1997.** Analysis of integrated soil and water management practices within different agricultural systems under semiarid conditions of Iran and evaluation of their sustainability. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 57, Enschede, The Netherlands, 395p.
- Farshad, A. y J.A. Zinck, 1993.** Seeking agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 47: 1-12.
- Farshad, A. y J.A. Zinck, 1998.** Traditional irrigation water harvesting and management in semiarid western Iran: a case study of the Hamadan region. *Water International* 23 (1998): 146-154.
- Farshad, A. y J.A. Zinck, 2000.** Assessing agricultural sustainability using the six-pillar model: Iran as a case study. In: S.R. Gliessman (ed.). *Agroecosystem sustainability: Developing practical strategies*. CRC Press, Boca Raton, pp.137-151.
- Flores, E., 1997.** Monitoring land use changes and comparing soil physical properties between arable and forest land in the western Chaco plain, NW Argentina. MSc Thesis, ITC, Enschede, The Netherlands, 151p.
- Ghassemi, F., A.J. Jakeman, H.A. Nix, 1995.** Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies. The Australian National University, Canberra, Australia, and CAB International, Wallingford, Oxon, UK.
- Gill, W.R., 1971.** Economic assessment of soil compaction. ASAE Monograph, St. Joseph, USA.
- ITC-INGEMA, 2003.** Land use change and land degradation in the western Chaco plain, Tucuman province, northwest Argentina. Project Report (in process).
- Lal, R., 1998.** Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences* 17: 319-464.
- López, H.J. y J.A. Zinck, 1991.** GIS-assisted modelling of soil-induced mass movement hazards: a case study of the upper Coello river basin, Tolima, Colombia. *ITC Journal* 1991-4: 202-220.
- Mainam, F., 1999.** Modelling soil erodibility in the semiarid zone of Cameroon. Assessment of interrill erodibility parameters for mapping soil erosion hazard by means of GIS techniques in the Gawar area. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 67, Enschede, The Netherlands, 387p.
- Mainam, F. y J.A. Zinck, 1998.** Erodibility assessment of selected soils in northern Cameroon using a field rain simulator. Proceedings 16th World Congress of Soil Science, Symposium 31, Montpellier, France. 7 pages, CD-ROM.
- Mainam, F., J.A. Zinck, E. Van Ranst, 2002.** Modelling interrill soil erosion in the semiarid zone of Cameroon. Proceedings 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, Symposium 23, Paper 37: 1-9, CD-ROM.
- Martínez, L.J. y J.A. Zinck, 1994.** Modelling spatial variations of soil compaction in the Guaviara colonization area, Colombian Amazonia. *ITC Journal* 1994-3: 252-263.
- Martínez, L.J. y J.A. Zinck, 2003.** Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil & Tillage Research* (in press).
- Metternicht, G., 1996.** Detecting and monitoring land degradation features and processes in the Cochabamba valleys, Bolivia. A synergistic approach. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 36, Enschede, The Netherlands, 390p.
- Metternicht, G.I. y J.A. Zinck, 1996.** Modelling salinity – alkalinity classes for mapping salt-affected topsoils in the semiarid valleys of Cochabamba (Bolivia). *ITC Journal* 1996-2: 125-135.
- Metternicht, G.I. y J.A. Zinck, 1997.** Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surfaces. *International Journal of Remote Sensing* Vol. 18, No. 12: 2571-2586.
- Metternicht, G.I. y J.A. Zinck, 1998.** Evaluating the information content of JERS-1 SAR and Landsat TM data for discrimination of soil erosion features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53 (1998): 143-153.
- Metternicht, G.I. y J.A. Zinck, 2003.** Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment* 85 (2003): 1-20.
- Moameni, A., 1999.** Soil quality changes under long-term wheat cultivation in the Marvdasht plain, South-Central Iran. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium, 284p.
- Moameni, A. y J.A. Zinck, 1997.** Application of statistical quality control charts and geostatistics to soil quality assessment in a semi-arid environment of south-central Iran. In: Conf. Geo-Information for Sustainable Land Management, ITC, Enschede, The Netherlands, CD-ROM.
- Moameni, A. y J.A. Zinck, 1999.** Data integration for assessing agricultural soil degradation in south central Iran. In: Proceedings Intern. Conf. on Geoinformatics for Natural Resource Assessment, Monitoring and Management, IIRS, Dehradun, India, pp. 33-51.
- Movillon, M., B. Richards, H. Tumawis, 2001.** What happens on earth in one minute? In: E.M. Bridges et al. (eds.). *Response to Land Degradation*. Science Publishers Inc., Enfield, NH, USA, p. 40.
- Naseri, M., 1998.** Characterization of salt-affected soils for modelling sustainable land management in semiarid environment. A case study in Gorgan Region, Northeast Iran. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 52 (2001), Enschede, The Netherlands, 321p.
- Oldeman, L.R., 1994.** The global extent of land degradation. In: D.J. Greenland & I. Szabolcs (eds.). *Land Resilience and Sustainable Land Use*. CAB, Wallingford, pp. 99-118.
- Purnell, M.F., 1995.** Soil survey information supply and demand: international policies and stimulation programmes. FAO, World Soil Resources Report 80, Rome, pp. 30-35.

- Rodríguez, O., 1995.** Land use conflicts and planning strategies in urban fringes. A case study of western Caracas, Venezuela. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 27, Enschede, The Netherlands, 266p.
- Saldaña, A., 1997.** Complexity of soils and soilscape patterns on the southern slopes of the Ayllon Range, Central Spain. A GIS-assisted modelling approach. Doctoral Thesis, University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands. ITC Dissertation 49, Enschede, The Netherlands, 251p.
- Saldaña, A., A. Stein, J.A. Zinck, 1998.** Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares river (Spain). *Catena* 33 (1998): 139-153.
- Shrestha, D., 2000.** Aspects of erosion and sedimentation in the Nepalese Himalaya: highland-lowland relations. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 77, Enschede, The Netherlands, 265 p.
- UNEP, 1994.** Land degradation in South Asia: its severity, causes and effects upon the people. FAO, World Soil Resources Report 78, Rome.
- Vázquez-Selem, L. y J.A. Zinck, 1994.** Modelling gully distribution on volcanic terrains in the Huasca area, Central Mexico. *ITC Journal* 1994-3: 238-251.
- Wöhl-Coelho, O., 1999.** Modelamento da degradação de latossolos na Região de Fortaleza dos Valos, Rio Grande do Sul: uma aplicação SIG / sensoriamento remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 165p.
- Wokabi, S., 1994.** Quantified land evaluation for maize yield gap analysis at three sites on the eastern slope of Mount Kenya. Doctoral Thesis, Ghent University, Ghent, Belgium. ITC Dissertation 26, Enschede, The Netherlands, 289p.
- Zinck, J.A., 1990.** Soil Survey: epistemology of a vital discipline. *ITC Journal* 1990-4: 335-351.
- Zinck, J.A., J.L. Berroterán, A. Farshad, A. Moameni, S. Wokabi, E. Van Ranst, 2003a.** Approaches to assessing sustainable agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* (in press).
- Zinck, J.A. y A. Farshad, 1995.** Issues of sustainability and sustainable land management. *Canadian Journal of Soil Science* 75: 407 - 412.
- Zinck, J.A., P. García, O. Huber, 2003b.** Characterization and radio-carbon dating of peat soils in the highlands of the Venezuelan Amazonia (in process).
- Zinck, J.A., J. López, G.I. Metternicht, D.P. Shrestha, L. Vázquez-Selem, 2001.** Mapping and modelling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, JAG 3 (2001-1): 43-53.
- Zinck, J.A. y J.M. Sayago, 1999.** Loess-paleosol sequence of la Mesada in Tucuman province, northwest Argentina. Characterization and paleoenvironmental interpretation. *Journal of South American Earth Sciences* 12 (1999): 293-310.
- Zinck, J.A. y J.M. Sayago, 2001.** Climatic periodicity during the late Pleistocene from a loess-paleosol sequence in northwest Argentina. *Quaternary International* 78 (2001): 11-16.
- Zinck, J.A. y C.R. Valenzuela, 1990.** Soil geographic database: structure and application examples. *ITC Journal* 1990-3: 270 - 294.

II

CARACTERIZACIÓN DE SUELOS



EL ORIGEN Y EL MANEJO MAYA DE LAS GEOFORMAS, SUELOS Y AGUAS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Francisco Bautista¹, Gerardo Palacio^{2,3}, Mario Ortiz-Pérez³, Eduardo Batllori-Sampedro⁴ y Miguel Castillo-González^{1,5}

¹Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán,

²Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche,

³Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México,

⁴Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados,

⁵FES-Z, Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN

Se discute la diversidad geomorfológica de la Península de Yucatán (PY), identificando siete niveles de evolución cárstica: reciente, reciente-juventud, juventud, juventud-madurez, madurez, madurez-tardía de relictos y tardía de relictos, mostrando un patrón morfológico de geoformas exocársticas, con formas de absorción circulares, cavidades de desarrollo vertical, circulación vertical y horizontal y surgencias periféricas. A mayor evolución kárstica, se incrementan las geoformas y depósitos residuales producto de la disolución de las calizas, hasta unirse gradualmente durante la madurez, y formar uvalas y poljés, particularmente sobre los controles estructurales presentes en Quintana Roo. Los acuíferos de mayor volumen se desarrollan en las rocas carbonatadas recientes, propiciando la existencia de dos acuíferos regionales, cuyo proceso geohidrológico es la mezcla de agua de reciente infiltración con agua salada más antigua más las sales presentes en los depósitos evaporíticos, donde la precipitación pluvial más alta detiene la intrusión salina. La alta permeabilidad y un somero nivel freático, otorgan un índice de vulnerabilidad de alto a extremo, a consecuencia de la intensa disolución. El agua pluvial infiltrada produce una compleja trama de cavidades subterráneas, sin corrientes superficiales, en el norte; hacia el sur, se tienen los Ríos Hondo y Sorpresas. En la porción costera, la descarga del agua se realiza a través de manantiales y hacia el mar, alimentando ciénagas y lagunas costeras. El origen de los suelos se encuentra bajo discusión, con la interpretación de la génesis sobre depósitos de sedimentos calizos, polvo meteórico o cenizas volcánicas depositadas y su combinación potencial. Estudios recientes muestran la disolución de la caliza y formación de un subhorizonte petrocálcico, de los calcisoles. Las clasificaciones campesinas de tierras tienen un alcance restringido, relación estrecha entre el nombre de la clase de tierra y el concepto, donde los intentos por encontrar relaciones con la nomenclatura Maya, detectan la dificultad al relacionar una clase de tierra con la unidad de suelo y donde la vegetación influye en su fertilidad. Los mayas se dedicaron al cultivo intensivo en tres tipos de hábitat (montañoso, pantanoso y costero), como lo indica la existencia de albarradas y terrazas en Campeche y Quintana Roo; combatieron las inundaciones mediante la elevación de campos y construyeron canales de riego y drenaje, reconociendo la importancia del uso diversificado de los recursos. Respecto a la pesca, los

mayas obtenían alrededor de 300 especies, comerciaron con sal, conocieron los beneficios del manejo de abonos, aguas residuales, mantillos y vegetación y clasificaron las tierras, según la heterogeneidad espacial.

ABSTRACT

Discuss the geomorphologic diversity of Yucatan Peninsula, identify seven levels of karstic evolution: recent, recent-youth, youth, youth-maturity, maturity, maturity- relict late and relict late, show a morphologic pattern of exokarstic geoforms, with circular absorption shape, hole of vertical development, vertical and horizontal circulation and outlying surgeons. The major karstic evolution, increase the geoforms and residuals deposit, product of the limestone dissolution, gradually join during her maturity, until fashion uvalas and poljes, where the current structural control at Quintana Roo, yield the uvalas formation. The volume major aquifers, was development on the recent limestone rock, give existence two regional aquifers, whose geohydrologic process be the mixture of water de recent infiltration with water salty over ancient and increase of salts content, join to evaporate deposit, where the over high rainfall, stop the salty intrusion. The high permeability and freatic level shallow confer a high-extreme vulnerability index, strong dissolution consequence. The infiltrate rainfall produce a complex weaves of underground cavity, at the North without superficial streams; at the south, hold the Hondo and Sorpresas Rivers. At the coastal portion, the water was discharge across springs and toward the sea, feed swamp and coastal lagoons. The soil origin was under discussion, by the genesis interpretation above limestone silt deposit, meteoric dust or volcanic ash placed and their potential combination. Recent studies exhibit the limestone dissolution and petrocalcic subhorizon formation, about the Calcisols. The land peasant classification possess a restrict scope, narrow relation between the nominate of her land class and the concept, where the attempt for find relationship with the Mayan nomenclature, detect the difficulty to relate a land class with the soil unit, where the vegetation influence their fertility. The Mayas was dedicate to intensive cultivation by three kind of habitat (mountainous, marshy and coastal environment), designate the great existence of "albarradas" and terrace at Campeche and Quintana Roo; perform against the flood through the high fields and build irrigate and drainage channels, recognize the importance of the diverse use of the resource. Concern to the fish, the Mayas obtain around of 300 kind and the salt trade, know the beneficial from manage of excrement, wastewater, mulching, and vegetation and classify the land, reflect from the space with high heterogeneity.

INTRODUCCIÓN

Como parte del conocimiento necesario para entender la complejidad de los sistemas naturales, se hace necesario caracterizar individualmente los componentes que la constituyen. A continuación se caracterizan los atributos geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, edáficos, y de manejo de los recursos del suelo, agua, mar, monte, así como el conocimiento ancestral indígena de los atributos inherentes a cada uno de los componentes y procesos ambientales.

Destaca como punto de partida, el hecho que la Península de Yucatán, (PY), no es una planicie homogénea sobre la cual las interrelaciones de los procesos geomorfológicos, climáticos, edáficos y de sucesión vegetal, han encontrado un sitio inmutable. Por el contrario, a escalas grandes y niveles locales, existe una amplia diversidad de relieve y ecosistemas, encontrándose variaciones horizontales en espacios muy cortos. Esta aparente contradicción propicia inconsistencias al momento de tomar decisiones sobre el aprovechamiento de los recursos naturales.

Dentro de este contexto, es importante afirmar que prácticamente se desarrollan todas las actividades primarias en la PY: la agricultura de riego y temporal, el aprovechamiento forestal, el aprovechamiento de recursos marinos, pesca y sal, el manejo de recursos silvestres tanto vegetales como animales y la conservación dentro de diversas y numerosas Áreas Naturales Protegidas. Todas estas actividades se mantienen vinculadas en mayor o menor grado a la cosmovisión cultural y el legado social del mundo maya.

Bajo esta perspectiva, es necesario desglosar los componentes ambientales, plantear interrogantes acerca de su origen y evolución, y pasar al plano o nivel de la integración sistémica, donde se puedan establecer las correlaciones entre lo natural, considerando los factores bióticos y abióticos, y lo social, lo que demanda conocimiento formal y detallado que asegure la satisfacción presente y futura de las necesidades humanas básicas.



ORIGEN DE LAS GEOFORMAS

Durante el Cretácico la PY estuvo cubierta por mares someros sobre los que se acumularon importantes espesores de carbonatos y evaporitas, que a su vez dieron origen a calizas, dolomitas y yesos. Posteriormente a partir del Eoceno, se originaron una serie de eventos geológicos que determinaron la geomorfología actual y por lo tanto el ambiente físico-geográfico de la PY.

En el Eoceno (ca. 52 a 36 millones de años) un proceso orogénico en el sur de la PY plegó los recién formados estratos de calizas y produjo un relieve ondulado. A finales del Oligoceno, este relieve fue sometido a una fuerte erosión en los materiales dolomíticos del cretácico.

Durante el Mioceno y el Plioceno se originan dos sistemas de fracturas: uno con orientación NE-SW, cuyas expresiones se observan a lo largo del cauce del Río Hondo; y otro con orientación NW-SE, a lo largo de la "Sierrita de Ticul". Durante el Mioceno Medio, la PY experimentó un hundimiento que favoreció la posterior precipitación de carbonato de calcio durante el Plioceno, conformando su porción septentrional.

La zona Costera de la PY presentó los mayores cambios durante el Pleistoceno, debido a la inestabilidad climática ocasionada por las glaciaciones y los periodos interglaciares. Se han encontrado tres eventos geológicos que determinaron la configuración actual:

La estabilización de la línea de costa del Pleistoceno durante el período interglaciario Sangamon en 5 y 8 m sobre el nivel actual del mar, hace aproximadamente 80,000 años. El norte de la Ciudad de Mérida estuvo inundada por un mar somero; se formaron las ondulaciones de playa a lo largo de la línea de costa que se asocian con los actuales humedales costeros.

Descenso de 130 m el nivel del mar durante la glaciación del Wisconsin, hace 18,000 años aproximadamente, cuando la plataforma marina fue expuesta a procesos terrestres y atmosféricos y sujeta a la erosión de valles y cuencas, así como la sedimentación en planicies y deltas; estableciendo el estado geológico para el desarrollo de modernas lagunas costeras, durante la trasgresión del Holoceno.

Durante la trasgresión del Holoceno, alrededor de 8000 años atrás, el nivel del mar disminuye llegando a un nivel de 3 a 4 m por debajo del nivel actual; comenzando el depósito de sedimentos carbonatados del Cuaternario en las áreas costeras actuales.

Tales eventos generaron procesos endógenos y exógenos sobre la superficie terrestre. La actividad endógena es la creadora de las deformaciones de la superficie terrestre, y su estudio es fundamental para conocer la disposición estructural del relieve y distribución litológica; y los procesos exógenos ni-

velan el relieve mediante la erosión de las elevaciones y acumulación o relleno de sedimentos en las depresiones. Los procesos y sus modalidades de degradación, denudación, remoción, corrosión y sedimentación de la superficie terrestre se llevan a cabo bajo condiciones ambientales determinadas primordialmente por el clima.

El relieve y el clima conducen a determinados sistemas de denudación-erosión-acumulación-corrosión, con el dominio de alguno de ellos, quedando como procesos secundarios los restantes. Dichos mecanismos modelan conjuntos estructurados espacialmente, además de estar vinculados con familias de formas afines por su origen.

El resultado de la intensidad de los procesos formadores del relieve actual se discute más adelante.

El modelo de evolución cárstica propuesto por Grund (1914) y Cvijic (1918) se ha mantenido prácticamente sin modificaciones desde sus primeras versiones hasta la fecha. Plantean cuatro etapas de evolución lineal para ambientes húmedos (templados y tropicales), con espesores importantes de rocas carbonatadas y bajo un solo periodo continuo de levantamiento tectónico. Aunque en sentido estricto las etapas son lineales y no tienen un nombre, para este trabajo se les ha denominado: reciente, juventud, madurez y tardía de relictos. Posteriormente Lehmann (1954) y Pannekoek (1948) realizaron estudios específicos sobre el karst tropical caracterizándolo como típico de colinas cónicas, pero igual dentro de un patrón de cuatro etapas evolutivas (Fig.1) que guardan algunas similitudes con el karst de la Península de Yucatán.

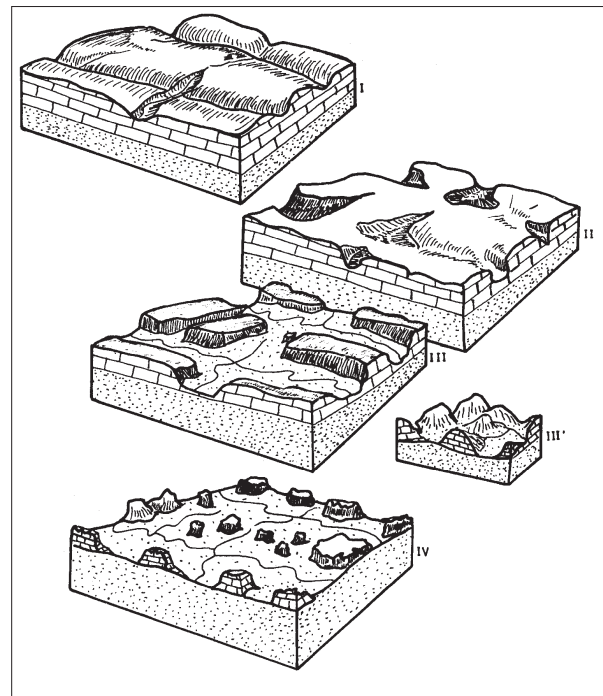


Figura 1. Evolución del Karst tropical.

Para la PY la evolución cárstica presenta variantes derivadas de las condiciones propias de su evolución geológica, tectónica y ambiental. Los factores físico-geográficos más importantes a considerar, de carácter endógeno y exógeno, son: la morfoestructura, pulsos y estilos tectónicos antiguos y recientes, tiempos geológicos de disolución (condiciones climáticas) y solubilidad de la roca, densidad y distribución de estructuras superficiales susceptibles a la disolución (fisuras, fracturas, fallas y diaclasas) y rugosidad como indicador morfológico de los grados de evolución.

Debido a que la mayor parte de la PY se encuentra cubierta por selvas tropicales primarias y secundarias, y no se dispone de evidencias visibles de karst desnudo, el indicador más significativo para diferenciar los estadios evolutivos del karst, es el patrón morfológico de geoformas exocársticas, que sintetiza las condiciones que favorecen o inhiben el desarrollo del karst.

El karst en la PY se desarrolla sobre estructuras tectónicas tabulares o mesiformes, de estratos monoclinales dispuestos en forma horizontal o subhorizontal. Se caracteriza por formas de absorción circulares, cavidades de desarrollo vertical, circulación vertical y horizontal y surgencias periféricas. La circulación es esencialmente vertical, descendente y de alimentación autóctona. La morfoestructura tabular o estructura congénita de la Península ha sido modificada por basculamientos diferenciales en dos grandes bloques estrechamente ligados

a la estructura geológica profunda (López-Ramos, 1975), uno de ellos al sur que inició su levantamiento en el Mioceno y otro al norte iniciando su levantamiento en el Plioceno y continuando hasta el Cuaternario. La influencia de la actividad neotectónica que ha provocado el levantamiento en forma basculada de mayor intensidad en el sur, origina sistemas de fracturas orientados al norte y noreste (Lugo *et al*, 1992). De esta manera en el bloque sur se origina el karst paleogénico (Gerstenhauer, 1969), donde se encuentran las etapas más avanzadas de la evolución cárstica y en el norte el más reciente o neogénico de planicies denudativas con densidades variables de depresiones y dolinas (cenotes), correspondiendo a la etapa reciente y de juventud. Esta primera diferencia estructural marca líneas evolutivas disímiles con respecto al desarrollo que mostrarían estructuras complejas plegadas y/o falladas, donde las secuencias evolutivas serían más difíciles de descubrir.

A partir de las diferencias en bloques se originan expresiones morfológicas exocársticas tipificadas según las secuencias evolutivas predeterminadas e interfases de transición derivadas, se identificaron siete grados o niveles de evolución cárstica: reciente, reciente-juventud, juventud, juventud-madurez, madurez, madurez-tardía de relictos y tardía de relictos (Fig. 2).

A medida que el proceso cárstico avanza, se incrementa la cantidad de geoformas y depósitos residuales producto de la disolución de las calizas.

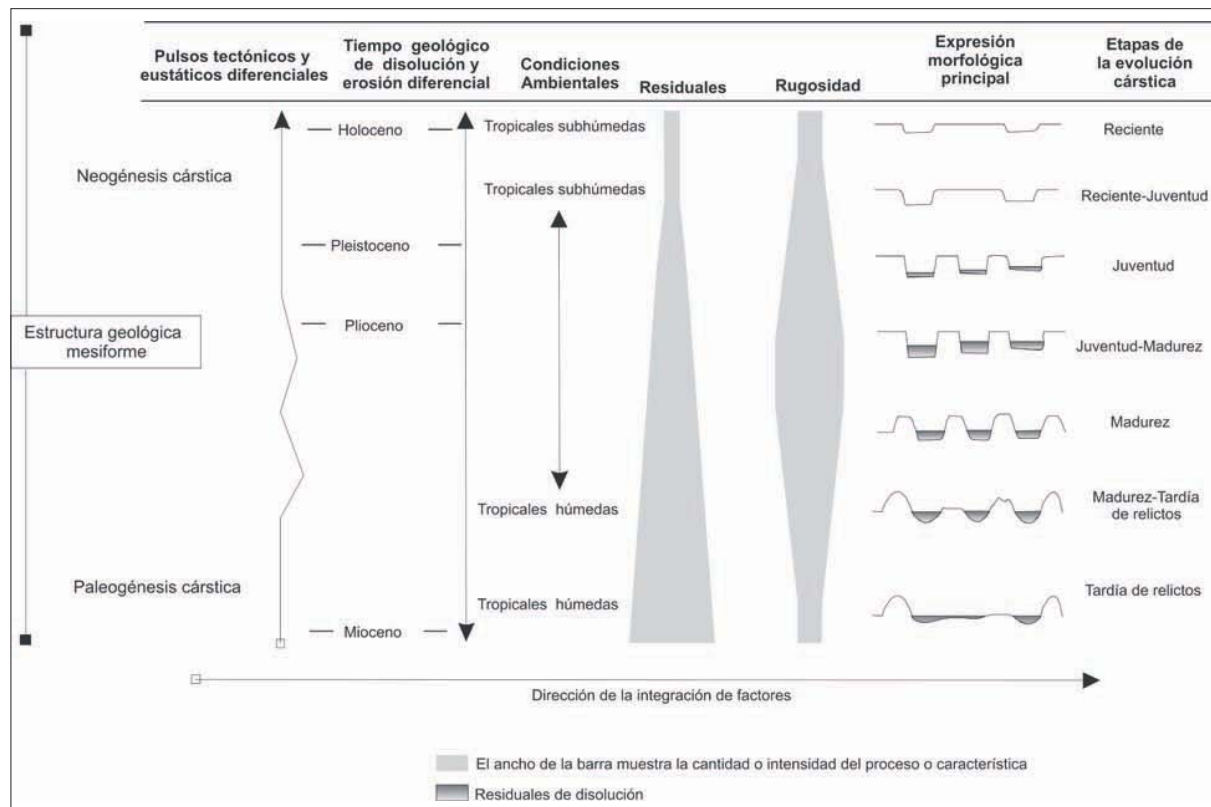


Figura 2. Diagrama representativo de la evolución cárstica (Elaborado por Palacio, 2003).



Las planicies denudativas se transforman gradualmente en planicies acumulativas confinadas hasta convertirse en planicies residuales extendidas (Fig. 2). Al mismo tiempo las geoformas positivas con respecto a los niveles de base locales, aparecen entre la juventud y la madurez como altillos y lomeríos bajos con cimas de pendiente plana y horizontal, resultado de la erosión diferencial sobre planicies estructurales de exposición reciente a la carstificación. Al aumentar los tiempos de disolución, y por tanto los materiales residuales de *terra rossa*, los bordes de las cimas planas tienden a redondearse hasta formar colinas cónicas en altas densidades (etapa de madurez) que posteriormente, en la etapa tardía de relictos, tienden a reducir su altura, convirtiéndose en colinas residuales y montículos. Las dolinas con acumulación incipiente de residuales que inician su formación durante la etapa reciente en el Cuaternario, se unen gradualmente en algunas zonas durante la madurez, hasta formar uvalas y posteriormente poljes (depressiones alargadas) en la etapa tardía de relictos. Los controles estructurales asociados a la margen activa del centro de Quintana Roo, son especialmente favorables para la formación de uvalas.

En el diagrama de evolución cárstica se señalan las condiciones ambientales tropicales subhúmedas y húmedas (lluvias en verano) relacionadas con los grados de evolución, sin embargo, es necesario acotar que su vinculación genética a los tipos de paisaje cárstico no es muy clara y que se indica para caracterizar el entorno natural más que para explicar su correlación intrínseca con el estadio evolutivo. Corbel (1959) encontró, como promedios de denudación cárstica en la PY entre 10 y 40 $\text{m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ (12 para Mérida y 10 para Champotón) y como ejemplo extremo contrario para zonas frías con lluvias todo el año, valores entre 240 y 275 $\text{m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ en Francia y Noruega. Estos números muestran que la disolución está asociada a la temperatura ambiente, la disponibilidad de agua y a la agresividad de la misma en términos químicos para disolver los carbonatos. Sin embargo, se puede encontrar también correlación directa entre el arreglo disyuntivo y el conjunto de factores ambientales, no solo con el clima. Lo que sí es evidente es que en los países tropicales los procesos de disolución se caracterizan por ejercerse más violentamente en superficie, que en profundidad, predominando por tanto la disolución superficial sobre la subterránea (Corbel, 1957). Esto se debe a que en los países tropicales la saturación de las aguas en CaCO_3 , se ejerce en unas pocas horas, sobre todo en lo que concierne a la última fase del proceso de disolución, mientras que en los países templados, la saturación se adquiere en más de 50 horas (Mateo, 1981). Igualmente las lluvias torrenciales y sus efectos erosivos tienen que ver con la intensificación localizada de la disolución. Jennings (1971) señala que una de las peculiaridades del karst tropical es la verticalidad y horizontalidad del relieve, con la minimización de pendientes intermedias. Es conocido el predominio de formas convexas, a menudo con paredes verticales y cimas cónicas y redondas y de superficies con fondo más o menos llano (mogotes).

Por otra parte la rugosidad del terreno es un auxiliar tanto cualitativo como morfométrico que permite discriminar estilos de paisaje cárstico. Day (1977) propone un índice para diferenciar entre paisaje rugoso o suave. Si el terreno es suave el índice tiende a infinito y entre más rugoso es, más se acerca a uno. En este sentido el paisaje en su etapa inicial (reciente) es suave y a medida que evoluciona se incrementa la rugosidad alcanzando su máximo o clímax en la madurez y disminuyendo posteriormente hacia la etapa tardía de relictos. La rugosidad se explica a través de la fuerza o energía vectorial y su dispersión. Los vectores se obtienen de la perpendicular sobre las superficies o facetas planares delimitadas a partir de líneas divisorias epicársticas y rupturas de pendiente (Fig. 3). La dispersión se establece en función del número de vectores y su orientación preferente sobre un rango de 180° . Entre mayor sea la cobertura angular mayor será la dispersión. La energía estará determinada por su distancia angular a la perpendicular o la dispersión dominante.

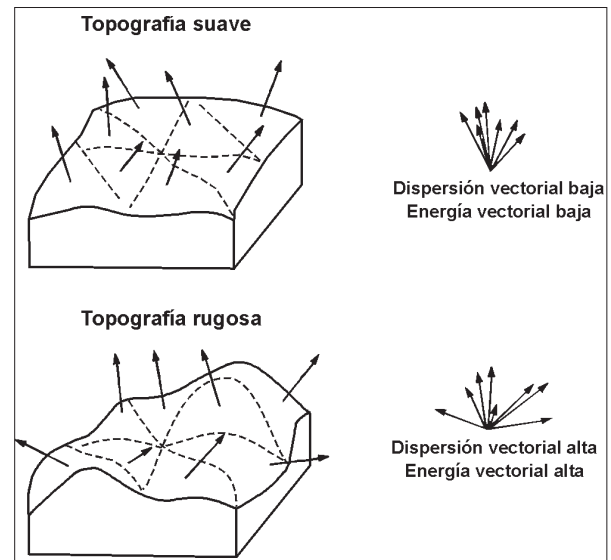


Figura 3. Rugosidad de los terrenos cársticos

Los factores que favorecen el desarrollo del karst en la PY actúan en conjunto, pero con arreglos específicos en intensidades e importancia dependiendo del paisaje geomorfológico, de hecho los arreglos específicos definen la identidad geomorfológica de cada paisaje.

ORIGEN DE LOS ACUÍFEROS

Los acuíferos de mayor volumen se desarrollan en las rocas carbonatadas del Eoceno y Mioceno-Plioceno (Formación Carrillo Puerto). Los sedimentos del Eoceno se componen principalmente de granos calcáreos recristalizados de finos a medios. La parte más antigua del Cenozoico contiene arcillas y margas, las cuales se insertan lateralmente entre

rocas dolomíticas, margas, yeso y anhidritas. Muchas litofacies tienen gran permeabilidad, que se presenta preferentemente en los carbonatos del Mioceno.

La estructura, topografía y presencia o ausencia de las formaciones geológicas juegan un papel importante en el desarrollo de las condiciones geohidrológicas en esta región cárstica. Estos elementos, en conjunto con los factores climáticos y tipos de vegetación, controlan la permeabilidad y formación de suelo, que influye en la ocurrencia y flujo hidráulico (Back y Hanshaw, 1982). La presencia de un suelo muy poroso y delgado en la PY se debe a la disolución de las calizas y carencia de una formación geológica que produzca arena o arcilla, que sature y cierre los poros, disminuyendo la permeabilidad desarrollada. La ausencia de sedimentos superficiales determina la ausencia de ríos o drenajes superficiales.

La propuesta de la existencia de dos acuíferos regionales, está en función de la edad de las rocas que constituyen las dos unidades hidrogeológicas más importantes: Miocénico en las planicies carso-tectónicas y Eocénico en los lomeríos carso-tectónicos; caracterizadas con base a la evolución geoquímica del tipo de agua contenida, con base del principio propuesto por Back *et al.* (1979), a través del modelo esquemático que muestra las trayectorias de reacción del agua en un acuífero carbonatado costero.

Existe una diferenciación hidrogeológica e hidrogeoquímica de los acuíferos regionales: en el acuífero miocénico, prevalece el proceso geoquímico caracterizado por la mezcla de agua de reciente infiltración con agua salada más antigua, produciendo una amplia dispersión; en el acuífero eocénico, el proceso dominante es el incremento de sales por disolución a lo largo de la trayectoria de flujo. Existe un incremento repentino producido por la presencia de depósitos evaporíticos altamente solubles, asociado a un incremento de la relación Cl/HCO_3^- hacia el noroccidente del acuífero eocénico.

El acuífero miocénico presenta un incremento de salinidad hacia las costas en las porciones norte y noroccidental, indicando el efecto incipiente de la intrusión salina. Hacia las porciones de la PY, definidas como áreas de recarga miocénica y eocénica, se presentan valores mínimos o bajo saturados, coincidiendo con los valores de precipitación pluvial más alta. La alta permeabilidad de las rocas que constituyen el subsuelo de estas zonas y lo poco profundo del manto de agua, le asignan a la PY un índice de vulnerabilidad que va de alto a extremo, dado que las rocas dominadas por carbonatos y depósitos de yeso cuando se disuelven prácticamente no dejan residuos, pero impregnan sus características químicas al agua.

No hay cursos de agua superficiales, las lluvias saturan el terreno, colmatan el bajo relieve y se infiltran en el subsuelo dando origen a corrientes subterráneas en cavernosidades complejas. La disolución de las rocas puede desarrollarse en la super-

ficie del terreno y afectar a los materiales calcáreos en contacto con la atmósfera, o bien, actuar sobre los mantos calizos subsuperficiales. En el estrato rocoso superficial o coraza calcárea, el fenómeno cárstico se expresa en forma de depresiones y salientes de superficies rugosas, cavidades y conductos tubulares que en ocasiones traspasan los fragmentos rocosos. El agua pluvial infiltrada, aunado al escaso relieve y el alto grado de fracturación de la roca superficial, actúa de manera constante sobre las rocas carbonatadas subsuperficiales, relativamente más blandas que las exteriores, formando una compleja trama de cavidades subterráneas como grutas, cavernas, sumideros, cenotes con o sin comunicación con el exterior (Duch, 1988).

La PY carece de corrientes superficiales, particularmente en la porción norte; hacia el sur, sólo se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficial o aguadas, destacando el Río Hondo y el Río Sorpresas, de carácter intermitente. Así, gran parte de la precipitación pluvial se evapora y transpira, el resto se infiltra al manto subterráneo a través de fracturas, oquedades y conductos cársticos de las calizas. Una vez que se integra al acuífero, el agua sigue diferentes trayectorias de flujo, controladas por el desarrollo o evolución del karst profundo. Evidentemente las regiones de mayor carsticidad se presentan en el sur de la PY, donde se encuentran los sedimentos más antiguos del Paleoceno-Eoceno (Batllori, 1995). Para delinear el sistema de flujo de los acuíferos identificados es necesario establecer las áreas de recarga y descarga. En la porción costera, la descarga del agua se realiza a través de manantiales y en forma difusa hacia el mar, alimentando ciénagas y lagunas costeras. La recarga hidrológica subterránea ocurre de manera uniforme generalizada en toda el área, acorde al patrón de distribución de la precipitación pluvial.

ORIGEN DE LOS SUELOS

El origen de muchos suelos de la PY está en discusión: Wright (1970) sugiere que el verdadero material que dio origen a muchos suelos no es la coraza calcárea, sino un depósito superficial presente sobre la roca en el momento del levantamiento. Considera la probabilidad de que los suelos profundos que reposan sobre la roca calcárea corresponden a un antiguo ciclo de formación de suelos, mientras que los formados a partir de la coraza resquebrajada y erosionada corresponden a uno nuevo. Menciona que la naturaleza del depósito podría ser un sedimento impuro, rico en carbonatos (fango calcáreo submarino); o polvo meteórico, o cenizas volcánicas depositadas sobre la superficie ya emergida; o bien, una mezcla de sedimentos abisales y otros materiales finos derivados de erupciones volcánicas submarinas, depositados súbitamente sobre el bloque peninsular ya emergido, a consecuencia de enormes marejadas producidas



por algún movimiento tectónico de primer orden en la región Caribe-Antillana (Duch 1988).

Otros autores plantean que los suelos rojos y profundos derivan de un fango marino con impurezas de cenizas volcánicas y que su textura predominantemente arcillosa, sugiere un origen palustre, posiblemente de áreas costeras someras, en las cuales los sedimentos marinos saturados con cenizas volcánicas o polvo meteórico fueron atrapados cuando la plataforma marina de la PY quedó descubierta, debido al descenso de 130 m, en relación al nivel del mar, hace 18,000 años.

Estudios recientes realizados en el centro y sur de Yucatán, donde se ha cavado una gran cantidad de calicatas, han revelado evidencias de un desarrollo de los suelos a partir de la disolución de la roca caliza y, consecuentemente, la formación de un horizonte petrocálcico en la parte baja del perfil.

La morfología de los perfiles sugiere la existencia de un proceso de disolución, donde la intensidad de disolución y el transporte de los carbonatos dependen del tipo de roca y su pureza.

Por ejemplo, la formación de los Luvisoles comienza con una disolución intensa de la roca y la acumulación del carbonato de calcio en la parte

baja del perfil. En este estadio, el perfil muestra una gran cantidad de fragmentos de roca en una matriz de tierra fina de color café a rojo. A medida que avanza el desarrollo del perfil, los fragmentos aparecen desde la parte media y hasta el fondo; es un Cambisol cuando el perfil muestra una profundidad mayor de un metro y es posible que aún no se observe la acumulación de arcilla en el horizonte Bt. En los estadios más avanzados solo hay fragmentos de roca caliza en la parte baja del perfil. La evolución de Luvisoles, es evidente cuando se han disuelto los fragmentos de roca y se ha dado origen al horizonte Bt.

En suelos de menor profundidad los procesos arriba mencionados no se presentan con la misma intensidad debido a que la roca tiene menor solubilidad. Primero se forman suelos poco profundos o Leptosoles con escasa cantidad de tierra fina de coloraciones rojizas; después Cambisoles debido a la disolución gradual de la roca identificada por los canales de disolución. Posteriormente y debido a la mayor intensidad del proceso de disolución de la roca, se tiene una matriz de tierra fina con algunos fragmentos de roca, una profundidad no mayor a 60 cm y un horizonte petrocálcico en la parte baja del perfil, lo cual da origen a los Calcisoles que serán epipétricos o endopétricos dependiendo de la profundidad del horizonte petrocálcico.

EL MANEJO MAYA DE LAS GEOFORMAS, LOS SUELOS Y EL AGUA

MANEJO MAYA DE LAS GEOFORMAS

Los mayas prehispánicos se dedicaron al cultivo intensivo en tres tipos de hábitat: montañoso, pantanoso y costero, así lo prueban la presencia de ritos agrícolas y formas de manejo, cuyas consecuencias han llamado la atención de manera reiterada en los últimos tiempos.

Los mayas conocieron procedimientos para el cultivo de las tierras altas, como lo indica la gran superficie de albarradas y terrazas existentes en el sur de Campeche y Quintana Roo, en las inmediaciones de los montes mayas. Los muros de piedra son grandes, cruzan gran parte de los terrenos planos y delimitan las pequeñas parcelas de alrededor de una hectárea.

Las llanuras y depresiones inundables plantean a los antiguos mayas un conjunto de problemas de cultivo del todo diferentes a los que se presentaron en las tierras altas. Combatieron las inundaciones mediante la elevación de campos y construyeron canales de riego y drenaje, como en Belice, Quintana Roo y la zona de depresión fluvial oriental a lo largo del Río Candelaria.

La agricultura de micro hábitat y multitecnología que establecieron los antiguos mayas en las zonas

forestales sigue siendo una solución viable para el desarrollo agrícola actual. Los mayas reconocieron la importancia del uso diversificado de los recursos agrícolas y de flora y fauna silvestre, a los que también se incluyen los recursos marinos y litorales, aprovechándose de estos para su desarrollo socioeconómico. Se ha registrado el uso de más de 500 especies diferentes que constituían la base general de recursos naturales, en los cuales se basaba la producción y reproducción social del pueblo maya (Quezada, 2002).

MANEJO MAYA DE LOS AMBIENTES ACUÁTICOS Y MARINOS

Entre los instrumentos más utilizados para la captura de las especies marinas estaban los arpones, boyas, sogas y flechas, para lo cual usaban barcas bien delineadas que podían transportar hasta 50 hombres. Se menciona también el uso de redes y chinchorros. A través de la etnografía actual, se compara y observa que en la navegación yucateca aun se siguen utilizando implementos de pesca como los que mencionan los cronistas del siglo XVI, no solo para el área maya sino para toda mesoamérica (Quezada, 2002).}



Los mayas tenían conocimiento del espacio donde se encontraban los peces, tanto en el mar como en ríos, cenotes y pantanos, y de la utilización de los recursos obtenidos del mismo entorno. También se registra el uso de trampas, tanto para la cacería como para la pesca. Otra técnica era la de observar los cardúmenes cercanos a la costa (como de jureles), se formaba una especie de cercos alrededor de ellos y ahí se atrapaban. Técnicas que se siguen utilizando actualmente.

Los mayas llevaron a cabo la actividad pesquera en tres formas diferentes: la pesca marítima-litoral, la pesca de profundidad y la pesca fluvial o de cenotes. En estos tres ecosistemas obtenían no menos de 300 especies. El comercio del producto de la pesca era bien conocido por los mayas, aplicando la técnica de conservación del pescado, ya sea seco salado o asado al sol.

La importancia cada vez mayor del comercio de la sal durante los periodos prehispánicos y colonial para los importadores, exportadores y todos aquellos que transportaban los bienes impulsó el surgimiento de comunidades especializadas en esta actividad.

MANEJO MAYA DEL SUELO

Los mayas de la PY, conocieron los beneficios del manejo de los abonos animales, aguas negras, cultivos de cobertera y mantillos y el manejo de la selva. Muchas de las prácticas agrícolas de los mayas han sido reportadas por Hernández (1985), Hernández *et al* (1995) y Teran y Rasmussen (1994). De la misma manera, los campesinos mayas desarrollaron una nomenclatura de las tierras, como reflejo de la heterogeneidad espacial a niveles locales.

En el medio rural, los productores realizan observaciones y comparaciones del funcionamiento de la *tierra* en procesos de corto y mediano plazo, en relación con el ambiente y los organismos, ya sean plantas y/o animales.

Las clasificaciones campesinas, como la maya, son de gran utilidad en la identificación de los manchones de suelos y el funcionamiento agronómico (las propiedades del suelo de alta tasa de cambio y respuesta de los cultivos a determinadas clases de tierras) y ecológico del suelo (distribución y abundancia de organismos de acuerdo con las clases de tierra), así como en la elaboración de mapas parcelarios de bajo costo para la administración de actividades agropecuarias. Estas propiedades del suelo no son medidas ni estimadas durante la descripción del perfil ni en los levantamientos técnicos de suelo.

Por el contrario, las clasificaciones campesinas de tierras tienen un alcance restringido al interior de sus mismas localidades, es decir, para los campesinos existe una relación estrecha entre el nombre de la clase de tierra y el concepto, que puede variar en ambos sentidos en otras localidades, es

decir, mismo nombre diferente concepto o igual concepto pero con diferente nombre. La confusión se presenta cuando un mismo nombre de la clase de tierra se utiliza en otra zona.

Los intentos por encontrar relaciones entre la nomenclatura FAO y Maya han detectado la dificultad de relacionar directamente una clase de tierra con la unidad de suelo, por ejemplo, Duch (1988) encontró que la denominación *Kan kab* puede aplicarse a los grupos Cambisol, Nitosol, Luvisol, Vertisol y Lixisol. Tal vez debido a que se desea generalizar, sin embargo, debe tenerse en cuenta el alcance local de esta clasificación de tierras y las diferentes concepciones de tierra y suelo.

Los reportes escritos sobre la nomenclatura maya de tierras, apoyados con descripciones técnicas de suelos, son escasos (Pérez, 1984; Duch 1988; Dunning, 1992; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2000) lo cual dificulta el entendimiento y manejo técnico de la nomenclatura maya. La utilización de los mismos términos para diferentes clases de tierra en diferentes regiones y su aparentemente compleja estructura de la nomenclatura y/o clasificación, hacen que tenga escasa repercusión en las políticas de uso de suelo, así como en la incorporación exitosa de tecnología (fertilizantes, herbicidas, riego, uso de mantillos, cultivos de cobertera, aplicación de abonos, etc.).

Para el norte de la PY se ha generado la mayor información. A continuación se describen las clases de tierra más comunes y sus limitaciones agrícolas.

CLASES DE TIERRA CAMPESINA EN LA ZONA EXHENEQUENERA

La clase de tierra denominada *Chaltún* presenta rocosidad tipo laja, puede ser de color rojo, negro o café rojizo, el rasgo distintivo es la laja y también se caracteriza por ser la clase de tierra con menos suelo o tierra fina, con un diámetro menor de 2 mm. El contenido de óxidos y minerales secundarios varía mucho y se encuentran relacionados con el color de la tierra fina, siendo orgánico si el suelo es negro y mineral si es de color rojo. En la zona henequenera se le nombra *Tzekel*; de acuerdo a la Taxonomía FAO (1999) equivale a un Leptosol lítico (LPl), aún cuando es negro y presenta altos contenidos de materia orgánica. Por su escasa cantidad de tierra fina y por la ausencia de carbonatos no califica para ser clasificado como Leptosol rendzínico (LPrz).

Entre la zona *Puuc* (occidente del Estado de Yucatán) el *Tzekel* es una clase de tierra con predominancia de roca de las partes altas del microrrelieve, pero con la particularidad de que la roca no es tipo laja, sino como promontorio, esta clase de tierra presenta muy poco suelo, pero más que el *Chaltún*. La tierra fina es de color negro principalmente.



Estas características permiten clasificarlo como LPlí.

En el occidente del Estado de Yucatán, el *Chac lu'um* se caracteriza por ser un suelo rocoso (tipo laja) de color rojo, con mayor cantidad de suelo que el *Chaltún*, localizado en el piedemonte o en las partes bajas de las pequeñas elevaciones microtopográficas. El poco suelo llega a compactarse en las partes bajas (5 a 15 cm de profundidad), es pobre en la mayoría de nutrimentos y retiene menor humedad que el *Box lu'um*. En la zona henequenera, esta clase de tierra se denomina *Hay lu'um*, que significa poco suelo o tierra delgada. Según la Taxonomía de la base referencial mundial del recurso suelo (WRB) (FAO, 2001), puede corresponder a las unidades LPlí o CM, dependiendo de la profundidad.

El *Chac lu'um* es una clase de tierra de las que presentan mayores cantidades relativas de minerales secundarios, pero menos de 2% de carbonato de calcio, así como con contenidos de materia orgánica menores en comparación con los otros suelos de la zona ya que todos los suelos de la región presentan cantidades de materia orgánica mayores a 3%. Esta clase de tierra presenta los menores contenidos de fósforo total (0.32%). Puede ser corresponder a un LPlí, pero también a un Leptosol crómico (LPcr) y/o dístico, según la WRB. Se puede confundir con un *Kan kab* debido a su color rojo y por su localización en las partes bajas del microrrelieve, pero en áreas muy reducidas y, sin embargo, no deja de ser suelo somero.

El *Pus lu'um* también es un suelo rocoso de color negro, limitado en profundidad, hasta 30 cm por la presencia de laja, pero con una cantidad considerable de materia orgánica y carbonatos de calcio en la tierra fina. Posiblemente sea equivalente a un LPrz.

La diferencia con el *Chaltún* consiste en la cantidad de suelo, ya que el *Pus lu'um* contienen mayores cantidades de tierra fina.

El *Box lu'um* se caracteriza por encontrarse en las partes altas del microrrelieve, presentando piedras de un diámetro entre 5 y 10 cm de diámetro, lo cual hace que esta clase de tierra presente una mayor retención de humedad, en comparación con el *Chac lu'um*. Es de color negro y presenta cantidades de carbonatos superiores al 30%.

El *Box lu'um*, puede corresponder a dos subunidades, dependiendo de la cantidad de piedras. Cuando presenta abundantes piedras a lo largo del perfil será un Leptosol hiperesquelético (LPhsk), pero si la cantidad de suelo fuera mayor y sólo las piedras están en la superficie, entonces se clasificará como LPrz por el contenido de materia orgánica (< 10%) y de carbonatos de calcio.

El *Box lu'um* y el *Pus lu'um* son suelos que presentan la mejor calidad química a nivel de tierra fina de todos los Leptosoles, reflejada en los altos contenidos de materia orgánica, fósforo asimilable de 20 a 50 mg kg⁻¹, nitratos de 40 a 60 mg kg⁻¹, así como las mayores cantidades de micronutrimentos en comparación con el *Chac lu'um*. Según Pool (1995) en estas clases de tierra (*Box lu'um* y *Pus lu'um*) la fertilización química del suelo no es tan funcional, al ser comparados con el *Kan kab*, aunado a la dificultad para la aplicación de abonos.

El contenido total del P₂O₅ alcanza niveles muy altos (2.27%); también presentan el mayor contenido de fósforo asimilable, por ello, se deduce que en estos suelos el P no constituye una restricción importante del crecimiento vegetal.

Tabla 1. Contenido total de óxidos en suelos determinados por fluorescencia de rayos X en muestras de suelo superficial (0 a 5 cm) (Bautista *et al*, 2003).

Elementos	Chac lu'um Rojo	Chac lu'um Café-rojizo	Box lu'um	Chaltún
SiO ₂	32.7	28.8	28.8	25
TiO ₂ (%)	1.8	1.5	1.3	1.1
Al ₂ O ₃ (%)	27	22	20	14
Fe ₂ O ₃ total (%)	12	10	10	9.7
MnO (%)	0.16	0.29	0.10	0.14
MgO (%)	1.53	1.63	1.51	1.30
CaO (%)	3.8	8.1	12.2	12.7
Na ₂ O (%)	0.52	0.53	0.55	0.55
K ₂ O (%)	1.614	1.874	1.254	1.184
P ₂ O ₅ (%)	0.32	0.64	2.27	2.55
PXC (%)	20.3	26.5	23.1	30.3
PXC= Pérdida por calcinación				



Tabla 2. Cantidades relativas de los minerales secundarios presentes en los suelos someros de la zona Henequenera (Bautista *et al*, 2003).

Mineral (Posición angular de la familia de planos)	Chac lu'um Rojo	Chac lu'um Café-rojizo	Box lu'um Negro-calcita	Chaltún Negro-sin calcita
Halloysita (4.43)	562	382	315	420
Bohemita (6.10)	75	36	38	38
Cuarzo (3.33)	117	128	72	84
Hematita (2.67)	64	24	25	presencia
Calcita (3.03)	no detectado	102	182	no detectado
Illita (10.27)	presencia	presencia	no detectado	no detectado
halloysita $[Al_2(Si_4O_{10})(OH)_8 \cdot 4H_2O]$, bohemita $[AlOOH]$, cuarzo $[SiO_2]$, hematita $[Fe_2O_3]$, illita, calcita $[CaCO_3]$				

El *Box lu'um* es una clase de tierra con altos contenidos de calcio y fósforo totales, así como con cantidades menores de Al y Si, que se reflejan en las también escasas cantidades relativas de minerales secundarios (Tabla 1 y 2).

En la zona henequenera se encuentran suelos pedregosos, denominados *Cho chol*, presentan abundantes piedras de 5 cm de diámetro a lo largo del perfil y en la superficie y con menos tierra fina que el *Box lu'um*. No se cuenta con datos sobre las propiedades químicas que permitan realizar una caracterización más completa.

El *Chich lu'um* se caracteriza por ser un suelo con grava, puede ser de varios colores café-rojizo a negro. Se encuentra predominantemente en las partes altas del microrrelieve y piedemonte. Retiene mucha agua, siendo por ello de buena calidad; puede ser clasificado como LPrz cuando es negro y carbonatado, pero puede no cumplir con los niveles de carbonatos de calcio estipulados para el carácter rendzínico. Esta clase de tierra puede llegar a

confundirse con suelos profundos con grava del grupo CM, de los “pies de monte” localizados entre el *Box lu'um* y el *Kan kab*.

El *Kan kab* es la clase de tierra que se localiza en las planicies del meso y microrrelieve, en sitios conocidos como los valles ciegos de karst. Esta clase de tierra puede pertenecer a tres grupos de suelo, LV, CM y CL, dependiendo del desarrollo del perfil, es decir dependiente de la presencia del horizonte Bt, Bw y Ckm u horizonte petrocálcico, respectivamente. El *Kan kab* es la clase de tierra que presenta mayor cantidad de tierra fina, coloración de café-rojizo al amarillo, por lo cual puede clasificarse de crómico o ródico, según sea el caso. No se han encontrado evidencias lingüísticas de que los campesinos mayas identifiquen las diferencias entre los tres grupos de suelo, pero es posible que en cuestiones prácticas al momento de cultivar si noten estas diferencias.

La arcilla dominante en los suelos de la zona henequenera, es la halloysita que pertenece al grupo

Tabla 3. Restricciones al crecimiento de las plantas en las clases de tierra campesinas.

Clase de tierra	Principal factor limitativo del crecimiento de cultivos	Limitaciones
Chaltun	Roca, muy poco suelo	Profundidad efectiva
Tzekel	Roca, muy poco suelo pero un poco más que el Chaltún	Profundidad efectiva
Chaclu'um	Roca, poco suelo pero mayor que los anteriores. Puede ser químicamente fértil aunque no siempre lo es, depende de su posición en el microrrelieve	Profundidad efectiva
Pus lu'um	Roca, un poco más cantidad de suelo que los anteriores, químicamente fértil, áreas pequeñas. Posible fijación/coprecipitación mineral de fósforo por la cantidad de calcio y carbonatos que presenta.	Profundidad efectiva y bajo volumen del espacio radicular
Box lu'um	Piedras, menor o igual cantidad de suelo que el Pus lu'um, químicamente fértil. Posible fijación y/o coprecipitación mineral de fósforo por la cantidad de calcio y carbonatos que presenta.	Profundidad efectiva
Chich lu'um	Variable calidad química, áreas pequeñas	Profundidad efectiva
Chochol	Muchas piedras y poco suelo, menor que Box lu'um, Pus lu'um y Chich lu'um.	Profundidad efectiva y bajo volumen radicular



de las arcillas con una relación 1:1 entre las capas de tetraedros de silicio y las de octaedros de aluminio. Estas mismas arcillas son las encontradas por Dunning (1992) en los suelos de la zona Norte de Yucatán. Estas arcillas se caracterizan por presentar una capacidad de intercambio de cationes baja, además de ser de baja plasticidad y bajo poder cementante.

La escasa cantidad de suelo y tipo de arcilla dominante, ocasionan que la influencia de la vegetación en estos ecosistemas ocupe un nivel primordial en su funcionamiento y fertilidad, al ser la fuente de nutrimentos y materia orgánica fundamental para la formación de estructura.

DISCUSIÓN

La integración de las características ambientales de la PY requiere entrelazar las bases fundamentales del conocimiento de las geoformas, distribuidas dentro de este espacio geográfico. Cabe destacar la predominancia de los procesos kársticos, delimitados por los procesos litorales que ocurren en la costa. La PY presenta rasgos kársticos totalmente distintivos a los conocidos actualmente, dado que ni coinciden con el modelo propuesto por Grund (1914) y Cvijic (1918) ni con el modelo del karst tropical propuesto por Pannekoek (1948) y Lehmann (1954). Existen coincidencias parciales en su modelación estructural, pero no en los estadios temporales, es decir, en su grado de evolución. Bajo esta visión, resalta la necesidad de diseñar el modelo de evolución del karst de la Península de Yucatán, dado sus atributos especialmente diferentes, donde se conjugan la expresión de los paisajes kársticos y su nivel de desarrollo específico.

Particular mención, debe hacerse al sistema de hidrología subterránea que gobierna prácticamente en toda la península, donde la red entramada y compleja de corrientes subterráneas, se desconocen, requiriendo una atención especial, dada las posibles condiciones críticas derivadas de las actividades humanas en centros de población de alta densidad, como es la Ciudad de Mérida y zona periférica, Chetumal, Cancún y Campeche, donde la demanda de agua potable y la disposición final de aguas residuales urbanas y agropecuarias, son dos focos de atención palpables de la existencia de una problemática en aumento, escasamente atendida, y poco comprendida.

Ahora bien la edafogénesis, sintetizada por los factores formadores y la alta heterogeneidad del

paisaje peninsular, ha originado una alta diversidad edáfica, a tal grado que los cambios de unidades de suelo, pueden ser encontradas a distancias cortas de unos cuantos metros. Predominan los suelos delgados y pedregosos, que sin embargo, permiten el desarrollo de una producción agrícola en comunión con el profundo conocimiento maya. Esta estrategia permite alimentar a más de un millón de campesinos, aunado a la disponibilidad de otros recursos, como, el forraje, madera, plantas medicinales, frutos y fauna silvestre, la pesca y la sal.

El conocimiento maya sirve de base para descubrir la intrínseca relación cultura-hombre-suelo, donde la clasificación tradicional maya expresa, entre otros atributos, la pedregosidad, profundidad, retención de humedad y color, estableciendo un camino más allanado para el conocimiento de las clasificaciones actuales, como la WRBRS, recientemente diseñada por la FAO e ISIS.

A manera de conclusión, se puede establecer que el conocimiento de la geomorfología, hidrología, edafología y manejo tradicional de los recursos, se encuentra en una etapa incipiente, que obliga a recapitular el enorme bagaje de conocimiento generado hasta ahora y colocarlo en la mesa de la revisión y del análisis, para de esa manera, junto con el conocimiento técnico actual, acercarse al diseño y desarrollo de agroecosistemas adecuados a las condiciones del medio físico y del estado de los recursos naturales de la Península de Yucatán.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (R31624-B). Se agradece a la Fundación Rockefeller el apoyo otorgado al primer autor para su instalación en la UADY. El segundo y tercer autores agradecen la beca de doctorado que les otorgó el CONACYT.



REFERENCIAS

- Back, W, B. Hanshaw, B. Pyle, T. Plummer and A. Weidie, 1979.** Geochemical significance of groundwater discharge and carbonate solution to the formation of Caleta Xel-ha, Q.Roo, Mexico. *Water Resources Research*, V. 15, No 6, p. 1521-1535.
- Back, W. y B. B. Hanshaw, 1982.** Geochemical significance of brackish-water springs in limestones of coastal regions. III semana de hidrogeología. Facultad de Ciencias de Lisboa-Portugal., 10-14 mayo.
- Batliori, E., 1995.** Hidrología de la región costera noroccidental del Estado de Yucatán. Facultad de Geografía, Universidad de la Habana. La Habana, República de Cuba.
- Bautista, F., H. Estrada-Medina, C. Delgado-Carranza y M. Sosa-Padilla, 2000.** Propuesta metodológica para el levantamiento de terrenos en zonas cársticas de la Península de Yucatán. *Jaina* 10(1): 7-9.
- Bautista, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro, A. Manu y R. Lozano, 2003.** Microrrelieve y color de suelos como propiedades distintivas. *Terra*, Aceptado.
- Corbel J., 1957.** Les karst du Nord-Ouest de l'Europe et de quelques régions de comparaison étude sur Le Role du climat dans l'érosion des calcaires, *Mem. de l'inst. des Etudes Rhodaniennes de l'Université de Lyon*, pp. 7-541.
- Corbel J., 1959.** Les karst du Yucatán et de la Floride, *Bull. Ass. Géogr. de France*, 282-(3):2-14.
- Cvijic, J., 1918.** Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst, *Rev. Trab. Inst. Geog. Alpine*, 6(4): 375-426.
- Day, M., 1977.** Surface roughness in tropical karst terrain, *Proc. 7 Int. Spel. Cong.* (Sheffield) pp.139-43.
- Duch, J., 1988.** La conformación territorial del estado de Yucatán. Los componentes del medio físico. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro Regional de la Península de Yucatán.
- Dunning, P. N., 1992.** Soils and vegetation, Chapter 3. Lords of the hills: ancient maya settlement in the Puuc region, Yucatán, México. *Monographs in world archeology* No 15. Prehistory press. EUA.
- FAO, 1999.** Base referencial mundial del recurso suelo WRB) Informes sobre recursos mundiales de suelos No. 84. Ed. FAO. Roma.
- FAO, 2001.** Lecture Notes on the Major Soils of the World: World Soil Resources Reports 94. Ed. FAO. Roma.
- Grund, A., 1914.** Der geographische Zyklus im Karst, *Ges, Erkunde* 52, p. 621-640.
- Gerstenhauer, Armin, 1969.** Ein Karstmorphologischer Vergleich Zwischen Florida und Yucatán, *Verhandlungen der Deutschen Geographentages*, 36, pp. 332-341.
- Hernández, E., 1985.** La agricultura en la Península de Yucatán. En: *Xolocotzia: Obras de Efraím Hernández Xolocotzi*. Tomo I. Revista de Geografía Agrícola, Universidad Autónoma de Chapingo. Edo. Méx. México.
- Hernández-X., E., S.L. Tacher y E.B. Baltazar, 1995.** La roza-tumba-quema en Yucatán. En: Hernández-X., E., E. Bello y S. Levy, La milpa en Yucatán: Un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 1. Colegio de Postgraduados, México.
- Jennings J. N., 1971.** *Karst, an Introduction to Systematic Geomorphology*, Volume Seven, The M.I.T. Press, Australia.
- Lehmann, H., 1954.** Der tropische kegelformige Karst und den Grossen Antillen, *Erkunde*, 8(2):130-139.
- López-Ramos, Ernesto, 1975.** Geological summary of the Yucatán Peninsula, in Nairn, A.E.M., y colaboradores, eds., *The Gulf of México and the Caribbean*: New York, Plenum Press, pp. 257-282.
- Lugo-Hubp José, J.F. Aceves-Quesada y R. Espinasa-Peña, 1992.** Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán, *Revista del Instituto de Geología*, Universidad Nacional Autónoma de México, 10(2):143-150.
- Mateo Rodríguez, J., 1981.** *Morfología Cárstica*, Facultad de Geografía, Universidad de la Habana, Cuba.
- Pannekoek, A. J., 1948.** Einige karsterreinen in Indonesien, *Tij. K. nederl. Aardrij Genootsch*, 65(2):209-214.
- Pérez P., J. M., 1984.** Caracterización y utilización de la clasificación maya de suelos en el municipio de Oxcutzab, Yuc. Tesis profesional. UACH, Chapingo, Méx.
- Pool P. y E. Hernández, 1995.** Bases de la experimentación agrícola bajo roza, tumba y quema: el caso de la milpa. En: Hernández E., E. Bello y S. Levy. La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 2. Colegio de Postgraduados.
- Quezada, D., 2002.** Entre la tierra y el mar: la sociedad maya. Ed. Dania Pérez, Fundación Fernando Ortiz, Colegio Yucatanense de Antropólogos, A. C. Mérida, Yucatán. 217. pág.
- Teran y Rasmussen, 1994.** La milpa de los mayas. Teran y Rasmussen-DANIDA. Yucatán, México.
- Wright, C. A., 1970.** El reconocimiento de los suelos de la Península de Yucatán. FAO. Informe técnico 1. Roma, Italia.



INTEGRACIÓN DEL CONOCIMIENTO ACTUAL SOBRE LOS PAISAJES GEOMORFOLÓGICOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

**Francisco Bautista¹, Eduardo Batllori-Sampedro²,
Gerardo Palacio-Aponte^{3,4}, Mario Ortiz-Pérez⁴ y Miguel Castillo-González^{1,5}**

¹*Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán*

²*Centro de Investigación y Estudios Avanzados*

³*Centro EPOMEX. Universidad Autónoma de Campeche*

⁴*Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México*

⁵*Facultad de Estudios Superiores, Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México*

RESUMEN

El presente trabajo destaca la importancia de la caracterización del medio físico de la Península de Yucatán, a través de su naturaleza cárstica, y teniendo en cuenta, al menos, la geomorfología, los acuíferos y los suelos. La comprensión sobre los aspectos geomorfológicos permite un mejor manejo de los recursos naturales y es la base de la regionalización a escalas pequeñas y medianas. El conocimiento del estado y dinámica de los acuíferos de zonas cársticas de la península es de interés por los procesos de disolución de las rocas carbonatadas; además, de constituir un recurso natural valioso para las actividades humanas regionales. La identificación de los suelos también debe considerarse en el mejoramiento de los sistemas de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, así como en la transferencia de tecnología agropecuaria y forestal. Con la finalidad de mostrar el grado de avance en el conocimiento del medio físico de la Península de Yucatán, como un aporte a la realización de programas de ordenamiento ecológico del territorio y el manejo de los recursos naturales, se desarrolla la descripción del medio físico, integrando la información disponible.

ABSTRACT

This paper highlights the importance of geomorphology, aquifers, and soils, to make a diagnosis of the karstic nature at the Yucatan Peninsula. The understanding of geomorphological aspects allows a better management of the natural resources. Thus, the geomorphology is the base of the regionalization at small and medium scales. The knowledge of the karstic aquifers' state and dynamics at the peninsula is important because of the processes of carbonated rocks' dissolution, and also for their value as natural resource to the regional human activities. The identification of soils also must be considered to the improvement of systems to sustainable use and management of the natural resources, as well

as in farming and forest's transference of technology. The description is developed with an integration of the information, and final reflections, with the purpose of showing the degree of advance in the knowledge of the physical environmental of the Yucatan Peninsula, as a contribution to the accomplishment of ecological planning programs of the territory and the management of the natural resources.

INTRODUCCIÓN

En el mejoramiento de los sistemas de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales el estudio del medio físico es de suma importancia. Así lo consideran los planes de ordenamiento ecológico del territorio, cuya primera fase consiste en diagnosticar la situación actual tanto del medio físico, como del biológico, social y económico.

Para realizar los inventarios del medio físico, existen diversos esquemas de regionalización que dependen del enfoque y disciplina de procedencia, algunos ejemplos son: levantamiento de tierras, levantamiento geomorfológico, enfoque morfopedológico, ecología del paisaje, levantamiento geopedológico, regionalización ecológica y sistema fisiográfico (Mendoza y Bocco, 1998). Dentro de estos el levantamiento geopedológico propuesto por Zinck (1988), que incluye las geoestructuras (1:1,000,000), ambiente morfogenético (1:500,000), paisaje geomorfológico (1:250,000), relieve/modelado (1:50,000), litología/facies (1:50,000) y formas de relieve (se representa a escalas mayores, p.e. 1:20,000) resulta un marco territorial adecuado para el diagnóstico del medio físico de la Península de Yucatán (PY). Sin embargo, se deben realizar ajustes en los niveles locales debido a las particularidades de la PY, como su geomorfología cárstica, la hidrología subterránea, los suelos residuales formados por la disolución de la caliza y el clima tropical.

En la PY, la regionalización puede hacerse a escala 1:250,000 considerando la geomorfología, hidrología y suelos. Es claro que en la regionalización debe tenerse en cuenta toda la información temática que esté disponible, como el clima y la vegetación; sin embargo, la utilidad de la geomorfología en estudios de regionalización en escalas pequeñas (1:250,000) está bien documentada (Bocco *et al.*, 1998; López-Blanco y Villers-Ruiz, 1998; Mendoza y Bocco, 1998; Boco *et al.*, 1999).

La comprensión sobre los aspectos geomorfológicos permitirá el mejor manejo de los recursos naturales, pues se obtiene información adecuada para: a) El análisis y predicción de riesgos naturales (movimientos en masa, hundimientos del terreno, inundaciones, etc.); b) La selección de los sitios apropiados, desde el punto de vista físico, para la construcción de infraestructura urbana y de comunicaciones, y c) La realización de inventarios de recursos naturales, degradación de tierras y cambio ambiental. La geomorfología es la base de la regionalización a escalas pequeñas y medianas.

El conocimiento del estado y dinámica de los acuíferos de zonas cársticas como la PY es de interés por los procesos de disolución de las rocas carbonatadas. De la calidad del agua del acuífero dependen muchos usos y efectos en la población, por ejemplo: consumo humano (salud humana); agua de riego, en la producción agropecuaria (alimen-

tos) y forestal (materiales); uso industrial, y conservación de los sitios turísticos y áreas protegidas.

La identificación de los suelos, según diferentes esquemas de clasificación, también debe considerarse en el mejoramiento de los sistemas de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, así como en la transferencia de tecnología agropecuaria y forestal. El suelo no sólo como medio físico, sino también como biológico es de suma utilidad, pues conjuntamente con el clima y el manejo son factores que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas. La identificación de las zonas agroecológicas de la PY puede realizarse con base en los suelos, el clima y la vegetación. Al interior de ellas es posible realizar con mayores posibilidades de éxito las prácticas agrícolas.

Con la finalidad de mostrar el avance en el conocimiento sobre los paisajes geomorfológicos y algunas de sus características físico-geográficas en la PY, y su importancia en el manejo racional de los recursos naturales, se desarrolla lo siguiente: descripción de los paisajes geomorfológicos, los acuíferos y los suelos, así como su integración.

GEOMORFOLOGÍA E HIDROLOGÍA

El mapa geomorfológico de la PY se encuentra delimitado por unidades territoriales de escalas medias con cierto grado de homogeneidad morfogenética y ambiental. Bajo este criterio se estructura al sistema de clasificación de paisajes geomorfológicos. A cada paisaje le corresponde una particular combinación de procesos endógenos y exógenos así como las respectivas evidencias en geoformas, materiales (residuales, acumulativos, erosivos y denudativos) e indicadores bióticos (Fig. 1).

Debido al estrecho vínculo entre los paisajes geomorfológicos y el comportamiento de los acuíferos, se incluye el conocimiento hidrológico (Butterlin y Bonnet, 1963; Wilson, 1980; Duch, 1988; Lesser y Weidie, 1988; Perry *et al.*, 1995; Villasuso y Méndez, 2000) disponible para la PY.

SISTEMA FLUVIO-PALUSTRE

El sistema fluvio-palustre se ubica sobre planicies bajas acumulativas que se alojan en cuencas de acumulación marginal. Están expuestas a regímenes de inundación semipermanente y extraordinaria por lo que existe hidromorfismo en los suelos y vegetación hidrófila como vegetación



riparia, manglares, popales, tulares, pastizales inundados y selvas bajas y medianas inundables.

Lo relevante de este sistema es que al encontrarse entre los dominios ambientales de una región carbonatada y otra terrígena se muestran paisajes con características compartidas y ecotonos de influencias relativas.

1.- *Planicies palustres*. Son planicies acumulativas con pendiente casi nula, lo que favorece el estancamiento semipermanente o estacional de las aguas pluviales. Prevalece el hidromorfismo y las condiciones anaerobias en los suelos. Generalmente son conocidas como humedales y favorecen la colonización de vegetación hidrófila y halófila. Se encuentra a lo largo de toda la costa de la PY tanto en ambientes terrígenos como carbonatados.

2.- *Planicies fluvio-palustres*. Se originan cuando el cauce fluvial es rebasado y el caudal invade las planicies palustres formando una serie de lagunetas de crecida agrupadas o dispersas. Están asociadas a ríos interconectados en el curso bajo del río Usumacinta en Campeche como el San Pedro y San Pablo, Palizada, Candelaria, y Chumpán.

3.- *Planicie proluvial-conchífera*. Es una planicie de transición entre ambientes fluviales y marinos. Está compuesta por los aluviones de acumulación distal que se mezclan con fragmentos de conchas de moluscos y foraminíferos. Se forman marismas en función del régimen intermareal que, en la región, es diurno. Esta condición propicia la colonización de diversas especies de manglar.

Entre los trabajos que podemos mencionar de los sistemas fluvio-palustres está el de Vera-Herrera y col. (1988) para el sistema deltaico del río Palizada formado por dos cauces con sus respectivos deltas. Tiene también tres lagunas denominadas: del Vapor, del Este y de San Francisco, con una superficie conjunta de casi 90 km². El volumen de descarga del río Palizada presenta un rango de 133 a 178 m³s⁻¹, que corresponde aproximadamente al 70% de todo el aporte dulceacuícola que ingresa a la Laguna de Términos (Yáñez-Arancibia y Day, 1982).

La persistencia, magnitud y características de la descarga hidrológica (agua dulce, sedimentos y nutrientes) del sistema hacia el mar tiene un importante efecto geológico sobre la Laguna de Términos y el litoral marino in-

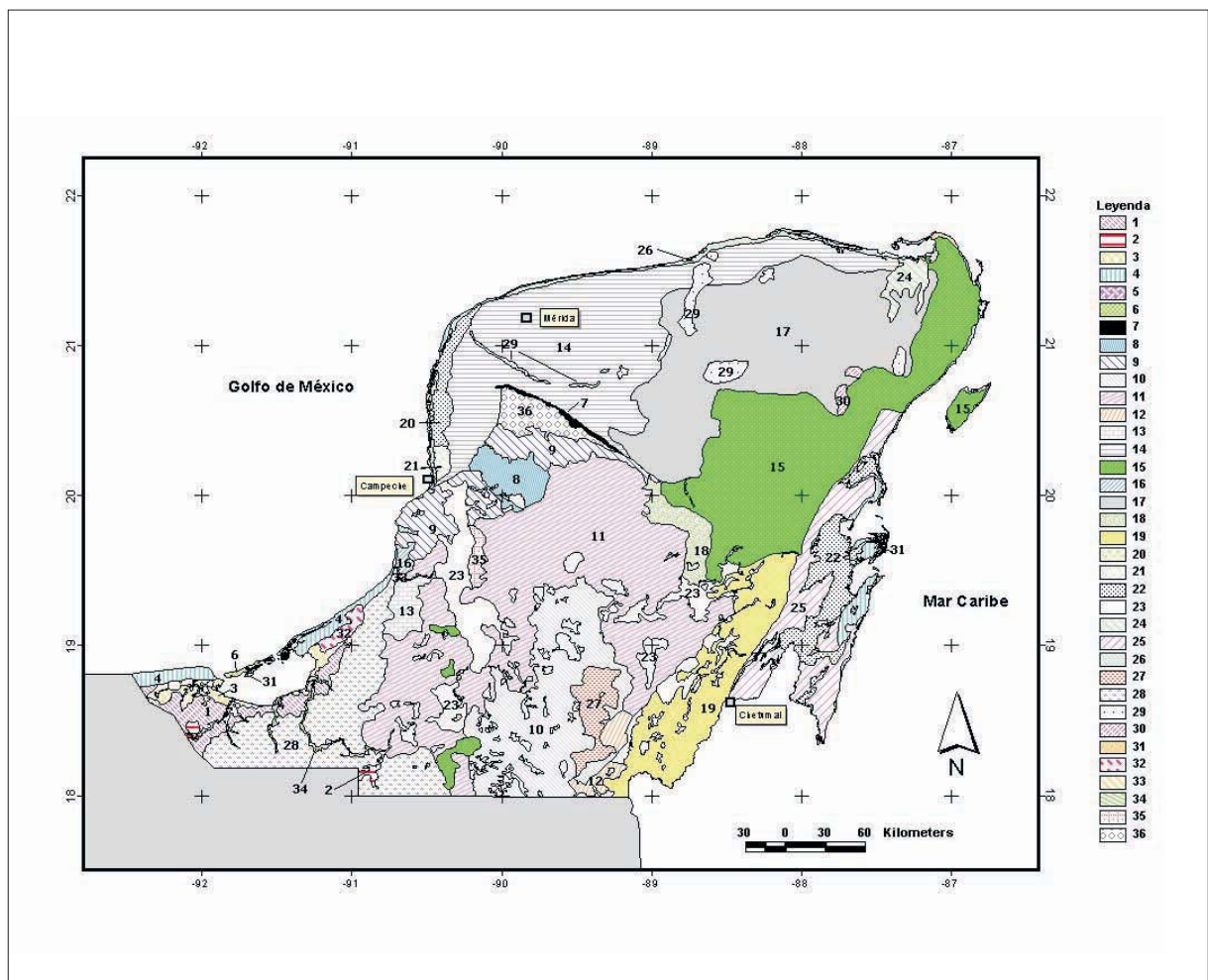


Figura 1. Mapa de paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán.

Tabla 1. Geoformas de la Península de Yucatán y su grado de evolución.

Sistema terrestre (Morfogénesis)	Expresión morfológica principal	Paisaje geomorfológico	Grado de evolución cárstica	Clave
Fluvio-palustre	Planicies	Palustre		1
		Fluvio-palustre		2
		Palustre proluvial-conchífera bajo influencia marina		3
Litoral	Planicies	Cordones litorales líticos y arenosos		4
		Flechas litorales		5
		Isla Barrera		6
Carso-tectónica	Lomeríos	Pliegue bloque con cúpulas alineadas (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	Mad	7
		Pliegue bloque poco disectado con planicies amplias (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	Mad-Tar	8
		Pliegue bloque con cimas en cúpulas y planicies confinadas (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	mad	9
		Altos > 200 msnm disectados por torrentes	Mad-Tar	10
		De elevaciones bajas < 200 msnm (dispersos y con planicies interiores amplias)	Tard	11
		Disectados por torrentes y disolución sobre morfoalineamientos tectónicos	Juv-Mad	12
		En cúpulas con erosión diferencial alternando con planicies confinadas	Mad	13
	Planicies	Estructural baja denudativa (< densidad de fracturas)	Rec	14
		Estructural baja fitoestable	Rec-Mad	15
		Estructural baja acumulativa	Tar	16
		Estructural ondulada con disolución y denudación (>densidad de fracturas, alta concentración de formas cársticas)	Juv	17
		Estructural ondulada denudativa de transición entre lomeríos y planicies	Mad	18
		Estructural escalonada	Juv-Mad	19
		Palustre costera con blanquizales	Rec	20
		Palustre con petenes grandes	Rec	21
		Palustre con petenes chicos	Rec	22
		Residuales acumulativas susceptibles de inundación	Tar	23
		Residuales acumulativas susceptibles de inundación controladas estructuralmente	Mad-Tar	24
		Palustre costera de inundación marina con hundimiento	Rec-Juv	25
		Palustre costera de inundación marina	Rec	26
		Altas denudativas > de 200 msnm con lomeríos aislados	Tar	27
		Estructural baja con acumulación fluvio-deluvial (materiales del cuaternario)	Rec	28
Distribución azonal		Dolinas agrupadas (inundadas -cenotes-)	Rec	29
		Dolinas agrupadas (inundadas -cenotes-) y en proceso de formación de uvalas	Juv	30
		Bajos intermareales		31
		Planicie estructural baja de resurgencias sobre ambientes palustres		32
		Lecho cárstico pseudofluvial	Juv	33
		Lecho fluvial		34
		Rampa cárstica denudatorio-erosiva	Mad	35
		Planicie estructural ondulada de transición entre pliegues bloque (50 msnm promedio)	Mad-Tar	36

Grado de evolución cárstica Re= Reciente; Juv= Juventud; Mad= Madurez; Tar= Tardía de relictos



mediato, lo cual se confirma por diversas evidencias bióticas y abióticas. (Day *et al.*, 1982). Existe un vínculo ecológico estrecho entre los ríos y pantanos, el estuario y el mar.

SISTEMA LITORAL

Se sitúa en el borde externo continental, sobre una cuenca marginal o de transición entre el continente y el océano. Recibe los sedimentos de la porción continental y los generados en el ambiente marino. Exhibe una estructura tabular con echados ligeramente inclinados hacia el mar con relieve esencialmente llano. En estos sistemas la hidrodinámica costera del oleaje, las mareas y la deriva litoral son factores morfogenéticos relevantes.

4.- *Planicies de cordones litorales (líticos y arenosos)*. Se forman en ambientes costeros acumulativos y progadantes hacia el mar. Sus sedimentos pueden ser terrígenos y carbonatados o predominantemente carbonatados. La composición proporcional de los sedimentos denota la importancia relativa de las influencias continental (frente de avance deltaico y redistribución de sedimentos en barras dispuestas a los flancos de las desembocaduras) o marina (Fig.2).

Cuando los sedimentos confluyen en el mar las corrientes litorales se encargan de distribuirlos en una alternancia de camellones alargados y pequeñas hondonadas o depresiones ordenadas sucesivamente a diferentes ritmos de avance hacia el mar. También puede haber planicies intermareales confinadas cubiertas con manglar y/o pastizales halófilos y blanquiales en el flanco interno de la isla barrera. Los líticos presentan fragmentos de roca y se encuentran más o menos estabilizados y los arenosos se encuentran en proceso de formación. Se encuentran bien desarrollados en el suroeste de Campeche y costa centro de Quintana Roo.

5.- *Flecha litoral*. Es una barra o fragmento de cordón litoral unido al continente con un patrón acumulativo notoriamente condicionado en su orientación por la deriva litoral. Se presentan principalmente en las costas de Quintana Roo y Campeche (Fig.2).

6.- *Isla Barrera*. Es una barra litoral que se ha estabilizado, o bien un cordón o cordones litorales alineados separados del continente por bocas o canales, incluyendo canales artificiales. Pueden ser también biogénicas, con fragmentos de conchas de material consolidado (coquina); emerge con los niveles de marea baja y forma plataformas de abrasión en la rompiente (Fig.2).

La respuesta natural de la isla de Barrera ante la alta energía de las fluctuaciones de marea, las tormentas, olas y viento es la disminución de arena, flexibilización y retracción hacia tierra dentro debido al incremento del nivel medio del mar. Este retroceso es originado por tres mecanismos: 1) Dinámica de bocas que conectan el mar con la ciénaga o ría; 2) Bajos inundables, y 3) Migración de la duna costera. Meyer-Arendt (1993) menciona que la ba-

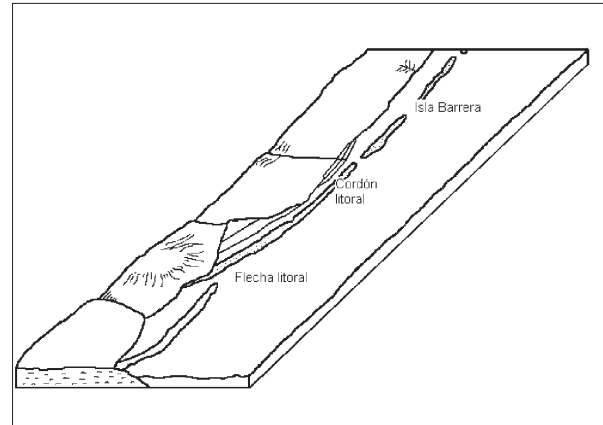


Figura 2. Disposición y secuencia morfogenética de las geoformas acumulativas en el sistema litoral.

rra arenosa en la costa de Yucatán se retrae tierra adentro a una tasa que varía de 0.3 a 0.9 m año⁻¹ en un intervalo de 1948 a 1978 en áreas aledañas a Progreso de Castro y ofrece antecedentes que reportan tasas de erosión costera de 1.8 m año⁻² en un periodo de 110 años.

La Secretaría de Marina en 1967 utilizó los datos sobre las alturas de las olas distantes, el tiempo de acción del oleaje en trimestres, el periodo de oleajes, el ángulo de incidencia y el tamaño del material acarreado, y estimó el gasto sólido (m³ trimestre), para mostrar acarrees totales con dirección Este-Oeste de 65,782 m³ año⁻¹ y con dirección Oeste-Este de 15,969 m³ año⁻¹. Esto muestra que la consolidación de la barra es importante y se deben tomar en cuenta los depósitos de material que pueden acumularse en las obras cercanas a la Laguna de Chelén.

En general, la mayoría de los perfiles de la región noroccidental de la PY, muestran cambios evidentes en función de la temporada del año, de verano-otoño (acreción) y de invierno-primavera (erosión) y se observan cambios en la playa debido a fenómenos meteorológicos como los nortes fuertes y los huracanes.

La llanura litoral está expuesta a diferentes procesos físicos y geológicos muy vinculados y de importancia poco difundida, en cuanto a lo que ocurre con la evolución geomorfológica de la zona de estudio. Las áreas inundables de la barra arenosa (playas) que se establecen en el litoral presentan mayores inundaciones, de octubre a enero, cuando el nivel medio del mar es alto y se producen las pleamares máximas que inundan el manglar de franja y se vierten sobre la ciénaga baja. En la temporada de lluvias y nortes se forman "islas" de agua salada bordeadas de agua dulce como se observa entre Punta Piedra y Punta Tablas. En estas temporadas se presentan olas con una altura que varía de 0.30 a 0.70 m, principalmente durante los "nortes" y con amplitudes de 3 a 20 m. Los vientos provenientes del norte y del noroeste presentan velocidades promedio de 25 km h⁻¹ a una altura de 2.5 m sobre el piso y velocidades de 14 a 20 km h⁻¹ a 10 cm del piso, lo cual ejerce una fuerza extraordinaria para levantar los sedimentos de la playa y transportarlos a distancia.

SISTEMA CARSO-TECTÓNICO

El relieve cárstico se debe a la actividad de la disolución por aguas subsuperficiales y subterráneas de rocas solubles tales como caliza, dolomita, yeso y sal. El karst se desarrolla en zonas húmedas sobre superficies de estructura tabular y/o subhorizontal, como el caso de pliegues braquianticlinales, mesetas y terrazas estructurales.

Este sistema es el más representativo de la PY y se le ha denominado carso-tectónico por la estrecha correspondencia entre la actividad neotectónica y los patrones de disolución que dan origen al modelado cárstico. El relieve en su conjunto es considerado del tipo karst de mesa por el predominio de estructuras tabulares monoclinales y se organiza en una serie de planicies estructurales a diferentes niveles altitudinales a 50, 100, 200 y más de 200 msnm. Se pueden diferenciar dos grandes subregiones, una al norte y otra al sur: En el norte predominan superficies niveladas durante el Cuaternario (Lugo *et al.*, 1992) resultado de transgresiones y regresiones desde el Pleistoceno, por lo cual el relieve cárstico es reciente, predominando planicies estructurales denudativas y de disolución. En la subregión sur existen levantamientos tectónicos desde el Mioceno (hace 24 millones de años) por lo que se presenta un relieve de lomeríos en cúpulas y planicies residuales resultado de un mayor grado de carsticidad.

Para hacer más clara la relación grado de carsticidad-expresión morfológica, se utilizan interpretaciones de los modelos empleados por Grund (1914) y Cvijic (1918) que denotan cuatro etapas generales de evolución (Fig. 3); que muestran una evolución lineal que puede ser modificada por diferentes grados y estilos de actividad tectónica y sus correspondientes condicionantes exógenas, reguladas por los factores ambientales. La valoración relativa de la etapa o grado de evolución cárstica por paisaje geomorfológico se incluye en la leyenda.

7.- Pliegue bloque con cúpulas alineadas. Este conjunto de lomeríos presenta al menos un escarpe tectónico-denudativo que sobresale de las planicies circundantes. Las divisorias epicársticas se encuentran unidas y alineadas a manera de un cordón de cúpulas, típicas de los ambientes cársticos tropicales. Existen salones fósiles de disolución como geofórmulas hipocársticas. Este paisaje es identificado regionalmente como la Sierrita de Ticul, en Yucatán.

El manto freático se encuentra a 35 m de profundidad. La principal forma de aprovechamiento del agua es mediante pozos con bombas de extracción tipos turbina y sumergible. Las concentraciones de sulfatos, conductividad eléctrica y sólidos totales están por arriba del límite máximo permitido en las Normas Oficiales Mexicanas.

8.- Pliegue bloque con lomeríos aislados y con planicies amplias. Los lomeríos se encuentran aislados por amplias planicies residuales, lo que supone un grado mayor de carsticidad, aún cuando se presenta también un escarpe tectónico-denudativo identificable.

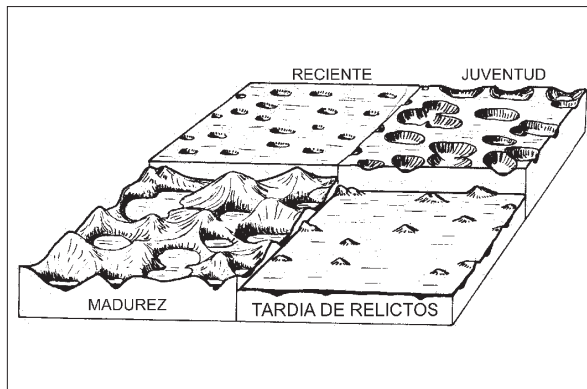


Figura 3. Etapas evolutivas lineales del paisaje carso-tectónico.

9.- Pliegue bloque con cimas en cúpulas y planicies confinadas. Escarpe tectónico-denudativo identificable hacia el oeste. Entre los lomeríos se encuentran planicies residuales confinadas. Es una sierra con lomeríos, en la cual la profundidad al nivel estático varía entre 50 y 100 m, con un abatimiento anual de 1.0 m. En esta zona de cerros y valles al sur de la sierrita de Ticul, los cenotes están ausentes, por lo que se le conoce también como la zona de los "chenes" o "chen" que en maya significa pozo, cisterna o aguada. El primer escarpe formado al frente de la sierrita de Ticul se extiende desde algunos kilómetros al sur de Maxcanú hacia el sureste por más de 160 km, y hasta la laguna de Chichankanab en Quintana Roo, con alturas no mayores a los 120 m. A este escarpe (que forma parte de un lomo separado de un segundo escarpe situado más cerca del mar 70 u 80 km en el área de Oxkutzcab) se le considera como un declive de fuerte pendiente de una falla anticlinal, cuya característica principal es la de ser la antigua línea de costa del Mioceno y presentarse ortogonal a las fallas y fracturas en bloque asociadas al río Hondo y Holbox.

La alta permeabilidad de los carbonatos se refleja en los bajos gradientes de la tabla de agua. En algunos lugares el nivel freático se encuentra a 100 m por debajo de la superficie, haciendo la explotación del agua subterránea difícil y costosa. Predomina el agua cálcica-magnésica-bicarbonatada, procediendo los dos primeros elementos de la disolución de los carbonatos que constituyen las rocas calcáreas. En orden decreciente de importancia se encuentran aguas magnésicas-sulfatadas (el contenido de sulfato es menor que 250 ppm). Sin embargo, en el área de lomeríos se registran localmente contenidos de 250 a 450 ppm, asociados con la presencia de evaporitas o yesos, y en las proximidades del litoral algunos pozos extraen agua con más de 450 ppm de ese elemento, lo cual se atribuye a la captación del agua salobre que subyace al acuífero dulce. Hacia la costa occidental, el agua tiende a ser de la clase sódica-clorada, debido a la mayor amplitud de la zona de mezcla ya que la profundidad de algunos pozos es excesiva en relación con el espesor de agua dulce (CNA, 1995a).



En las geoformas 8, 9, 10 y 35 la profundidad al manto freático es de aproximadamente 50 m, siendo de los más grandes en la PY con norias y pozos. Las concentraciones de cloruros, nitratos, sulfatos, conductividad eléctrica y sólidos totales en el agua exceden los límites establecidos en la Norma Oficial Mexicana.

10.- Lomeríos altos mayores de 200 msnm disectados por torrentes. Debido al predominio de la circulación subsuperficial y subterránea del agua en esta zona, los lomeríos presentan disección por desagües activos temporales o torrentes ("torrenteras"). Para la amplitud o energía del relieve en la PY, la profundidad de la disección de este paisaje es considerable. Sobre los fondos de los desagües se establecen a manera de vegetación riparia, selvas medianas subperennifolias. Presencia de cavidades vadosas. En su origen la morfología original forma parte de la misma morfoestructura mesiforme.

En la porción de lomeríos se manifiestan alturas de 250 msnm en su parte sur. La permeabilidad del medio es muy alta y ha sido detectada a través de los pozos existentes, registrándose abatimientos pequeños (CNA, 1995b). En la región sureste el agua es de mala calidad ya que se reportan altas concentraciones de sulfatos debido a la presencia de yeso y anhídridos.

11.- Lomeríos de elevaciones bajas menores de 200 msnm y planicies interiores. Los lomeríos se encuentran aislados debido a prolongados periodos de denudación y disolución. Localmente presentan disección poco profunda, sin embargo, predominan las planicies residuales extendidas.

La región sureste está representada por lomeríos continuos de pendiente suave, tendiendo a formar amplias planicies que carece de red hidrográfica. El nivel estático presenta variaciones importantes, desde 10 hasta los 165 m que es el valor más alto hasta ahora registrado en el ejido Chencoh de la parte norte del municipio de Hopelchén. En su parte centro, existen valores desde 3.0 m hasta 90.0 m siguiendo la línea de costa de Oeste-Este hasta la población de Escárcega. Estos valores disminuyen de centro hacia el sur con rangos de 10 m a 20 m. En la parte centro-sur se observa una plataforma en donde se ubica el río Candelaria el cual define su cuenca en dirección SE-NW.

El manto freático se encuentra a grandes profundidades, con un promedio de 82 m, los mayores en la PY. El 100 % del equipo de extracción para la actividad agrícola son bombas tipo turbina a través de pozos profundos. Las concentraciones de cloruros, sulfatos, conductividad eléctrica, sólidos totales y coliformes totales exceden los límites permitidos por la Norma Oficial Mexicana.

12.- Lomeríos disectados por torrentes y disolución sobre morfoalineamientos tectónicos. Son lomeríos altos de más de 300 msnm agrupados en bloques, donde la disección y la disolución siguen una red de drenaje semirectangular evidentemente controlada por estructuras disyuntivas. No hay información hidrológica disponible.

13.- Lomeríos en cúpulas con erosión diferencial. Es el conjunto de geoformas más representati-

vo del grado de madurez en la evolución cárstica. Las divisorias epicársticas se fragmentan formando lomas en cúpulas aisladas por erosión diferencial. No hay información hidrológica disponible.

14.- Planicie estructural baja denudativa. Es el carso de expresión superficial con puntos de absorción de formas exocársticas que incluye al microrelieve de lapiáz, depresiones someras, grietas y dolinas corrosivas. Domina la erosión superficial areal y la disolución. Se observa una ausencia casi total de lineamientos, salvo los asociados a la margen externa del cráter sepultado de Chicxulub.

En estudios realizados por Marín *et al* (1988) en la porción noroccidental de este paisaje, se conoció que las oscilaciones promedio del nivel hidrostático entre épocas de estiaje y lluvias son del orden de los 0.50 m, mientras que el espesor de la lámina de agua dulce oscila de 15 - 18 m en la costa, hasta 45 - 48 m en los alrededores de Mérida, según la relación Ghyben-Hersberg.

Los niveles de las aguas subterráneas y las líneas de flujo registradas durante el periodo Julio/1987(verano)-Abril/1989 marcadas por las hidroisohipsas (Marín, *et al.*, 1988) fueron de 1.25 m en el extremo suroriental (Mérida) hasta 0.55 m en las cercanías de Progreso, extremo nororiental, existiendo una diferencia de nivel de 0.70 m y una pendiente hidráulica de 0.0233 m/km, evidenciándose las líneas de flujo en dirección prácticamente norte. Hacia el noroeste, los niveles de las aguas subterráneas oscilan desde 1.66 m en Kinchil hasta los 0.50 m en las cercanías de la costa por Celestún, siendo la pendiente hidráulica de 0.0258 m/km aproximadamente, el comportamiento de las líneas de flujo es en el sentido sureste-noroeste. Al siguiente año, Julio de 1988, las hidroisohipsas mantienen una situación bastante similar a la del año anterior, la pendiente hidráulica de Mérida a Progreso fue de 0.0227 m/km, y la de Kinchil a las cercanías de Celestún fue de 0.0222 m/km.

Los niveles de las aguas subterráneas al final del periodo seco o de estiaje, no presentan grandes diferencias respecto del periodo húmedo. En Abril de 1988 el valor de las hidroisohipsas en la localidad de Mérida fue de 1.02 m y las cercanas a Progreso <0.50 m, resultando una pendiente hidráulica de 0.0173 m km⁻¹. En el transecto Kinchil a la cercanía de Celestún fue de 0.018 m km⁻¹, con valores de 1.22 para Kinchil y de 0.50 m cercano a Celestún. Al año siguiente, Abril de 1989 y posterior al huracán Gilberto, en Mérida el nivel de las aguas subterráneas fue de 0.96 m (6 cm. menor que el año anterior), pero los niveles en el transecto Mérida-Progreso (que disminuyen hacia la costa) eran superiores a los del año anterior, haciendo que la pendiente hidráulica aumentara, específicamente 10 Km al norte de Mérida hacia la costa y desde Kinchil en dirección a Celestún, (con una pendiente hidráulica de 0.0252 m km⁻¹ y 0.0247 m km⁻¹ respectivamente). Se produce un flujo semiradial desde el sur y sureste hacia Mérida y una pequeña zona de refluo a partir de unos 10 a 12 km al norte de Mérida donde se localiza una divisoria de

las aguas subterráneas, que continuando hacia el norte siguen los flujos normales hacia la costa.

A partir de estos mapas de hidroisohipsas o equipotenciales se puede concluir que las oscilaciones del nivel hidrostático en el transcurso de una año son de 20 a 60 cm. Las pendientes hidráulicas tienen también poca variación, que permite cierta estabilidad en los cambios de niveles de agua en toda la región.

Las características hidrogeodinámicas de las llanuras biogénica y litoral, por debajo de la curva de nivel de 2 msnm, denotan la mayor elevación del nivel freático registrada en pozos y cenotes a 30 km de distancia de la costa, con un nivel promedio de 1.11 y 1.03 msnm respectivamente. La elevación disminuye gradualmente hacia la costa, de tal manera que las menores elevaciones promedio registradas fueron de 0.41 y 0.45 msnm en pozos y manantiales a una distancia promedio de 2300 m, con una pendiente general de 0.028 m km^{-1} . Temporalmente, las máximas elevaciones del nivel de agua ocurren durante septiembre y octubre, con aguas más salobres y de baja temperatura. En contraparte, las mínimas elevaciones se registraron desde el final de la época de nortes y durante la época de secas principalmente, con aguas más dulces y las máximas temperaturas al inicio de la época de lluvias. La concentración de sal aumenta conforme disminuye la distancia al mar.

El acuífero de la ciudad de Mérida contiene una lente de agua dulce de 40 m de espesor en promedio, que flota sobre agua salada. La zona de mezcla o interfase salina tiene 37 m de espesor (entre 28 a 65 m de profundidad) está degradada por las grandes cantidades de aguas residuales y pluviales descargadas. Lo anterior es importante si se considera la existencia de tres conductos cársticos de flujo preferencial de agua subterránea a las profundidades de 8-12 m, 20-22 m y 28 m, asociados con antiguas posiciones del nivel freático, directamente relacionados con variaciones del nivel del mar durante el Pleistoceno. Es un acuífero que presenta una gran porosidad secundaria almacenando grandes volúmenes de agua y donde el gradiente hidráulico es muy pequeño, lo que significa que el agua se mueve en promedio algunos metros por día. Los valores de transmisividad del acuífero varían de 0.1 m s^{-1} hasta 0.0003 m s^{-1} , según cálculos de diversos autores (Villasuso y Méndez, 2000).

En la región metropolitana de Mérida la profundidad al manto freático es de 13 m y se considera somero. Las concentraciones de nitratos, nitritos, conductividad eléctrica, coliformes fecales y totales de calidad de las aguas subterráneas exceden las cantidades máximas permitidas por la Norma Oficial Mexicana.

En la planicie estructural baja (dentro del anillo de cenotes) se tiene una profundidad al manto freático similar al anterior. Las concentraciones de cloruros y conductividad eléctrica exceden las cantidades máximas permitidas por la Norma Oficial Mexicana.

15.- *Planicie estructural baja fitoestable*- a diferencia de la planicie estructural baja denudativa

con la cual guarda muchas semejanzas morfogénicas, ésta se encuentra, en términos evolutivos, en etapa de pedogénesis y fitoestabilidad. Esto debido a las condiciones climáticas (clima cálido subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos) sin variaciones extremas en la temperatura (por arriba de los 18° promedio) y con humedad relativa alta permanente ($>80\%$), lo que ha permitido el desarrollo de selva mediana subperennifolia y el rápido restablecimiento de las áreas perturbadas hacia selvas secundarias. Se presentan como unidades aisladas con mayores tiempos de evolución cárstica (madurez).

16.- *Planicie estructural baja acumulativa*. Carso conocido como cubierto. Está sobre una planicie estructural denudativa en donde los procesos de carsificación son incipientes; concurren una serie a aportes deluviales y eluviales que los cubren. Cabe aclarar que no es una depresión confinada sino que presenta drenaje superficial hacia el mar. No hay información hidrológica disponible.

17.- *Planicie estructural ondulada con disolución y denudación*. Se caracteriza por la diversidad de las formas cársticas (más de 100 por km^2) principalmente cenotes profundos. La conformación ondulada del terreno está relacionada con la disgregación de dolinas en diferentes etapas de desarrollo y coincide con la gran diversidad de fracturas. Presenta promedios altitudinales menores de 50 msnm.

En esta extensa planicie, la profundidad al nivel estático es de 15 a 30 m, con abatimientos de la tabla de agua de 0.70 m. Las lluvias disuelven la caliza y ocasiona que el agua se infiltre rápidamente al subsuelo. La gran transmisividad del medio permite un rápido movimiento lateral del agua subterránea, que produce una lente de agua dulce, menor a 70 metros de espesor, flotando sobre una gran masa de agua con características muy similares a las marinas (Hanshaw y Back, 1980). Esta gran transmisividad se demuestra en la ausencia de cabezas hidrostáticas elevadas: en Chichén Itzá, a pesar de que la superficie continental es aproximadamente 30 m sobre el nivel medio del mar, el nivel estático del acuífero es de solo 1.5 m sobre dicho nivel a una distancia de casi 80 km de la costa (Back y Hanshaw, 1980). De existir sedimentos que taparan los conductos subterráneos éstas cabezas serían mucho más elevadas.

Las características hidrológicas del área de captación y recarga del acuífero, que alimenta la porción oriental de la PY, influyen en la conformación de una zona de alta permeabilidad y conductividad hidráulica a nivel mesoregional, que da origen a un acuífero de buena calidad y cantidad de agua. La alta carsticidad, la mayor densidad de fracturas y la presencia de planicies residuales acumulativas susceptibles de inundación, permite que la lluvia se infiltre sobre el municipio de Carrillo Puerto. Al sureste del estado de Yucatán (entre Sotuta y Kantunil), la cuenca de captación se bordea por el Miembro Chumbe, del Eoceno Superior y se caracteriza como un acuitardo de mediana productividad. Al poniente de la cuenca de captación se



presenta el anillo de cenotes, el cual se encuentra dentro de la planicie estructural baja denudativa (CNA, 1996).

La cuenca de captación en la zona mencionada, se constituye principalmente como una estrecha franja hacia Valladolid y Felipe Carrillo Puerto con precipitaciones mayores a 1,200 mm al año. Por esto, se generan cuatro zonas: 1) Una zona de recarga lenta pero abundante en rocas Eocénicas al sur, con suelos halomórficos (Gleysoles) y arcillosos (como los Cambisoles, Nitosoles y Luvisoles), terrenos cerriles y abundantes cuerpos de agua superficial; 2) Al centro, en los bordes de la Sierrita de Ticul, con suelos bien drenados del tipo Rendzina y Litosol, en terrenos monticulares y sobre rocas del Mioceno-Plioceno altamente permeables se desarrolla una zona de recarga rápida y con frecuentes escurrimientos superficiales en las faldas de la Sierrita; 3) Al norte y hasta el límite de la zona edáfica costera de suelos halomórficos (Solonchack) se desarrolla una planicie que percola fácilmente el agua precipitada hacia los mantos subterráneos, y 4) En la porción norte de este paisaje el agua subterránea tiene concentraciones de cloruros, nitratos y conductividad eléctrica que exceden el límite máximo permitido por la Norma Oficial Mexicana.

18.- Planicie estructural ondulada denudativa de transición entre lomeríos y planicies. A diferencia de la planicie denudativa baja, ésta se encuentra por debajo de los 50 msnm. El terreno ondulado está caracterizado por lomeríos aislados de transición entre lomeríos bajos y planicies bajas. No hay información hidrológica disponible.

19.- Planicie estructural escalonada. Es un relieve complejo donde se conjuga la expresión topográfica de morfoestructuras en terrazas estructurales afectadas por disolución. Se presentan hasta 4 escarpes bajos, menores de 50 m sucesivos del continente hacia el mar, modelados por disolución. En la base de los escarpes tectónico-erosivos donde se facilita la disolución por fracturas se forman localmente dolinas y uvalas inundadas.

La zona de fallas y fracturas que conforma el bloque oriente de la PY, limita al sur con Belice. Presenta una serie de fallas en bloques subparalelos, con una pendiente hacia el este. Se distingue por poseer 2 rasgos únicos: suelo negro de montmorillonita en las cuencas que se alojan en las fallas de bloques y lagunas salinas.

Las lagunas salinas, el segundo rasgo distintivo de esta localidad, ocupan porciones de extensas cuencas de la planicie estructural escalonada incluyendo planicies residuales acumulativas susceptibles de inundación, especialmente al este y norte de la Cd. de Chetumal. La mayor de estas lagunas es Bacalar, con una longitud de 30 km aproximadamente. Otras lagunas como Chanyoxche, Nohbec, Ocom, La Virtud, San Felipe y Paytoro son un poco más pequeñas. De ninguna de las lagunas existen estudios a detalle, a excepción de la laguna Chichankanab que se localiza aproximadamente a 5 km, al sureste del pueblo llamado Santa Rosa, con una orientación en dirección NNE. Tiene una longitud de casi 11 km (Robles 1950) con un ancho máximo de 600 m. Los análisis químicos muestran que es rica en sulfatos de calcio y magnesio, con

bajas concentraciones de cloruro de sodio y sulfato de sodio. Robles (1950) menciona que esta laguna fue probablemente parte de un ambiente marino durante el Plioceno y que, mientras el margen oriental de la Península se elevaba durante el Plioceno tardío y Pleistoceno temprano, las aguas marinas fueron atrapadas localmente en depresiones durante su lento desagüe al sureste. Tanto los análisis geoquímicos de las aguas del lago de Chichankanab como los estudios de flora y fauna presentes en los sedimentos dan soporte al origen marino. Isphording (1975), menciona que aparentemente, debido a una nula interconexión entre las aguas de estos lagos y el drenaje general de agua dulce subterránea en toda la Península, el lago se hizo más salino con el tiempo, la evidencia también apoya la conclusión de que existieron cambios climáticos a condiciones más áridas en tiempos históricos, causando una gradual caída en el nivel del lago y un rápido incremento en su salinidad. Análisis mineralógico de los sedimentos del lago muestran un espesor de 2 a 4 m. de montmorillonita, cuarzo y yeso. Este pudo ser el origen de los otros lagos salinos de la localidad de fallas en bloque del oriente. Se postula que la salinidad en estos lagos se debe a que en los últimos movimientos del Plioceno, las cuencas en fallas se interconectaron a profundidad con la capa de evaporitas desarrollada durante el Cretácico y Terciario y cuyo resultado es la disolución de los sulfatos, principalmente de calcio y magnesio.

Existen informes de que en la laguna de Paytoro, se ha observado un sumidero donde las aguas superficiales se introducen al interior del macizo cárstico y que después de fuertes lluvias, en las partes bajas cercanas a Carrillo Puerto se presentan desbordamientos de agua sobre la carretera que conduce a Chetumal. Lo anterior es importante considerarlo si el desarrollo económico en las partes altas demanda sustancias tóxicas o fertilizantes, ya que la zona núcleo de la Reserva de Sian Ka'an sería en última instancia el receptor final de los contaminantes, poniendo en riesgo la salud ambiental del área.

20.- Planicie costera palustre con blanquizales. Sobre un karst cubierto por ciénagas, donde predominan las condiciones de inundabilidad bajo influencia costera, existen planicies que funcionan a manera cubetas de decantación. Superficialmente son inundadas durante la época de lluvias y en la época seca están expuestas a un alto régimen de evapotranspiración que da origen a la formación de una delgada capa superficial blanquecina de sales.

Con relación a las características hidrodinámicas superficiales de las unidades biogénicas y cárstica denudativa, se observa que el nivel máximo de inundación no sobrepasa la isolínea de altitud topográfica de 1 msnm (Batllori, 1995). De manera general, el nivel del agua superficial más elevado (con respecto al nivel medio del mar) se registra en la selva inundable, disminuyendo gradualmente hasta la ría o ciénaga donde se observaron los niveles más bajos. La profundidad de la inundación disminuye durante la temporada de "secas" (marzo, abril, mayo y junio) y aumenta paulatinamente hasta la temporada de "nortes" (octubre, noviembre, diciembre, enero y febrero). En la fluctuación del nivel de agua a través del tiempo se observa que cuando en la selva inundable se encuentra el más alto nivel, en la ciénaga o ría el nivel de agua es el

más bajo y cuando en éstos se registran las mayores inundaciones, en la selva inundable el nivel de agua descende. La mayor oscilación se registra entre la ría de Celestún y la laguna de Chelém debido a la influencia de la marea. Las asociaciones hidráulicas presentan dos grupos hidrológicos principales, el primero conformado por la ría, la laguna y la ciénaga litoral y el segundo por la zona de petenes y la selva inundable. Por otra parte, se observa que el cambio en la posición del nivel de agua subterránea cercano a la costa, asociado a recargas del manto freático, tiene gran influencia en el llenado y vaciado en la zona de Petenes.

En las mayores concentraciones de sal se presentan valores medios de 31.8 o/oo con un rango de oscilación máxima de 96 o/oo; mientras que las más bajas se detectan en los Petenes y selva inundable con valores medios de 1.5 o/oo. Durante la temporada de "secas", se registran condiciones de hipersalinidad en la ciénaga con 103.5 o/oo; luego durante la temporada de "nortes" la salinidad disminuye hasta 4 o/oo. La temperatura promedio del agua es de 30.2 a 29.5 °C y con un rango de oscilación de entre 23° a 38°C, disminuyendo hacia la selva inundable con valores promedio de 28.3°C y una oscilación entre 21° y 34°C.

En la ciénaga litoral que corre paralela a la costa, existe un desnivel topográfico que va desde 0.40 msnm en Vereda Chuburná, al oriente, hasta -0.77 msnm en Celestún; al poniente, con una pendiente de 0.021 m km⁻¹ que permite un escurrimiento de agua a las áreas más bajas. Las mayores elevaciones del nivel de agua superficial se registraron en Vereda Chuburná y Sisal con un nivel promedio de 0.47 y 0.38 msnm respectivamente. En Celestún y el Tambor en cambio, ocurrieron las menores elevaciones con 0.06 y -0.03 msnm en promedio respectivamente. De esta manera se encuentran gradientes hidráulicos que van de 0.0086 m km⁻¹ a 0.010 m km⁻¹ de acuerdo a la temporada, siendo mayor en "secas". Asimismo, la variación temporal del nivel de inundación está representada por la época de "secas" y "nortes" principalmente, correspondiendo a las menores y mayores inundaciones respectivamente.

Se detectó un gradiente de mayor a menor salinidad desde Chuburná (con un promedio de 47.9 o/oo) hasta el Tambor y Celestún (con 6.6 y 10.4 o/oo respectivamente). En Chuburná la salinidad fluctúa desde 11.5 hasta 102.0 o/oo en febrero y junio. En el Tambor, se registran las concentraciones más bajas de sal desde 2.6 hasta 15.3 o/oo en abril y julio. Los valores de correlación muestran fuertes asociaciones entre las estaciones orientales, desde Palmar oriental hasta Chuburná, conformándose como áreas con gran influencia salina, debido principalmente a escurrimientos por encima de la llanura litoral en el Palmar y a las bocanas que conectan el mar con la ciénaga en La Carbonera, Chuburná Puerto y Yucalpetén, mientras que la ría de Celestún presenta ambientes más dulces, logrando cierta asociación con el Palmar occidental. Con relación a la temperatura del agua y considerando el valor promedio, ésta disminuye desde 31.1 °C en Sisal hasta 27.4 °C en Celestún; con una diferencia de

8 °C en las temperaturas máximas. La menor variación se registró en el Tambor.

En presencia de huracanes y tormentas tropicales los estancamientos producidos y las descargas recibidas provocan que la barra arenosa costera ceda al empuje y abre sendas bocanas, principalmente en las áreas frágiles. Los principales cambios en la morfología costera ante el huracán Gilberto, en 1988, fueron debido a la apertura de 24 bocas que conectaron la llanura biogénica con el mar. En ellas se observan anchos variables desde poco menos de 100 m con profundidades de 2.5 m hasta menos de 30 m de ancho con profundidades por debajo de 1 m. Cabe mencionar que el basamento de los canales más profundos está constituido por un material litificado, probablemente la capa de caliche mencionada con anterioridad.

Los cambios morfológicos más importantes que presentan las bocas, como el caso de El Palmar, a través de la temporada de lluvias y nortes de 1990 antes de que se cerrara por efecto de los vientos del norte, fue el desarrollo de un amplio canal paralelo a la costa protegido por una incipiente barra arenosa formada por el depósito de sedimentos transportados por las corrientes litorales. Las entradas de agua en pleamar siempre fueron mayores con un canal desbordando por las orillas y con profundidades cercanas a 1 m, mientras que en la bajamar, el ancho del canal disminuía con una profundidad promedio de 0.50 m, por lo que se favorece a los ambientes hipersalinos. Cuando la boca se cerró, se observó la formación de un playón largo y tendido de 45 m hasta la primera duna costera, que permite el desbordamiento del agua de mar durante las pleamares máximas. La respuesta inmediata al cierre de la bocana fue la fuerte caída de los valores de salinidad y el incremento de nivel en la ciénaga. Se observó también que cercano a la barra arenosa mantenía salinidades relativamente más altas que el resto de la ciénaga y es importante señalar que se registraron estratificaciones de hasta 7 o/oo en una columna de 0.40 m de agua.

De acuerdo a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua publicados en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989, el nivel máximo permisible de fosfatos para la protección a la vida acuática y el consumo humano es de 0.1 y 0.002 mg/L⁻¹, para los nitratos de 5.0 y 0.04 mg/L⁻¹ y para los nitritos de 0.05 y 0.002 mg/L⁻¹ respectivamente. Para el oxígeno disuelto el nivel mínimo admisible es de 4.0 y 5.0 mg/L⁻¹ para vida acuática y consumo humano respectivamente. Considerando los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos del agua a través de todos los transectos y por tipo de vegetación, se observa que la concentración de fosfatos (índice que muestra la presencia de materia orgánica) es mayor en los Petenes (0.48 mg/L⁻¹) que en el manglar (0.08 mg/L⁻¹), selva inundable y baja caducifolia (0.06 mg/L⁻¹) respectivamente, por el contrario el oxígeno disuelto es menor en los Petenes (1.74 mg/L⁻¹) y aumenta en el manglar (1.83 mg/L⁻¹), selva inundable y caducifolia (2.85 y 2.10 mg/L⁻¹ respectivamente). Los nitratos se encuentran en mayor concentración en la selva inundable (2.40 mg/L⁻¹) y selva baja caducifolia (1.62



mg/L⁻¹) y disminuye en Petenes (0.95 mg/L⁻¹) y manglar (0.32 mg/L⁻¹). La alcalinidad por carbonato de calcio es mayor en el manglar y en la selva inundable (450.5 y 426.5 mg/L⁻¹ respectivamente) y disminuye en los Petenes y en la selva baja caducifolia (384.5 y 342.7 mg/L⁻¹ respectivamente). La dureza es mayor en el manglar (3331.8 mg/L⁻¹) y disminuye gradualmente hasta la selva baja caducifolia donde se registra la más baja (653.3 mg/L⁻¹). La conductividad eléctrica del agua aumenta desde la selva caducifolia (1189.5 mmhos cm⁻¹) hasta el manglar (10821.6 mmhos cm⁻¹).

En el manglar se registran los mayores rangos de variación en la concentración de nitritos (0 a 1.0 mg/L⁻¹), silicatos (0.49 a 46.0 mg/L⁻¹), alcalinidad (226 a 1230 mg/L⁻¹), dureza (680 a 14900 mg/L⁻¹), pH (6.9 a 8.5) y conductividad eléctrica (1100 a 46000). La mayor variación en la concentración de fosfatos se registra en los Petenes (0.01 a 4.14 mg/L⁻¹), de amonio en la selva inundable (0.49 a 9.13 mg/L⁻¹) y de oxígeno disuelto y nitratos en la selva baja caducifolia (de .0 a 8.8 mg/L⁻¹ y de .02 a 6.77 mg/L⁻¹) respectivamente.

Podemos observar que en general los niveles de fosfatos, nitratos y nitritos no exceden los valores para consumo humano, no obstante, se encuentran ligeramente por encima de los niveles permisibles para la protección de la vida acuática. Esto puede ser un reflejo de la contaminación ocasionada por las actividades humanas en tierras altas y en la misma zona costera. En relación a los índices para consumo humano, la elevada salinidad y conductividad eléctrica del agua son los principales factores limitantes.

21.- Palustre de petenes grandes. Este paisaje es único en México, se distribuyen en todo el borde de la PY, pero son particularmente abundantes en la porción centro oriental de Quintana Roo y en el Noroeste del Estado de Campeche. Son tipos de vegetación que solo se encuentran en dos otras regiones del mundo, en la región de los Everglades, Florida (EUA) donde se les denomina "hummock forest", y en la Ciénaga de Zapata, Cuba. Una de las características importantes de los petenes es la disponibilidad constante de agua a lo largo del año, a través de afloramientos provenientes de las corrientes subterráneas o resurgencias propias de las zonas cársticas. Esta condición propicia el desarrollo de islas de vegetación arbórea, principalmente de selva mediana perennifolia y subperennifolia y manglar, que se encuentran inmersas en medio de amplias zonas inundables de tipo pantanoso o de selva estructuralmente más baja.

Los petenes pueden ser de dos tipos (Fig.4), los originados por resurgencias de acuíferos continentales (A) y los que reconocen elevaciones topográficas (B). El tamaño relativo de los Petenes tiene que ver con el direccionamiento de los volúmenes de agua captados en el centro sur de la PY hacia el noroeste, en donde las cantidades de los flujos subsuperficiales de agua variarán en función inversamente proporcional a la distancia.

La palabra "Petén" proviene del idioma maya que significa campos llanos junto al mar a manera de islotes. Su ta-

maño varía en función de la inundabilidad de sustrato, el aporte de agua dulce y el dominio climático. Los Petenes grandes tienen más de 35 ha de superficie promedio.

22.- Planicie palustre de petenes chicos. Es una planicie similar a la anterior donde los petenes pueden tener diámetros entre decenas de metros y hasta 35 ha promedio. Estos petenes son principalmente de manglar y están sujetos a oscilaciones extremas de disponibilidad de agua y concentraciones salinas.

Particularizando en el comportamiento hidrológico de algunos petenes del área de estudio (Palmar, Dzulá, Lagartero, Tzintzin, Bolón y Elepetén), en condiciones de marea muerta y de marea viva (cerca de 0.20 m y 0.60 m de amplitud respectivamente), la respuesta de los manantiales emplazados en dichos petenes a la oscilación de marea resultó altamente significativa, de manera inmediata y con una reducción de la amplitud de marea reflejada en el nivel del manantial de un 40% a un 24% respectivamente. En marea muerta el rango de oscilación del nivel hidrostático en el suelo de los Petenes fue muy bajo, desde más del 97% de reducción en el manglar hasta el 50% en el suelo del interior del petén, cercano al manantial. El rango aumentó en marea viva hasta un 95% en el manglar así como un 46% en el petén. Es notorio entonces que a mayor amplitud en el manantial mayor oscilación de la tabla de agua en el suelo del petén y viceversa, excepto en el manglar de ciénaga, donde la dinámica es independiente.

Antiguamente, los petenes fueron explotados para la obtención de madera y chicle, donde los pobladores realizaron canalizaciones en los petenes del occidente del área de estudio, desde el manantial hasta el manglar. El efecto más importante de esta acción es la caída del nivel hidrostático promedio en el manantial y por ende en los suelos del petén también. Considerando las observaciones realizadas en los petenes Dzulá, Tzintzín y Lagartero, se realizó el desazolve del manantial del petén Elepetén sin canalizar el manantial hacia la ciénaga. La respuesta del manantial Elepetén a la marea, como se esperaba, es directa e inmediata y destaca el hecho de que después del desazolve se registró una mayor elevación del nivel hidrostático en el manantial con un 33 %, mientras que la amplitud de la marea fue ligeramente menor. De esta manera, el efecto de la canalización está representado por un abatimiento del nivel hidrostático mientras que el desazolve de manantiales sin canalizar denota una mayor elevación del nivel y por ende, un mayor escurrimiento superficial de agua hacia la ciénaga. Puede considerarse al suelo del petén como un brocal natural que confina las aguas del manantial.

En los petenes canalizados, se observó que en condiciones de marea muerta la dirección de la corriente fue siempre hacia el manantial, con un gasto desde -0.37 hasta -0.56 m³/s en los momentos de máximo y mínimo nivel de agua en el manantial respectivamente. La salinidad en el manantial osciló entre 16 y 18 o/oo. En condiciones de marea viva, durante la pleamar existió un flujo de agua hacia la

ciénaga hasta de $0.37 \text{ m}^3/\text{s}$ y en bajamar el flujo se invierte hacia el manantial hasta en $-0.92 \text{ m}^3/\text{s}$. De esta manera, la salinidad en el manantial fluctúa entre 2 y 23 o/oo durante la pleamar y bajamar respectivamente. En todos los casos el balance de sal siempre fue negativo produciendo una salinización del manto freático.

La oscilación de la salinidad en los manantiales parece estar relacionada con la variación del nivel hidrostático y amplitud de marea, así como a la temporada de observación. De tal forma, en marea muerta de temporada de nortes, el valor de salinidad fue de 0.9 en el manantial Avelino, mientras que en marea viva el valor aumentó hasta 3 o/oo. La interfase salina se aprecia a partir de los -8.0 msnm de profundidad, cuando la salinidad comienza a incrementarse notablemente y se considera como el límite superior de la zona de mezcla. En temporada de nortes, el límite inferior de la interfase es imperceptible y pareciera que se prolonga hasta más de los -24.0 msnm de profundidad, presentando una salinidad promedio de 5.9 o/oo y un intervalo entre 2.2 y 11.2 o/oo (superficie y fondo respectivamente). En temporada de secas, el límite inferior de la zona de mezcla se detectó a los -18.0 msnm de profundidad, con una salinidad media de 13.4 o/oo y un rango entre 3 y 38 o/oo en superficie y fondo.

23.- Planicies residuales acumulativas susceptibles de inundación. Planicies semicóncavas u hondonadas amplias limitadas por elevaciones calcáreas. Su origen está vinculado a los ciclos de

la actividad disolutiva y erosiva. Se identifican sobre un relieve negativo de fondo plano con extensos depósitos deluviales y eluviales, bajo los cuales puede haber cavidades con circulación vertical y horizontal o en donde se dispone el nivel base de un horizonte impermeable. Cuando la planicie acumulativa es cubierta por extensos depósitos de terra rosa, arcillas no solubles de la caliza, pueden llegar a azolver el nivel superficial debido al exceso de estos depósitos, deteniéndose el desarrollo de tales formas, incluso pueden formarse cuerpos de agua debido a la impermeabilidad de la terra rosa que impide que el agua se siga infiltrando.

Esta expresión representa una etapa avanzada de la carstificación de forma aislada y dispersa, y puede existir una fisonomía de peñas ruiniformes como testigos o remanentes de erosión de fases anteriores. Tienen un drenaje superficial deficiente y en su sistema hidrológico se incluyen aguadas, planicies de inundación semipermanente y de inundación estacional. Regionalmente son conocidos como "Bajos inundables". Se distribuyen en grades extensiones hacia el sur de Campeche y Quintana Roo. No hay información hidrológica disponible.

24.- Planicies residuales acumulativas susceptibles de inundación controladas estructuralmente. A diferencia del paisaje anterior estas no están limitadas por lomeríos sino controladas por morfoalineamientos que originan depresiones alargada irregulares orientadas sensiblemente en dirección norte-sur.

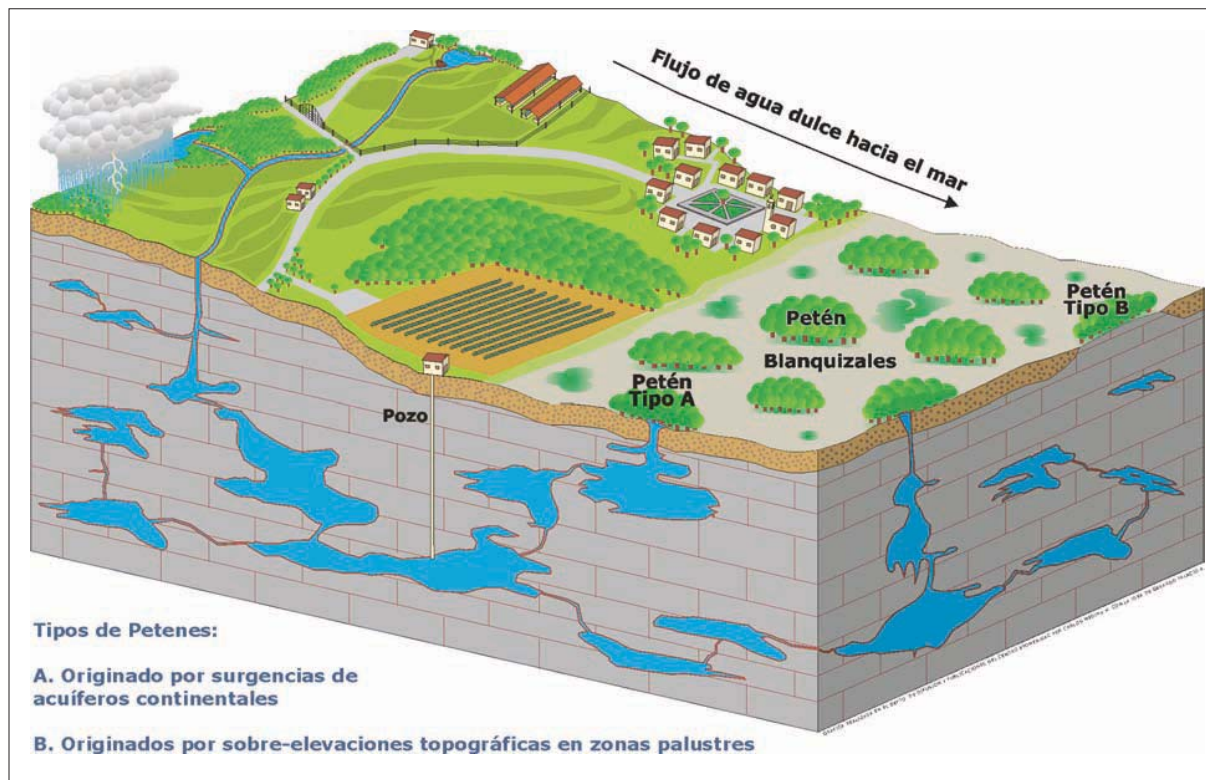


Figura 4. Diagrama bloque de los tipos de petenes en función de la evolución morfológica regional.



De acuerdo con Tulczyk y col (1993) y Southworth (1984), este control estructural se debe a una fractura tectónica regional que se extiende por más de 150 km de longitud con 30 a 40 km de ancho. La zona de la fractura denominada de Holbox cruza el plano del territorio carsificado del noreste peninsular, controlando el desarrollo de grandes y elongados canales de pisos planos. Se encuentran asociados con los lineamientos de cenotes y caletas (como Xel-Ha o Xcaret) vinculados a sistemas de fallas y fracturas. Estos canales evolucionaron de corredores de disolución cuyo piso llegó a la tabla de agua local, la cual inhibe la profundización del mismo y controla la expansión lateral para producir la típica forma de los canales con piso plano y paredes con fuerte pendiente. El piso del canal llega al nivel de la tabla de agua por procesos que combinan disolución a profundidad con el incremento del nivel del mar durante la trasgresión del Holoceno y el consecuente incremento de los niveles en la tabla de agua. Algunos de los corredores profundos de disolución fueron sumergidos formando cuencas lacustres elongadas. Los canales continuos que intersectan la costa norte soportan flujos de agua periódicos y/o episódicos. El sistema hidrológico del área es afectado no solo por los flujos superficiales sino también por una fuerte pérdida neta de agua por evapotranspiración de los extensos humedales que acompañan a estos canales y una gran descarga de aguas subterráneas hacia la costa, donde se han llegado a formar algunas corrientes permanentes. Los gradientes hidráulicos medidos en la costa oriental de la zona de fractura alcanza valores inusuales para la porción norte de la península, con 1 a 2 m km⁻¹. Esto puede ser atribuido a la descarga de aguas subterráneas en la zona de descarga que bordea la capa del acuitardo costero. A pesar de las pérdidas de agua subterránea, el espesor de agua dulce cerca del centro de la zona de fracturas de Holbox, estimado por la relación Ghyben-Herzberg, es igual a 120 m.

25.- Planicie palustre costera de inundación marina con hundimiento. Esta planicie costera es *sui generis* en su geodinámica. Presenta evidencias de hundimiento limitado por lineamientos o debilidades estructurales, donde se concentra la erosión. Está ligada tectónicamente a los basculamientos (subsistencia) de la región del Caribe.

De acuerdo a la Carta Hidrológica de Aguas Superficiales (INEGI, 1984) el área comprende las Bahías de la Ascensión y del Espíritu Santo, así como la Laguna de Chunyaxché y Felipe Carrillo Puerto, la Bahía de Chetumal, principalmente. Las aguas subterráneas en la zona del Cafetal – Mahaua tienen valores estáticos de aproximadamente 1.50 msnm, por lo que se estima un espesor de la capa de agua dulce de 38 m promedio. El agua puede considerarse potable aunque presenta cierto contenido de sales sulfatadas. En cuanto a las aguas superficiales, éstas vierten sus aguas en dos direcciones, una hacia la Bahía de Espíritu Santo y la otra hacia la Bahía de Chetumal. En el área del Cafetal a Mahaua, se observa que las corrientes superficiales van de norte a sur, hacia la Bahía de Chetumal, con velocidades de hasta 0.40 m s⁻¹. Son

preferentemente aguas oligohalinas, con bajas concentraciones de oxígeno, y concentraciones de nutrientes semejantes a los descritos anteriormente para las aguas subterráneas (Besaury *et al.*, 1995).

26.- Planicie palustre costera de inundación marina. Planicie sujeta a inundaciones constantes y periódicas de régimen intermareal. En esta planicie, primordialmente cárstica, se forman entrantes y canales regulados por los ascensos relativos del nivel del mar. Están colonizados por manglar con estructuras variables dependiendo si los emplazamientos ambientales sobre sustratos son rígidos o blandos.

La zona de descarga y exposición del acuífero representado por la cuenca de inundación costera es un área de alta evaporación e impermeable, que confina las aguas subterráneas y sus vertimientos, los cuales son muy localizados (cenotes en petenes y en el mar, manantiales, etc.). Entre la duna costera y la llanura cárstica, el acuífero yucateco se confina por una capa de calcita precipitada por evaporación denominada localmente “caliche” principalmente en la porción norte de la Península, que cementa los poros y las fisuras de la coraza calcárea superficial, y cuya formación continúa hasta nuestros días, precisamente en la zona de descarga continental del acuífero en la costa: la zona denominada localmente como “tsekel” (sabana, selva inundable), la cual se caracteriza por una aparente falta de suelo.

El ambiente geoquímico propicio para la formación del acuitardo costero que menciona Perry, *et al* (1991) indica una diagénesis subaérea como el mecanismo principal para la formación de caliche, el cual requiere una fuente de calcio y carbonatos y un mecanismo de concentración (evaporación). Los primeros son proporcionados por afloramientos de agua subterránea, y el segundo ocurre acorde con las variaciones estacionales de más de 20 cm en los niveles freáticos. La precipitación de carbonatos, estacional y continua, durante un periodo de lenta elevación del nivel del mar pudo sellar muchas de las fisuras. Los cenotes costeros de las áreas palustres resultan demasiado grandes como para ser afectados por este proceso (Marín *et al*, 1988) y representan los principales accidentes del acuitardo costero.

Esto trae como consecuencia dos aspectos interesantes: primero, que a una distancia de 5 a 7 km de la costa, hacia tierra adentro, el acuífero presenta cabezas hidroestáticas que varían (en respuesta a la variación del nivel de marea de 1 m) de 0.32 a 0.77 m por encima del nivel medio del mar (0.55 m en promedio) y es significativamente mayor que el nivel de las aguas durante la temporada de lluvias. Más aún, al sur del margen de la llanura cárstica (aproximadamente 7 km arriba) el acuífero es aproximadamente 0.62 m por encima del nivel medio del mar; segundo, el caliche se extiende, en algunas zonas más de 3 km mar adentro, donde inicia un proceso de destrucción debido principalmente a organismos incrustantes.

En condición de estado estacionario, el flujo estimado que se descarga hacia la zona costera es de $0.27 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}/\text{km}^{-1}$ de costa yucateca, (Lesser, 1976); al NW de la península, en la zona de petenes, uno de los cenotes presentó flujos mayores a $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Perry *et al.*, 1989); en la ría de Celestún se estimaron flujos subterráneos que varían de $6.75 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ en temporada de lluvias a $1.21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante el estiaje; en un ojo de agua del Refugio Pesquero de Sisal se reportan descargas de $0.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante la secas (Batllori, 1991).

En condiciones extremas, como en el caso del huracán "Gilberto", se generaron marejadas con una amplitud mayor de 7 metros, las cuales invadieron aproximadamente 5 kilómetros tierra adentro. Este fenómeno modificó significativamente la dinámica del acuífero a 25 km de distancia de la línea de costa, principalmente en la región noroeste de la Península, donde un día después del huracán, los niveles freáticos se incrementaron entre 0.64 y 1.1 m. Las elevaciones producidas en la zona de influencia costera sufrieron incrementos adicionales de 0.50 metros en comparación a otros sitios localizados más al sur de la franja de 25 kilómetros antes mencionada. En condiciones normales de recarga, el nivel de agua en los extremos se incrementa de manera muy similar con diferencias de algunos centímetros, manteniendo el flujo natural hacia el mar (Villasuso *et al.*, 1989).

En el caso de Telchac, se muestran planos de las Secciones Geoelectricas para Dzemúl-Xtampú y resalta el hecho de que la caliza saturada de agua salobre se presente a casi 5 km de distancia de la costa al interior, promoviendo un gran blanquizar con fuertes cristalizaciones de sal y manglar con fuertes problemas fisiológicos de estrés salino. Para el caso de la Sección Geoelectrica de Telchac Pueblo – Telchac Puerto, este tipo de caliza con agua salobre no se presenta cercano a la costa, por lo que la presencia de una capa de agua dulce de 5 metros de espesor se extiende hacia San Crisanto, donde abundan los bosques de manglar con gran presencia de surgencias. A 7.5 km de distancia, la lente de agua dulce se incrementa de casi 10 metros en Dzemúl a mas de 30 en Telchac y Sinanché. Lo anterior deja ver la posibilidad de la presencia de flujos preferenciales en el área.

Los estudios hidroquímicos del acuífero costero muestran que los elementos calcio y magnesio alcanzan sus máximas concentraciones durante la época de lluvias, con valores de 96 y 35 mg/L^{-1} , respectivamente. El cloro se comporta de manera similar y alcanza valores promedio de 135 mg/L^{-1} (Villasuso *et al.*, 1989). En términos generales, los elementos sodio y cloro se localizan principalmente en las zonas costeras, indicando la presencia de agua de mar. Las concentraciones de magnesio aumentan gradualmente conforme nos acercamos a la costa y el calcio se comporta más homogéneamente. Es importante señalar que durante la época de lluvias y principalmente durante los nortes, el agua subterránea que alcanza a las aguas protegidas de la costa vierte una gran cantidad de nutrimentos primarios, esenciales para la producción biológica como: silicatos, nitratos, nitritos y carbonatos (Herrera, 1988; Valdés *et al.*, 1988; y Trejo, 1988). Es

precisamente este flujo advectivo de agua procedente del acuífero, el que mantiene las bocas de las rías abiertas, ya que de otro modo, los procesos litorales no tardarían mucho en azolverlas.

Existe una respuesta en los niveles del acuífero a las diversas perturbaciones, principalmente hidrometeorológicas, pero también se presentan respuestas en el acuífero por perturbaciones de periodo corto, como son las mareas. Sin embargo, las aguas superficiales de la ciénaga litoral y el manglar de cuenca, no responden significativamente a las oscilaciones de la marea en áreas sin contacto con el mar. Su dinámica puede estar determinada por los vientos locales, la precipitación pluvial, la evaporación y por la marcha anual de marea. Por otro lado, la respuesta observada en las fluctuaciones de nivel freático, permite clasificar al acuífero subterráneo costero en dos tipos: 1) Un acuífero cárstico homogéneo en cuanto a la roca, que en la costa subyace al caliche costero, representado por sus expresiones expuestas como son los cenotes y manantiales y 2) Un acuífero edáfico que sobreyace al caliche costero, representado por la barra arenosa con suelos tipo Regosol y el petén con suelos hidromórficos del tipo Histosol. Un aspecto interesante que se debe notar es que algunos cenotes pueden caracterizarse como lagos cársticos maduros, con respuestas hidrológicas independientes del acuífero regional. El cenote Chulchacá y el Kana son ejemplos de este tipo.

A lo largo de la línea de costa peninsular, el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de ésta. El contacto entre las dos masas de agua, conocido como "interfase salina" se encuentra en equilibrio dinámico, por lo cual, las modificaciones en las condiciones originales del acuífero, producen cambios en la posición del contacto entre las dos masas de agua (Lesser, 1976). Actuando simultánea o alternadamente, la recarga y la descarga del acuífero provoca oscilaciones estacionales en sus niveles de agua, con abatimientos en los estiajes y ascensos en las temporadas de lluvia, oscilaciones cuya magnitud es apenas de unos cuantos centímetros. Además, la evapotranspiración, los cambios en la presión atmosférica y la influencia de las mareas en la faja costera, provocan fluctuaciones diarias y estacionales. Pese a su reducida magnitud, estas pequeñas oscilaciones son de consideración, porque provocan fuertes movimientos de la interfase salina y, en consecuencia, hacen variar notablemente el espesor de agua dulce del acuífero. La importancia práctica de este fenómeno se manifiesta si se toma en cuenta, por ejemplo, que en respuesta a un abatimiento de 10 cm del nivel freático, la interfase salina asciende 4 m en el mismo sitio, y, con ello, el espesor del acuífero dulce decrece en la misma medida (SARH, 1988).

En este punto los estudios de Perry *et al.*, (1989) y los de Marín (1990), destacan que la ruptura del caliche costero por la construcción de dársenas como Yucalpetén y Dzilám de Bravo, las cuales sufrieron alteraciones en la roca por efecto de dragado, han colapsado los niveles freáticos en 30 cm, reduciendo la lente de agua dulce a 14 m en lugar de los 20 m que presentaba. Este efecto se extiende a casi 40 km tierra adentro, disminuyendo proporcionalmen-



te la lente de agua dulce, exponiendo a los sistemas de riego y captación de agua dulce en riesgo de salinizarse más fácilmente sin incrementar el bombeo, además de exponer nuevas áreas del carso a procesos disolutivos en la interfase salina.

Widie (1985) concluye que la densidad máxima de fracturas en la zona oriental de la Península está muy relacionada con las altas incidencias de caletas, las cuales se desarrollan formando bahías cuspidas. Back y Hanshaw (1982), sostienen que los extremos terminales de las caletas y sus playas asociadas tipo media luna, son expresiones geomórficas de los procesos geoquímicos en la zona de mezcla. En los estadios iniciales de desarrollo, el incremento en la porosidad y permeabilidad en la zona de dispersión puede derivar en la formación de cavernas. A medida que la disolución aumenta, el techo de la caverna se colapsa y forma lagunas elongadas y rectilíneas (como Xel-Ha). La disolución subsecuente en el frente marino lagunar forma una caleta rectangular para que, finalmente, las cabezas continentales de los extremos de la caleta sean erosionados, tanto por disolución de las descargas subterráneas como por la acción de las olas, formando playas tipo media luna.

Las relaciones entre el sistema de fracturas y el origen y desarrollo de las caletas y playas asociadas a lo largo de la costa Este de la península han sido demostradas por Back *et al* (1979). Dichas fracturas actúan como conductos donde se mezclan las aguas dulces del manto freático y las aguas marinas, donde la solución resultante se encuentra subsaturada de calcita y causa una disolución máxima de la roca calcárea. Back y Hanshaw (1982), sostienen que los extremos terminales de las caletas y sus playas asociadas tipo media luna son expresiones geomórficas de los procesos geoquímicos en la zona de mezcla. En los estadios iniciales de desarrollo (como Xcaret), el incremento en la porosidad y permeabilidad en la zona de dispersión puede derivar en la formación de cavernas. Un ejemplo similar es Yakbul. Al intensificarse la disolución se producen cavernas anchas y en ocasiones de techos altos, siguiendo los planos de estratificación. Al colapsarse los techos de las cavernas se producen cenotes como los observados en el área, presentes tanto en cavernas y manantiales como aquellos que se caracterizan por presentarse en forma de sashcaberá, es decir, que en su estado actual no presentan cuerpos de agua sino más bien en enterramiento, donde los suelos cubren parcialmente algunos de estos accidentes.

La disolución estimada para la región continental de Xel-Ha alcanza la cifra de 37.7 toneladas métricas anuales por kilómetro cuadrado de carso. En el caso de la región costera la disolución de un bloque similar y de 3 metros de espesor puede ser de 860 toneladas métricas por km de costa, asumiendo un gasto de $0.272 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$ lineal propuesto por Lesser (1976) lo que llevaría más de 8,000 años en realizar una incisión del tipo Xel-Ha. Sin embargo, los mismos autores mencionan que en esta caleta el gasto estimado es nueve veces mayor que el anterior, por lo que la capacidad de disolución pudo causar la incisión química de Xel-Ha en 3,000 años o menos (Hanshaw y Back, 1980), considerando que la densidad de la roca caliza es de alrededor de 2.4 toneladas por metro cúbico.

Brady (1978), menciona que las ciénagas y marismas que bordean las lagunas costeras al norte de Xel-Ha se formaron hace menos de 5,000 años, cuando el nivel del mar era 3 a 5 metros menor que el nivel actual. Por lo tanto, la zona activa de mezcla o dispersión debió encontrarse a varios kilómetros mar adentro de la ubicación actual de Xel-Ha. De esta manera, el desarrollo de esta caleta debió ocurrir hace menos de 5000 años (Hanshaw y Back, 1980). En el caso de Xcaret, se tiene un gasto aproximado de $1.34 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$ (Moore, 1992 y Stoessell *et al.*, 1989) que multiplicado por la tasa de disolución de $1.23 \text{ mmol}/\text{L}^{-1}$ ó 0.012 kg m^{-3} (Back *et al.*, 1979), se tiene una disolución de 507 toneladas métricas de material calizo que se pierden cada año. Si consideramos que un área de 100 m de ancho por 500 m de largo aproximadamente, que ocupa la zona central de los dos ríos subterráneos de Xcaret ($50,000 \text{ m}^2$), y consideramos un espesor medio de 2 m por debajo de la tabla de agua (donde se realiza la máxima disolución) tenemos una masa calcárea de 240,000 toneladas métricas que puede ser disuelta en un lapso de 473 años. Una reflexión obligada en este momento sería si el desarrollo impulsado en la zona y la modificación al sistema hidrogeológico incrementará el potencial de disolución a un gasto similar a Xel-Ha, el tiempo de disolución de todo el macizo considerado sería de 260 años. La incógnita sería: ¿En qué momento se presentarán las primeras afectaciones puntuales en el corto plazo (10 a 25 años) como nuevos desplomes de techos en cavernas o en la zona de fracturas del Río I? En este sentido, de acuerdo con Stoessell *et al* (1989), el agua subterránea en la costa oriental de la PY está subsaturada con respecto a la aragonita y la calcita dentro de un amplio rango de salinidades, incluyendo agua hasta en un 95% de mar para la aragonita y hasta 90% para la calcita. La mayor disolución de aragonita y calcita ocurre a concentraciones de entre 20 y 80% de agua de mar.

Moore *et al* (1992) realizaron estudios en la región oriental de la Península sobre los flujos de agua subterránea, cabezas hidráulicas y perfiles verticales de conductividad. Las cabezas hidrostáticas variaron de 40 a 60 cm por encima del nivel medio del mar entre 2 a 4 km de la costa. Las velocidades de flujo estimado en la zona de medio poroso no asociado a grandes fracturas fueron, de 0.021 cm s^{-1} en la lente de agua dulce y de 0.082 cm s^{-1} cercano a una fractura en la zona marina subyacente. Las velocidades en grandes fracturas se incrementan de 1.0 cm s^{-1} a 10 km de la costa hasta 12 cm s^{-1} cerca de los puntos de descarga en la costa. Se menciona en estudios previos que la conductividad hidráulica en el área del cenote de Xcaret es de 19 cm s^{-1} asociado a la zona de fractura y se estima una renovación de sus aguas aproximadamente de 24 a 36 hr.

En este sentido, Stoessell *et al* (1989) detectaron la interfase salina en el cenote Xcaret, en las cuencas escalonadas, encontrando que el porcentaje de agua de mar oscila desde 40 % en la superficie hasta 88.7 % a 4 m de profundidad. De esta manera, existe fuerte evidencia de que la continua disolución se da de 1.5 a 2.5 m por debajo de la tabla de agua, donde el agua incrementa su salinidad

rápidamente de 40 a 75 % de agua de mar en su composición. A este nivel se produce una disolución activa de la caliza.

27.- Planicies altas denudativas mayores de 200 msnm con lomeríos aislados. Son las planicies más altas de la PY. Son denominadas también mesas o mesetas para distinguirlas del resto de las planicies. Se refiere a la morfología de estructura tabular de disposición concordante (mesetas, mesas, cuevas y terrazas) ligeramente inclinada.

Son terrenos elevados y llanos, de estructura tabular o monoclinal ligeramente inclinada. Están constituidos por estructuras sedimentarias originalmente depositadas en cuencas, valles u hondonadas. Estas estructuras tienen un relieve mesiforme, que no es sino una llanura preexistente que ha sido elevada por movimientos tectónicos o bien exhumadas por denudación planar.

La misma superficie y la escasa pendiente, favorece la acción de los procesos de denudación planar o sea, los que tienen un efecto de despliegue en manto, sin embargo, en los flancos de las mesas domina el proceso de disección (erosión), a costa de ir reduciendo el área de la superficie tabular. Puede estar presente la combinación de los procesos de denudación y erosión. En el trópico la superficie del relieve adquiere un arreglo de cúpulas multiconvexas aisladas.

En el municipio de Othón P. Blanco existe una zona que limita al occidente con el Estado de Campeche, donde se encuentran calizas con interacciones de margas y yesos pertenecientes a la formación Icaiché, las cuales por ser de origen lagunar con yesos y anhidritas contamina el agua dando una pésima calidad, son calizas con interacciones de yesos y margas que originan por su composición litológica cierta impermeabilidad, donde hasta la fecha ninguna perforación con fines de obtener agua de buena calidad ha tenido éxito, como lo indican los pozos perforados en Zoh-laguna y Guillermo Prieto a 315 y 199 m de profundidad respectivamente (CNA, 1991). Los pozos representan la región denominada meseta de Zoh-Laguna.

28.- Planicie estructural baja con acumulación fluvio-deluvial. Se ubica justo en la transición entre los ambientes terrígenos y los cársticos. Es una planicie estructural cubierta por el aporte de sedimentos, tanto de los lomeríos cársticos adyacentes como de los cursos fluviales que reconocen la zona de depositación y que provienen de las montañas plegadas de Chiapas.

Son zonas de relleno o colmatación de sedimentos con formaciones estratigráficas de series del mismo tipo, resultando de unas asociaciones litológicas específicas. Conviene recalcar que en las áreas adyacentes o de articulación de la cuenca los sedimentos proximales son complejos, de mayor diversidad, heterogéneos en composición, calibre y fuente. La característica fundamental son los cambios de facies fuertes y abruptas o contrastantes sobre distancias pequeñas, mientras en la porción distal o central hay una sedimentación más fina y uniforme, las capas presentan cierta homogenei-

dad de depósito. Geológicamente es uno de los paisajes más jóvenes de la PY.

Cerca de la costa existen estratos geológicos del cuaternario (Holoceno y Pleistoceno) que descansan sobre rocas del Miembro Pisté y del Miembro Xbacal (Eoceno) y rocas no diferenciadas del Paleoceno. En esta región la geología es simple puesto que solo afloran grandes extensiones de depósitos aluviales. Tomando como referencia información de pozos exploratorios perforados por PEMEX, se determinan espesores que varían de 250 a 300 m. Estos depósitos descansan sobre lutitas y areniscas del Mioceno superior atravesando columnas constituidas por depósitos clásticos correspondientes con los primeros depósitos pliocuaternarios. También se han detectado afloramientos de arenisca roja. Transicionalmente se registra una franja donde predominan las arenas, ocasionalmente arcillosas. En el área central, los niveles del agua subterránea son someros a pesar de que se tienen estratos arcillosos en este punto y debido a esto, la capilaridad del terreno facilita la influencia de la evapotranspiración; no hay ninguna evidencia de que exista un factor externo que influya en la región y pueda cambiar dichos niveles en corto plazo. Este acuífero está subexplotado y se le considera como de alta vulnerabilidad a la contaminación.

Existe disponibilidad de aguas superficiales (como ríos y deltas) y la calidad de las aguas subterráneas excede las normas de calidad para cloruros, sulfatos, conductividad eléctrica, sólidos totales y coliformes totales (con los valores más altos de la PY).

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN AZONAL

Este sistema se refiere a un patrón de distribución espacial distintivo que no abarca grandes extensiones reconocibles por su morfogénesis o su expresión morfológica o que es repetible por analogía sin tener necesariamente la misma morfogénesis. Algunos paisajes tienen una expresión espacial de conjunto con fines cartográficos, debido a que su expresión areal individual a escalas medias y pequeñas no es representable en el mapa.

29.- Dolinas agrupadas. Las dolinas son circulares o subcirculares en planta, de diámetros que varían entre unos pocos metros hasta un kilómetro. Sus bordes pueden ser verticales o inclinados. La mayoría son originadas por disolución en diferentes estilos, desde las originadas en superficie propiamente por disolución hasta las de colapso por disolución subterránea. Son la representación más típica del relieve cárstico en superficie, en fases de carsticidad reciente y de juventud.

Su representación cartográfica son conjuntos de dolinas inundadas o cenotes, claramente identificables.

Las dolinas agrupadas (o anillo de cenotes) son un conducto de alta permeabilidad (Velázquez, 1995), que capta agua subterránea procedente del sur y la transporta



a lo largo de territorio hacia la costa. Esta hipótesis se apoya en las siguientes evidencias: 1) El decremento en la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^{-1}$, conforme los sitios están más al oeste acercándose al semicírculo; 2) La semejanza de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^{-1}$ con la del agua de mar, en los sitios que se encuentran en la parte interna del anillo; y 3) La presencia de agua dulce (ojos de agua) en las Bocas de Dzilám (costa este) y el estero de Celestún (costa oeste). Los resultados de pruebas en pozos profundos monitoreados por la UNAM indican que el frente de la intrusión salina llega hasta aproximadamente a 110 km de la costa norte, la cual es apoyada por los sondeos eléctricos y mediciones del espesor saturado de agua dulce.

El flujo de agua dulce que desemboca en las costas este y oeste es evidencia de un parteaguas en el anillo de cenotes, el cual se ubica aproximadamente al sur de Telchaquillo. Las evidencias para esta hipótesis son: 1) El cambio en los valores de la relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^{-1}$ que venían observándose en la parte oeste del área. Este cambio se presenta a partir de Telchaquillo hacia el este; 2) El decremento de la relación Sr/Cl , hacia el este y oeste a partir aproximadamente al norte de Tekit.

Los índices de saturación del agua subterránea con respecto a los minerales de celestita, anhidrita, yeso y halita, las relaciones $\text{Sr}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$, $\text{Sr}^{+}/\text{Cl}^{-}$, $\text{Na}^{+}/\text{Cl}^{-}$, exceso Ca^{2+} , exceso SO_4^{2-} y la propia relación $\text{SO}_4^{+}/\text{Cl}^{-}$, indican que los procesos geoquímicos que controlan el sistema hidrogeológico de la zona son: 1) La intrusión salina; 2) La disolución de especies de carbonatos, y 3) La disolución de otras fases químicas como yeso, celestita, anhidrita y halita. Con esos resultados se sabe que el sulfato, estroncio, sodio y cloruro se incorporan al sistema por disolución de evaporitas, además del mar, como otra fuente. La relación K/Cl en algunos lugares como Peto, Abalá, Telchaquillo y Sotuta es mucho más alta que en el mar. Posiblemente esto refleje la contaminación antrópica por el uso de fertilizantes en la zona frutícola.

30.- *Dolinas agrupadas y en proceso de formación de uvalas*. Debido a que las dolinas entran en etapa de juventud, tienden a unirse formando uvalas que tenderán con el tiempo a convertirse en poljes, si no hay una interrupción del ciclo.

31.- *Bajos intermareales*. En ambientes costeros bajos, la pendiente de playa, las corrientes litorales y la acumulación de materiales terrígenos y marinos, propician la sedimentación del acarreo costero. Así un conjunto de sedimentos móviles se establece con cierta inestabilidad llegando a tener expresión morfológica en superficie. No hay información hidrológica disponible.

Son deltas interiores, flechas y cordones fragmentados por canales sujetos a inundación intermareal. Tienen una configuración frágil e inestable en relieve emergido. No hay información hidrológica disponible.

32.- *Planicie estructural baja de resurgencias sobre ambientes palustres*. Aunque esta planicie es carso-tectónica lo relevante es que se encuentra

rodeada de ambientes costeros deposicionales. A pesar de tener la potencialidad de originar petenes, las condiciones ambientales propias del emplazamiento, no lo han permitido. No hay información hidrológica disponible.

33.- *Lecho cárstico pseudo-fluvial*. - es un paisaje único dentro del sistema carso-tectónico de la península. Tiene su origen 13 km tierra adentro en resurgencias permanentes. Sobre sus márgenes se establecen especies de manglar y en su desembocadura se forma un pequeño delta de sedimentos carbonatados. Es probablemente resultado de la unión de puntos de debilidad estructural-disolutiva sobre los cuales el aporte constante de agua del continente, encontró la menor oposición para su desagüe. Debido a la movilidad constante de importantes volúmenes de agua se le asocia un comportamiento hidrodinámico similar al de un río. Sobre sus márgenes se establecen especies de manglar y en su desembocadura se forma un pequeño delta de sedimentos carbonatados. No hay información hidrológica disponible.

34.- *Lecho fluvial*. - Consiste de una corriente distante pero de carácter autóctono, cuya fuente se genera en planicie estructural baja, pero con fuerte control estructural tanto en plano horizontal como en el vertical, por ende se haya diseccionando la planicie en materiales calcáreos consolidados.

35.- *Rampa cárstica denudatorio-erosiva*. Tiene una expresión morfológica similar a una rampa de piedemonte, es de homogeneidad impresa por el modelado de la denudación planar o mantiforme con algunos rasgos evidentes de disección. Esta rampa se encuentra entre un bajo inundable extenso y una zona de lomeríos.

Las características de erosión, denudación y acumulación guardan un equilibrio relativo en términos de una uniformidad constante, prolongados estadios de estabilidad endógena propician que la superficie de la rampa permanezca aparentemente paralizada, debido a las condiciones de estabilidad derivadas de la aproximación al perfil de equilibrio entre las porciones altas, (de remoción) y las bajas de acumulación, en donde las pendientes de la superficie de la rampa y de la zona fuente, son tan débiles que la erosión y la acumulación casi se suprimen. Estas propiedades tienen lugar con una escasa amplitud vertical del relieve, con un perfil longitudinal de pendiente suave y de geometría cóncava-rectilínea. No hay información hidrológica disponible.

36.- *Planicie estructural ondulada de transición entre pliegues bloque*. Es una planicie mesiforme de más de 50 msnm. Superficialmente se le reconoce porque hay una fase de sedimentación autóctona con relleno de las cavidades exocársticas. Los procesos típicos son de infiltración y desplome por acción del manto freático cercano. Hay comúnmente elevaciones residuales, de cerros o peñas cársticas asociados con el paisaje erosivo del ciclo anterior. No hay información hidrológica disponible.

Los paisajes geomorfológicos guardan una estrecha relación con la distribución de las familias de aguas. En el siguiente mapa (Fig. 5) se muestra explícitamente la distri-

bución de la calidad natural del agua y su relación con los compuestos químicos más abundantes.

SUELOS

CLASIFICACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE SUELOS

En un panorama general y de acuerdo con la información generada por el INEGI sobre los suelos de la PY, tenemos lo siguiente:

La PY cuenta con una superficie de 13600198 ha en la que se han identificado 3024 polígonos o unidades de mapeo (Fig.6), 187 asociaciones y 13 Unidades de suelo (según la FAO *et al.*, 2001). Sólo el 2.6% de las unidades de mapeo presentan perfiles descritos y con datos analíticos. La parte centro, sur y sureste son las que tienen un mayor número de unidades de mapeo a escala 1:250000.

Las asociaciones de suelos con mayor extensión son E + I (Rendzina más Litosol, 34%), E + I + Lc (E + I + Luvisol crómico, 10%); Gv (Gleysol vértico, 9%); E + Gv + I (5%); E + Lc + I (3%); E + Bc + I (E + Cambisol crómico, 1.2%); E + I + Bc (2%); E + I + Vp (E + I + Vertisol pélico 2%); E + Ne + Lf (E + Nitosol eutricto+ Luvisol férrico, 2%); Lc + E + I (2%); Rc + I + Zo (Regosol calcárico+ I + Solonchak ócrico, 2%); Vp + Gv + E (1%), E + I + Nitosol eutricto (1%); I + E + Lc (1%) y Otros (24%). Es decir, dominan las asocia-

ciones con suelos poco profundos o Leptosoles, de reciente formación, Bc o Cambisol crómico que son suelos de escaso grado de desarrollo pedogenético.

Considerando únicamente los suelos dominantes por asociaciones se tiene la siguiente situación: E (50.3%) suelos pedregosos, poco profundos, con roca calcárea en la parte baja; I (16.7%) suelos con afloramientos rocosos; G (15.5%); Suelos que presentan condiciones reductoras o una tabla de agua cercana a la superficie, L (4.44%) con acumulación de arcilla en el horizonte B; V (3.02%) con *smectita* que presentan grietas profundas, caras de deslizamiento y relieve en *gilgai*; Z (2.79%) suelos salinos; R (2.35%) suelos con material suelto sin o muy débil desarrollo pedológico; B (2.2%); N (1.3%) con acumulación de arcilla en el horizonte B, con colores brillantes y de menor saturación de bases; O (0.57%) histosoles ricos en materia orgánica fresca o parcialmente descompuesta, H (0.44%) feozems con abundante materia orgánica y de color oscuro, J (0.01%) fluvisoles presentes en planicies de inundación o depósitos aluviales y K (0.06%) castaños ems ricos en materia orgánica que presentan color café o castaño. Los suelos de mayor

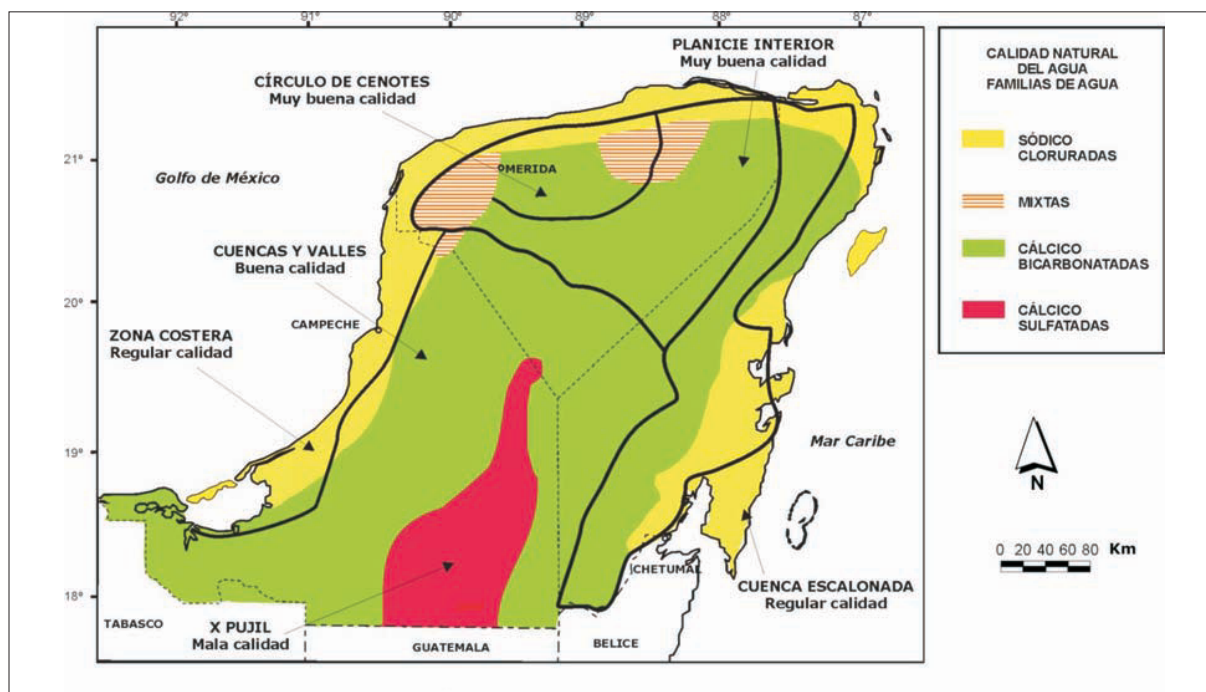


Figura 5. Zonas geohidrológicas de la Península de Yucatán. (CNA, 1996).



extensión son las Rendzinas y los Litosoles 67% en las zonas cársticas; Gleysoles (15.5%) en las zonas costeras; Luvisoles (4.44%) en planicies cársticas; Vertisoles (3.02%) al sur y al noreste; Solonchak en la zona costeras, Regosol e Histosol en el litoral y planicies costeras principalmente (Fig. 6).

En la PY hay suelos de escasa importancia agrícola como los Litosol, Rendzina, Solonchak, Gleysol, Regosol,

Histosol y Solonetz. Pero, con excepción de los dos primeros, se encuentran en zonas de gran interés ecológico y ambiental, como los petenes, manglares y planicies costeras. Estos suelos constituyen una barrera natural que evita el avance del agua de mar hacia el continente, de manera que deben conservarse para evitar la salinización de los suelos de mayor importancia agrícola. Además se encuentran en zonas de gran importancia biológica y turística (Tabla 2).

Tabla 2. Definiciones breves sobre los suelos de la Península de Yucatán.

Cambisol (B).	Son suelos jóvenes y pocos desarrollados pueden presentar ligera acumulación de arcilla, CaCO_3 , Fe, Mn, etc. Estos suelos son altamente susceptibles a la erosión.
Castañozem (K).	Presentan una capa superior de color pardo o rojo oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes; y acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo
Feozem (H).	Tiene una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes.
Gleysol (G).	Suelos que se inundan en alguna época del año se caracterizan por presentar colores grises, azulosos o verdosos que al secarse y exponerse al aire pueden presentar manchas rojas.
Litosol (I).	Suelos con una profundidad menor a los 10 cm.
Luvisol (L).	Suelos que tienen un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo, son levementes ácidos y altamente fértiles, son de color rojo o pardo rojizo.
Nitosol (N).	Suelos muy profundos (más de 150 cm), enriquecidos con arcilla y son de color rojo.
Regosol (R).	Suelos que no presentan diferenciación clara entre los horizontes.

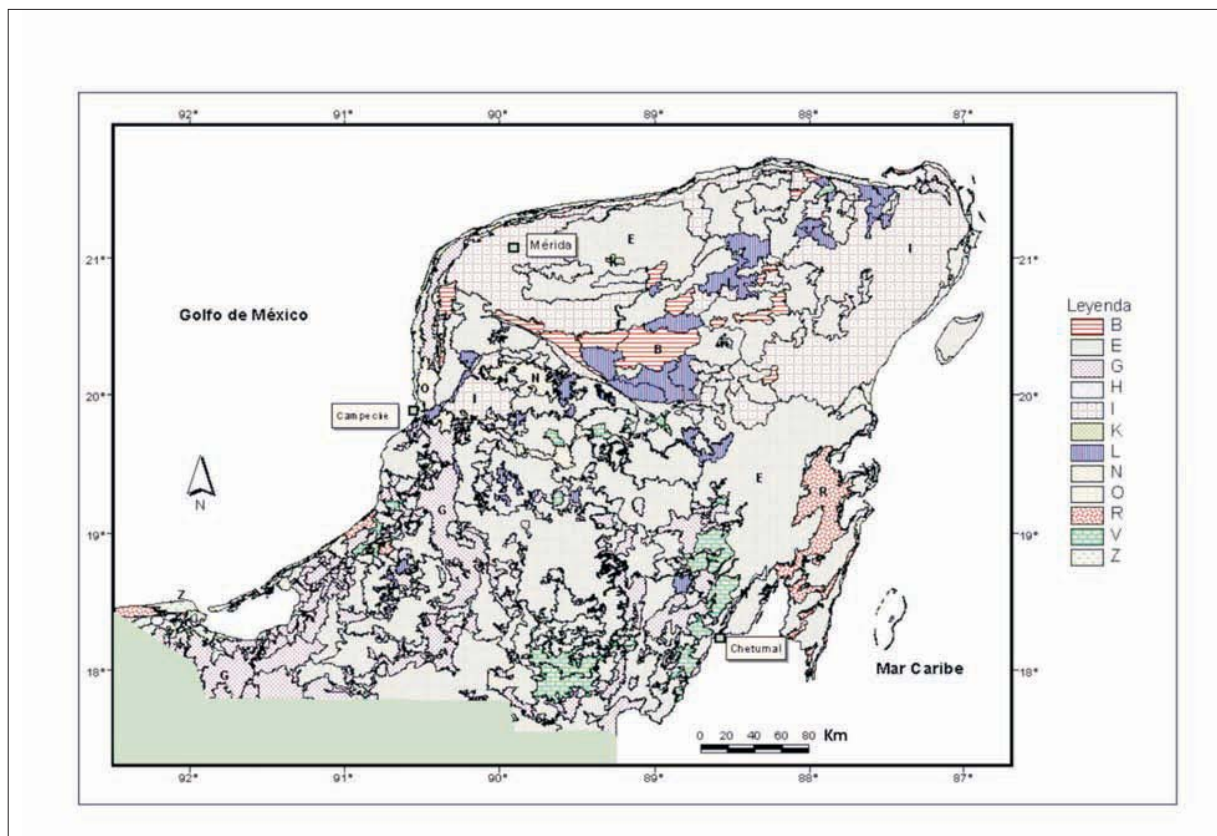


Figura 6. Mapa de suelos de la Península de Yucatán. (INEGI, 1987)

DISCUSIÓN

Al tipificar la morfología superficial y su estadio evolutivo se tiene una primera aproximación de la susceptibilidad natural a la inestabilidad ambiental, a los procesos erosivos, acumulativos y de inundabilidad relativa. Al mismo tiempo la evolución del relieve nos permite inferir las etapas sucesionales de los paisajes. En otras palabras se puede identificar el paisaje geomorfológico y su grado de estabilidad o consolidación. Este conocimiento es básico también para la delimitación de unidades del paisaje en donde se enfatiza la homogeneidad en la distribución de sus componentes y su funcionalidad ecológica. De esta forma se puede identificar su función ecológica, como hábitat, conector biológico natural y centro de dispersión de las especies animales y vegetales entre otras.

Por otro lado, a continuación se mencionan cinco ejemplos del conocimiento geomorfológico aplicado a zonas con desastres ambientales.

- Se tienen registros de una pérdida rápida de las tierras bajas costeras debido a la erosión acelerada de las costas sujetas a retroceso. Las zonas sujetas a inundación con la sobreelevación del nivel del mar por mareas de tormenta indican que se está llevando al cabo la introducción de la cuña marina con una distribución no uniforme y de manera irregular (Ortiz y Méndez, 1999).

- La zona de Petenes que es una planicie de inundación y por lo mismo es de alto riesgo de ocurrencia de dicho fenómeno. Si el nivel del mar aumentara un metro o el hundimiento se intensificara, el agua de mar alcanzaría una penetración de 16 km tierra adentro equivalente a 520 km². El asenso del mar podría acelerarse por la destrucción del manglar (Ortiz y Méndez, 1999).

- Las modificaciones al ambiente en la bahía de Sian Ka'an-Chetumal, así como el proceso de hundimiento, por ser una zona tectónicamente activa, ocasionaría que un hundimiento de 1 m repercuta en la pérdida de 585 km² de superficie de la costa (Ortiz y Méndez, 1999).

- La conservación de la vegetación disminuye considerablemente los efectos negativos de las tormentas. Estudios realizados en Ciudad del Carmen demuestran que las zonas de alto riesgo por la acción del oleaje se encuentran a 80 m de la costa, aumentando a 300 m por la pérdida de la vegetación (Palacio *et al*, 1999).

- La situación actual de la costa es de fuerte inestabilidad, donde los procesos erosivos en las playas dominan y donde se predice un incremento acelerado del nivel del mar por fenómenos como el calentamiento global, además del fuerte impacto que la infraestructura habitacional y productiva construida sobre la primera duna costera y frente a la playa.

Por otro lado, la geomorfología de la PY es bien conocida a escalas medias como 1:250,000. Sin embargo, es necesario profundizar en la tipificación de los estadios evolutivos del karst en función de la expresión morfológica. Es necesario consolidar un sistema de clasificación de geoformas epicársticas e hipocársticas para las estructuras tabulares o de mesa predominantes en la PY. Es fundamental la identificación de los tipos de karst (cubier-

tos o desnudos) bajo condiciones climáticas específicas y en zonas de inundación, esto con el fin de asociar el karst a las condiciones ambientales recientes.

El conocimiento hidrológico actual se concentra en las porciones litorales y de inundación costera, particularmente en la porción noroccidental y nororiental de la península, así como también sobre el llamado anillo de cenotes y la cuenca de Chicxulub. Sin embargo, es evidente la falta de entendimiento en muchas otras regiones, como la de sistemas carso-tectónicos, particularmente aquellos relacionados con los bloques y lomeríos, al igual que la porción de cuencas escalonadas. En los sistemas azonales, prácticamente no se ha generado información a excepción de las dolinas agrupadas. Lo anterior marca las necesidades futuras de investigación en la región.

En términos de cuenca hidrológica o zona geohidrológica, la PY afronta una variedad de impactos derivados del desarrollo socioeconómico, que deben ser atendidos, dadas las complejas relaciones geográficas, biológicas, hidráulicas y sociales entre sus zonas de recarga continental y descarga costera, fundamentalmente.

La principal afectación está dada por la industria minera, cementera y de la construcción debido a sus necesidades de suelo, piedra, grava y sashcab. Se localizan principalmente en los alrededores de los centros urbanos y caminos de acceso, estas extracciones sobrepasan el nivel freático exponiendo las aguas subterráneas a la evaporación. Al ser abandonados, se utilizan como tiraderos de basura, constituyéndose como un foco de infección para la comunidad y contaminación del acuífero. A largo plazo es de esperarse derrumbes y hundimientos en la estructura geológica. Actualmente algunas empresas están atendiendo este tipo de problemas evitando la extracción de material hasta el acuífero, recolectando el suelo y utilizándolo en la reforestación.

En ausencia del apropiado sistema de manejo de residuos sólidos y líquidos, la contaminación de los humedales aumenta rápidamente, aunado al desarrollo urbano y turístico y al aumento del uso de combustibles fósiles para mover los motores (barcos de pesca y turismo, autos, camiones), uso de agroquímicos y la cacería (perdigones).

El volumen de explotación social de las aguas del manantial freático no representa, en la actualidad, una amenaza potencial que modifique la dinámica hidrológica general, con excepción de la ciudad de Mérida. Sin embargo, el manejo inapropiado del recurso produce alteraciones en sus características físico-químicas y biológicas que resultan contraindicadas para el consumo e ingesta en niños menores de cinco años, principalmente.

Las aguas de desecho agropecuarias, municipales, industriales y domésticas en su mayoría no reciben tratamiento alguno, solo se decantan los sólidos y se vierten a un pozo de absorción que conduce directamente al acuífero, contaminándolo. En muchas localidades costeras, el agua es de mala calidad y salitrosa, se producen muchas afecciones gastrointestinales entre la población infantil y se reduce el potencial pesquero al recibir aguas de mala calidad en zonas de reproducción y crianza.



Considerando el conocimiento hidrológico actual de la PY, el efecto combinado de incrementos del nivel del mar, sequías y grandes extracciones de agua traerían como consecuencia una reducción en el nivel del acuífero subterráneo elevando la interfase salina. Aunado a lo anterior y debido al incremento del nivel del mar, la cuña marina subterránea se desplazaría hacia el sur por varios kilómetros, reduciendo drásticamente el espesor del manto freático aprovechable para el uso humano. De continuar la infiltración al manto freático de las aguas residuales sin tratamiento, el agua de riego con fertilizantes y plaguicidas de todo tipo, la intrusión salina desde la costa y la explotación del acuífero para actividades agropecuarias, urbanas e industriales en expansión, incrementarán la vulnerabilidad del acuífero de manera alarmante.

Un aspecto importante de cuidar es la porción de humedales, sabanas y selvas inundables costeras, ya que funcionan como biofiltros naturales para la depuración de aguas subterráneas contaminadas desde tierras altas.

Los riesgos ambientales debidos a la degradación de los acuíferos pueden agruparse en dos categorías: contaminación (natural y antrópica) y desecación (por disminución de los aportes o por sobre explotación. Algunos ejemplos de ellos son:

- La gran variedad de fuentes de contaminación del acuífero que deben disminuirse, por ejemplo, desechos de granjas porcícolas y acuícolas, residuos de fertilizantes y plaguicidas y los desechos urbanos (domiciliarios, industriales y de servicios).

- La deforestación ocasiona la formación de islas de calor que provocan: a) El aumento de la temperatura; b) La atracción de lluvias de zonas aledañas; c) Evaporación capilar local y modificación del nivel de la interfase salina que subyace al manto freático, que favorece la mezcla de agua dulce con salada, incrementa la disolución de la calcita que puede provocar el colapso de las construcciones.

Para mantener el ecosistema en un funcionamiento adecuado es necesario proteger y optimizar las fuentes y los flujos de energía y materia que dan vitalidad al sistema. Así:

- 1.- Debe reducirse de la disponibilidad de nutrimentos al ecosistema por la alteración de los inlfujos de agua dulce, al tiempo que la descarga excesiva de compuestos nitrogenados en áreas confinadas pueden presentar efectos adversos.

- 2.- Debe prevenirse cualquier reducción significativa de las concentraciones naturales de oxígeno disuelto en el agua.

- 3.- Es necesario prevenir la adición de sedimentos a las aguas que disminuyan su transparencia.

- 4.- Es importante reconocer el valor de los elementos de almacenamiento del ecosistema debido a que ellos parecen tener una laxitud ecológica que los convierte en víctimas del desarrollo. La pérdida de humedales, selvas y dunas costeras debe frenarse ya que representan los principales almacenes de materia y. energía del sistema en su conjunto. Mientras mayor sea el grado de desarrollo, más grande será la necesidad de proveer áreas de vegetación

original amortiguadoras a lo largo de los sistemas de recarga y descarga.

- 5.- Vigilar alteraciones en el régimen de temperatura y en el patrón de salinidad, así como la presencia de patógenos y sustancias tóxicas.

En cuanto a los suelos, la clasificación utilizada por el INEGI desde 1968 y comparada con la clasificación actual (FAO *et al.*, 2001) presenta un rezago de más de 25 años. Se cuenta con información de suelos suficiente a un nivel exploratorio, es decir, se conocen los grupos y la mayoría de las unidades de suelos que se tienen, su localización y extensión a nivel general (INEGI, 1987).

La planeación de las actividades económicas a nivel estatal, requiere mayor detalle en el conocimiento de los suelos, una escala 1:50000, podría ser adecuada; sin embargo, solo se tiene conocimiento de la realización de un levantamiento de suelos en esa escala.

Los planes de ordenamiento ecológico del territorio a nivel municipal, requieren mapas de suelos a escala 1:20,000, que no se tienen. Solo se tiene conocimiento de uno realizado en el municipio de Hocabá (Estrada, 2000).

En el diseño, administración y planeación de las actividades agropecuarias y forestales, los mapas parcelarios son de suma importancia, principalmente en zonas de alta heterogeneidad espacial a niveles locales como en la PY (Bautista *et al.*, 2001; Uicab, 2002). Al respecto, se ha encontrado que el color del suelo, pedregosidad y rocosidad tienen relación con las unidades de suelo, así como con la profundidad y con algunas propiedades químicas y minerales secundarios (Bautista *et al.*, 2003).

La justificación para la realización de los mapas a nivel parcela radica en las diferencias a nivel físico, químico y mineralógico de los diferentes suelos presentes en parcelas de tamaño reducido (de uno a 50 m² cada mecate es un cuadrado de veinte por veinte metros, es decir 400 m²), por la respuesta de los cultivos a la fertilización, abonamiento, cultivos de cobertera y de vegetación secundaria a los manchones de suelos, así como por la utilización campesina de este conocimiento.

Actualmente se trabaja en: a) La actualización de la clasificación de suelo del Estado de Yucatán (Huchin, 2003); b) El diseño de técnicas de levantamiento de suelo a nivel parcela en Yucatán (Bautista *et al.*, 2001; Novelo *et al.*, 2001; Bautista *et al.*, 2003; Díaz, 2003; Uicab, 2002); c) La actualización de la clasificación de suelos y en la redefinición de los polígonos de suelos del Estado de Quintana Roo; d) Levantamientos de suelo en la costa del estado de Campeche (Medina, 2002); y e) La elaboración de una colección de monolitos de suelos de la PY (May-Acosta, 2002). Esta información será de suma utilidad en la planeación de las actividades a nivel peninsular, estatal y, en algunos casos, municipal y parcelario.

La nomenclatura FAO, utilizada por el INEGI, no goza de una amplia aceptación, incluso, ni en el nivel técnico, principalmente por la escasa cantidad de expertos que la pudieran utilizar y por la existencia de una nomenclatura



campesina. Sin embargo, la nomenclatura propuesta por la FAO tiene una amplia aceptación en países sin una clasificación propia debido a que presenta varias ventajas que la hacen atractiva, como: 1) Facilidad en la identificación de las unidades por los horizontes de diagnóstico; 2) Es de carácter morfológico; y 3) Tiene un amplio uso a nivel mundial. Es por esto que se recomienda la formación de personal que conozca y maneje la clasificación "Base referencial mundial del recurso suelo" (FAO *et al.*, 2001) para que se cuente con un inventario de suelos actualizado y la transferencia de tecnología tenga mayores posibilidades de éxito.

Por otro lado, la realización del inventario de suelo a escala 1:20000 requiere la participación de toda la comunidad relacionada con el tema, tanto instituciones de docencia e investigación como las instituciones de gobierno estatales y federales relacionadas con el manejo del suelo, como la SEMARNAT, SAGARPA, INEGI, etc. De la misma manera, se requiere la participación de los dueños del recurso en la elaboración de dichos inventarios. Sería muy adecuado que esta actividad fuera coordinada por alguna institución federal o estatal.

Se recomienda la elaboración de un plan de desarrollo agrícola de largo plazo basado en la organización del conocimiento de las geoformas, suelo, acuífero y clima, así como en las condiciones sociales y económicas de los productores agrícolas, pecuarios y forestales. Dicho plan de desarrollo agrícola deberá contemplar la evaluación de las prácticas agrícolas, pecuarias y forestales tradicionales y el diseño de nuevas formas de aprovechamiento de los recursos naturales.

LA REGIONALIZACIÓN INTEGRANDO GEOFORMAS, ACUÍFEROS Y SUELOS

Con base en la hidrología, la zona costera es la que presenta las mayores restricciones de uso, principalmente

porque constituyen una barrera natural que impide el avance del agua de mar tierra adentro. Los suelos presentan fuertes restricciones de uso como el Solonchack (salinidad) y Litosol y Rendzina (profundidad efectiva). El conocimiento geomorfológico indica que existen zonas de alto riesgo de hundimiento, de inundación y de tormentas.

En los lomeríos de origen carso-tectónico en los que predominan las Rendzinas y Litosol, existe la limitación de uso debido a la escasez de suelo y la dificultad de caminar y trabajar sobre los lomeríos.

En las planicies onduladas de origen carso-tectónico que no tienen riesgos de contaminación, los suelos presentan una gran heterogeneidad espacial, presentando microcatenas que son, principalmente, de los siguientes tipos: 1) LP-LP; 2) LP-CM; 3) LP-CM-CL; 4) LP-CM-LV; 5) CL-CM-LV (LP litosol, CM cambisol, CL calicisol, LV luvisol).

Estas unidades presentan las siguientes características: 1) La principal limitante de uso es la escasa profundidad efectiva; 2) Existen las condiciones para la aplicación de riego de auxilio por la mediana calidad del agua; 3) Se cuenta con infraestructura carretera. Estas características tan especiales en zonas de carst abren la posibilidad de explorar y diseñar nuevas formas de manejo agropecuario y forestal, de la misma manera, dichas características deben ser consideradas en la adopción y adaptación de tecnología generada en otros lugares.

La unidad 11 correspondiente a lomeríos altos (>200 m) disectados por torrenteras que presentan Vertisol, Rendzina y Litosol de mediano potencial de uso, presentan también restricciones para el uso del acuífero con fines de riego debido a la presencia de sulfatos de calcio.

En la Tabla 3 se integra en forma tabular la información y respectiva correlación entre paisaje geomorfológico, hidrología y suelos.

REFLEXIONES GENERALES

Las unidades de paisaje geomorfológico han sido utilizadas en otras regiones con éxito en la identificación de unidades homogéneas (Bocco *et al.*, 1998; López y Villers, 1998), aprovechando la información temática para aumentar la precisión de los resultados. Sin embargo, en el manejo agropecuario y forestal y en la conservación de los recursos naturales, se requiere una mayor precisión sobre el conocimiento de los suelos, así como de la agroclimatología (por ej. periodos de crecimiento y horas luz), calidad del agua del acuífero e infraestructura agropecuaria.

Para aumentar la precisión en el conocimiento edafológico, se recomienda utilizar los modelos digitales de terreno para llegar al manejo de la información a escala 1:50,000, en cuyo caso, sería recomendable contar con información sobre las unidades de suelo y sus asociaciones en microcatenas a este nivel, que se podría colocar sobre

estos polígonos formados por los patrones de mesorelieve.

El estudio de los suelos con base en las unidades de suelo puede realizarse a nivel parcela (1 ha o mayor). Con el uso del microrelieve el estudio de los suelos puede llevarse a escalas 1:5,000. Con la utilización de fotografía aérea (en algunos casos) puede realizarse cartografía edafológica a escala 1:20,000.

Una vez conocido el recurso suelo con mayor detalle, es posible realizar mejores planes de manejo agropecuario y forestal con base en las evaluaciones de tierras, para lo cual hay diversos esquemas, como por ejemplo, 1) La clasificación de tierras con base en su capacidad de uso (Colegio de Posgraduados, 1991); y 2) La clasificación de tierras con base en la aptitud (FAO, 1976). Existen progra-



Tabla 3. Paisajes geomorfológicos con la integración de suelos e hidrología.

No.	Paisaje Geomorfológico	Hidrología	Suelos
1	Planicie palustre	Cerros y valles	Solonchack y Gleysol
2	Planicie fluvio-palustre	Zona costera	Gleysol y Solonchack
3	Planicie palustre proluvial-conchífera bajo influencia marina	Zona costera	Solonchack
4	Planicie cordones litorales líticos y arenosos	Zona costera	Regosol y Solonchack,
5	Planicie flechas litorales	Zona costera	Regosol
6	Planicie isla barrera	Zona costera	Regosol y Solonchack
7	Lomeríos en pliegue bloque con cúpulas alineadas (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	Zona costera	Rendzina, Litosol y Gleysol
8	Lomeríos en bloque poco disectado con planicies amplias (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	Cerros y valles	Litosol, Rendzina y Nitisol
9	Lomeríos en pliegue bloque con cimas en cúpulas y planicies confinadas (presenta al menos un escarpe tectónico identificable)	Cerros y valles	Rendzina, Litosol y Nitisol
10	Lomeríos altos > 200 msnm disectados por torrenteras	Cerros y valles	Vertisol, Rendzina y Litosol
11	Lomeríos de elevaciones bajas < 200 msnm (dispersos y con planicies interiores amplias)	Cerros y valles	Rendzinas Gleysol, Vertisol y Nitisol
12	Lomeríos disectados por torrentes y disolución sobre morfoalineamientos tectónicos	Cerros y valles	Rendzina
13	Lomeríos en cúpulas con erosión diferencial. Cúpulas alternando con planicies confinadas	Cerros y valles	Gleysol y Vertisol
14	Planicie estructural baja denudativa (< densidad de fracturas)	Anillo de cenotes, Cuenca escalonada, planicie interior	Litosol y Rendzina
15	Planicie estructural baja fitoestable	Planicie interior	Litosol y Rendzina
16	Planicie estructural baja acumulativa	Zona costera	Rendzina, Litosol y Gleysol
17	Planicie estructural ondulada con disolución y denudación (>densidad de fracturas, alta concentración de formas cársticas)	Cuenca escalonada y planicie interior	Litosol, Rendzina y Cambisol
18	Planicie estructural ondulada denudativa de transición entre lomeríos y planicies	Cerros y valles	Rendzina, Litosol
19	Planicie estructural escalonada	Cuenca escalonada	Rendzina, Vertisol y Gleysol
20	Planicie palustre costera con blanquiales	Zona costera	Gleysol, Histosol, Solonchack
21	Planicie palustre con petenes grandes	Zona costera	Histosol y Solonchack
22	Planicie palustre con petenes chicos	Zona costera y Cuenca escalonada	Litosoles, Regosoles y Rendzinas
23	Planicie acumulativas de residuales susceptibles de inundación	Crestas y valles	Gleysol y Rendzina
24	Planicie acumulativas de residuales susceptibles de inundación controladas estructuralmente	Cuenca escalonada	Rendzina, Litosol y Cambisol
25	Planicie palustre costera de inundación marina con hundimiento	Cuenca escalonada y zona costera	Rendzina y Litosol
26	Planicie palustre costera de inundación marina	Zona costera	Solonchack y Regosol

Tabla 3. Paisajes geomorfológicos con la integración de suelos e hidrología. *(Continuación)*

27	Planicie alta denudativa > de 200 msnm con lomeríos aislados	Cerros y valles y planicies interiores	Vertisol, Gleysol y Rendzina
28	Planicie estructural baja con acumulación fluvio-deluvial (materiales del cuaternario)	Cerros y valles y Río Candelaria	Gleysol y Rendzina
29	Dolinas agrupadas (inundadas -cenotes-)	Planicie interior	Litosol
30	Dolinas agrupadas (inundadas -cenotes-) y en proceso de formación de uvalas	Planicie interior	Litosol
31	Bajos intermareales	Zona costera	Solonchack, Gleysol y Regosol
32	Planicie estructural baja de resurgencias sobre ambientes palustres	Zona costera	Solonchack y Regosol
33	Lecho cárstico pseudofluvial	Zona costera	Solonchack y Regosol
34	Rampa cárstica denudatorio-erosiva	Cerros y valles	Nitisol y Gleysol
35	Lecho fluvial	Cerros y valles Zona costera	Fluvisol
36	Planicie estructural ondulada de transición entre pliegues bloque (50 msnm promedio)	Cerros y valles	Rendzinas

mas de computación, como ALES, que facilitan el manejo de una gran cantidad de información.

Con base en el análisis realizado se plantean las siguientes recomendaciones

- Es necesario generar conocimiento geomorfológico, hidrológico y edafológico; difícilmente podrá satisfacerse sin la formación de recursos humanos. En la Península no existen programas de formación de geógrafos, mucho menos de geomorfólogos, hidrólogos y edafólogos.

- Existe conocimiento geomorfológico, hidrológico y edafológico autóctono que no debe perderse y que debe ser utilizado en el diseño de nuevas y mejores formas de aprovechamiento de los recursos naturales.

- Se requiere el diseño y generación de sistemas productivos que consideren el uso múltiple de los diferentes micro-ambientes, es decir la heterogeneidad ambiental (geoforma, agua, suelo, plantas, climas) ya que es un rasgo característico de las zonas de karst.

- La adaptación y adopción de tecnología debe considerar la heterogeneidad espacial del ambiente cárstico para que tenga mayores posibilidades de éxito.

- No se debe construir infraestructura productiva en sistemas costeros altamente inestables sin incluir diseños de ingeniería adecuados a las condiciones muy particulares de cada uno de los paisajes geomorfológicos de la PY.

- En una zona, como la PY, en la que el turismo es una actividad de gran relevancia, deben ser prioritarias las acciones de conservación de los recursos naturales.

- A nivel técnico, las instituciones de educación superior y de investigación deberán fomentar entre sus alumnos e investigadores el interés por generar tecnología que atienda los problemas de contaminación de las medianas, pequeñas y microempresas o industrias y actividades de servicio, que son las de menores posibilidades de inversión en este aspecto. Del mismo modo, se requieren profesionistas líderes con una gran capacidad de integración de diversas disciplinas (transdisciplinarios) que les permita generar, diseñar, conducir, desarrollar y evaluar proyectos de desarrollo con objetivos de conservación de los recursos naturales del trópico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (R31624-B). Se agradece a la Fundación Rockefeller el apoyo otorgado al primer autor para su instalación en la UADY. El segundo autor agradece al CONACYT por los apoyos al proyecto. Los autores cuarto y quinto agradecen al CONACYT las becas de doctorado.



REFERENCIAS

- Back, W., B. Hanshaw, B. Pyle, T. Plummer and A. Weidie, 1979.** Geochemical significance of groundwater discharge and carbonate solution to the formation of Caleta Xel-ha, Q.Roo, Mexico. *Water Resources Research*, V. 15, No 6, p. 1521-1535.
- Back, W. y B. B. Hanshaw, 1982.** Geochemical significance of brackish-water springs in limestones of coastal regions. III semana de hidrogeología. Facultad de Ciencias de Lisboa-Portugal., 10-14 mayo.
- Batliori, E., 1991.** Programa de manejo hidrológico de la Cuenca Costera Noroccidental, de la Península de Yucatán. Gobierno del Estado -CINVESTAV-IPN Unidad Mérida. Sección de Ecología Humana.
- Batliori, E., 1995.** Hidrología de la región costera noroccidental del Estado de Yucatán. Tesis de doctorado. Universidad de la Habana. Facultad de Geografía. La Habana, Cuba. Del 11 al 16 de mayo.
- Bautista-Zúñiga F., S. Díaz-Garrido, C. Delgado-Carranza y H. Estrada-Medina, 2001.** Mapas parcelarios en Leptosoles con alta heterogeneidad espacial en zonas de karst. En: Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. La Habana, Cuba. Del 11 al 16 de noviembre.
- Bautista-Zúñiga F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro, A. Manu y R. Lozano, 2003.** Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles. *Terra*. 21: 1-11.
- Besaury, J.E., autores, 1995.** Conservación de la Cuenca Hidrológica Alta de la Bahía del Espíritu Santo, Quintana Roo, México. *Sian Ka'an Serie Documentos No. 3*, 1995.
- Bocco, V.G., G.A. Torres, J.A. Velázquez M., C. Siebe, G., 1998.** "Geomorfología y recursos naturales en comunidades rurales. El caso de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán", en *Geografía y Desarrollo*, No. 16, INEGI, México; pp. 71-84
- Bocco, G., M. E. Mendoza, A. Velázquez, A. Torres, 1999.** La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México: El caso de Michoacán de Ocampo. *Investigaciones Geográficas. Boletín 40*: 7-47.
- Butterlin, S. y F. Bonnet, 1963.** Mapas Geológicos de la Península de Yucatán. *Bol. A.M.P.G. Vo. X Nos. 9-10 México*. En: Orellana, R. El clima de la Península de Yucatán: presente, pasado y futuro. Manuscrito.
- Brady, M.J., 1978.** Sedimentology and depositional history of coastal lagoons, northeastern Quintana Roo, México, in Ward, W.C. and Weidie, A.E., eds. *Geology and hydrogeology of northeastern Yucatan*: New Orleans Geological Society Guidebook.
- Cvijic, J., 1918.** Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst, *Rev. Trab. Inst. Geog. Alpine*, 6(4): 375-426.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 1991.** Modelo de comportamiento del acuífero de la Cd. de Mérida Gerencia Estatal Yucatán, Méx.
- CNA, 1995a.** Resumen técnico de las condiciones geohidrológicas del estado de Campeche. Subgerencia Técnica. Gerencia Regional del Sureste.
- CNA, 1995b.** Resumen técnico de las condiciones geohidrológicas del estado de Quintana Roo. Subgerencia Técnica. Gerencia Regional del Sureste.
- CNA, 1996.** Censo de aprovechamientos de agua subterránea del estado de Yucatán, Campeche y Quintana Roo. Gerencia Regional Sureste, Mérida, Yucatán.
- Colegio de Posgraduados, 1991.** Manual de conservación del suelo y del agua. CP, SARH. Chapingo, México.
- Díaz, S., 2003.** Análisis espacial y geoestadístico a nivel parcela de los suelos de la zona Henequenera de Yucatán. Licenciatura en Biología, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- Duch, J., 1988.** La conformación territorial del Estado de Yucatán. Los componentes del medio físico. Universidad Autónoma de Chapingo. Centro Regional de la Península de Yucatán.
- Estrada Medina, H., 2000.** Caracterización y cartografía del recurso suelo en el municipio de Hocabá, Yucatán. Maestría en manejo y conservación de recursos naturales tropicales de la FMVZ-UADY.
- FAO, 1976.** Esquema para la evaluación de tierras. FAO, ONU. Roma, Italia.
- FAO, ISRIC, ITC, Catholic University of Leuven and Wageningen Universiteit, 2001.** Lecture Notes on the Major Soils of the World: World Soil Resources Reports 94. Ed. FAO. Roma.
- Grund A., 1914.** Der geographische Zyklus im Karst", *Ges, Erkunde* 52, p. 621-640
- Hanshaw, B.B. and Back, W., 1980.** Chemical reactions in the salt-water mixing zones of carbonate aquifers: Geological Society of America. Abstracts with Programs 1980, Vol. 12, No. 7.
- Herrera-Silveira, J., 1988.** Productividad primaria fitoplanctónica en la laguna de Celestún, Yucatán. Tesis Maestro en Ciencias, CINVESTAV, U. Mérida, México.
- Huchin-Malta, W., 2003.** Nueva clasificación de los suelos del estado de Yucatán. Tesis de licenciatura. Biología. FMVZ. UADY. México.
- INEGI, 1984.** Cartas hidrológicas de aguas superficiales.
- INEGI, 1987.** Cartografía temática de la Península de Yucatán.
- Isphording, W. C., 1975.** The Physical Geology of Yucatan. *Transactions Gulf Coast Association of Geological Societies*. 25:231-262
- Lesser, H., 1976.** Estudio Geohidrológico e hidrogeoquímico de la Península de Yucatán: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D.F., 62 pp.
- Lesser, J.M. y A.E. Weidie, 1988.** Región 25, Yucatan Peninsula. The Geological Society of America, The Geology of North America. V. 0-2 Hydrogeology Chapter 28, pp 237-241.
- López Blanco, J. y L. Villers-Ruiz, 1998.** Delimitación de unidades ambientales biofísicas aplicando un enfoque geomorfológico y SIG, para el ordenamiento territorial de Los Cabos, Baja California Sur, en *Geografía y Desarrollo*, No. 16, INEGI, México; pp. 85-99
- Lugo-Hubp, J., J. F. Aceves Quesada, R. Espinaza-Pereña, 1992.** Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología*, 9-2: 143-150.
- Marín L., R. Sanborn, A. Reeve, T. Felger, J. Gamboa, E.C. Perry and M. Villasuso, 1988.** Petenes: a key to understanding the hydrology of Yucatan, Mexico. *International Association of Hydrogeologists, International Symposium on the Hydrology of Wetlands in Semi-Arid and Arid Areas*. Seville, Spain. May- 9-12, 1988.
- Marín, L., 1990.** Field investigations and numerical simulation of the karstic aquifer of northwest Yucatan, Mexico (tesis doctoral): Northern Illinois University, De Kalb Ill. 183 p.
- May-Acosta, C., 2002.** Colección de monolitos de suelos de la península de Yucatán. Tesis de licenciatura. Biología. FMVZ. UADY. México.
- Medina, V., 2002.** Descripción morfopedológica y cartografía de los suelos de la zona costera del estado de Campeche. Tesis de licenciatura en biología. Universidad Autónoma de Campeche.
- Meyer-Arendt, K. J., 1993.** Shoreline Changes Along The North Yucatan Coast In. *Coast lines of the gulf of the Eighth. Symposium on Coastal And Ocean Management Coastal Zone 93*. July 19-23, New Orleans, pp. 103-117.
- Mendoza y Bocco, 1998.** La regionalización geomorfológica como base geográfica para el ordenamiento del territorio: una revisión bibliográfica. *Investigaciones geográficas* 38:25-55.
- Moore, Y, R. Stoessell y D. Easley, 1992.** Freshwater-Seawater relationship within a groundwater flow system, Northeastern coast of the Yucatan Peninsula. V. 30, No 3- Ground Water-



- Novelo, V., A. Ruiz, F. Tzec, M. Uicab y F. Bautista-Zúñiga, 2001.** Relación suelo planta en zonas de alta heterogeneidad espacial. En: Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. La Habana, Cuba. Del 11 al 16 de noviembre.
- Ortiz, P. M. y A. Méndez, 1999.** Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. Investigaciones Geográficas, 39:68-81.
- Palacio, J.L., M.A. Ortiz y A. Garrido, 1999.** Cambios morfológicos costeros en Isla del Carmen, Campeche, por el paso del huracán Roxana. 40: 48-57.
- Perry, E., E. Smith, J.Gamboa, A.Reeve, R.Sanborn, L. Marin y M. Villasuso, 1989.** Geologic and Environmental Aspects of Surface Cementation, North Coast, Yucatan, Mexico. Geology. Vol. 17:818-821.
- Perry, E., A. Reeve, L. Marin, and M.Villasuso, 1991.** Reply to comment on "Environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, Mexico Geology. in press. Citado en: Marin, L.E. 1990. Field Investigations and Numerical Simulation of Ground-Water Flow in the Karstic Aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico. Thesis. Department of Geology. Northern Illinois University. Dekalb, Illinois, U.S.A.
- Perry, E., L. Marin, J. McClain, y G. Velázquez, 1995.** Ring of cenotes (Sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater: Geology, v. 23, no. 1. p. 17-20.
- SARH, 1988.** Sinopsis Geohidrológica del Estado de Yucatán. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Direcc. Gral. de Adm. y Contr. de Sist. Hidráulicos .México.
- Southworth, C.S., 1984.** Structural and hydrogeologic applications of remote sensing data, eastern Yucatan Peninsula, Mexico. Proceedings of the first Multidisciplinary Conference on Sinkholes/Orlando, Florida. 15-17 octubre 1984.
- Stoessell, R.K, W.C. Ward, B.H. Ford y J.D. Schuffert, 1989.** Water Chemistry and CaCO₃ dissolution in the saline part of an open-flow mixing zone, coastal Yucatán Peninsula, Mexico. Geological Society of America Bulletin, V. 101, p. 159-169.
- Tulczyk, M.S., E. Perry, Ch.E. Duller y M.Villasuso, 1993.** Influence of the Holbox fracture on the karst geomorphology and hydrogeology of northern Quintana Roo, Yucatan Peninsula, Mexico. Applied Karst Geology, Beck (ed). Balkema, Rotterdam. . Proceedings of the fourth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impact of Karst Panama City/ Florida. 25-27 January 1993.
- Trejo, P.J., 1988.** Estudio del Sistema CO₂-carbonatos en la laguna de Celestún. Tesis de maestría en ciencias, CINVESTAV, U. Mérida. México.
- Uicab, M. 2002.** Mapas parcelarios de suelos para la administración agropecuaria de terrenos. Tesis de licenciatura. Biología. FMVZ. UADY. México.
- Valdez, S.D., J. Trejo y E. Real. 1988.** Estudio Hidrológico de la Laguna de Celestún, Yucatán, Méx. Ciencias Marinas, U.A.B.C (en prensa, 1988).
- Velázquez, G., 1995.** Estudio geoquímico del anillo de cenotes, Yucatán. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geofísica. México, D.F. 77 pp.
- Vera-Herrera, F., J.L. Rojas-Galavíz y A. Yáñez-Arancibia, 1988.** Ecología de los ríos Usumacinta y Grijalva, INIREB, Div.Reg. Tabasco, Gobierno del Estado de Tabasco. Memorias. 720 p. México.
- Villasuso, M. et al., 1989.** Hurricane Gilbert Effects on the Karstic Aquifer NNW of Yucatan, Mexico. Hydrochemical and Geohydrological Historical data. Seminario sobre avances recientes en la administración del recurso hidráulico. Facultad de Ingeniería, UADY-Univ. de Winsconsin. USA. Mérida, Yucatán, México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Ambiental y Sanitaria A.C. VI Reunión Regional y I Peninsular. 26 y 27 abril. Perspectivas de la Ingeniería Sanitaria y Ambiental en la Península de Yucatán.
- Villasuso Pino, M. J. y R. Méndez-Ramos, 2000.** Modelo Conceptual del acuífero de la Península de Yucatán. Proyecto Población-Desarrollo-Medio ambiente. IIASA, CINVESTAV IPN. Reporte Interno. Yucatán, México. p. 18.
- Widie, A.E., 1985.** Geology of Yucatan Platform, Part 1 in Ward,W.C. et al, eds., Geology and hydrogeology of the Yucatan Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula: New Orleans, Louisiana, New Orleans Geological Society, p. 1-12.
- Wilson, E. 1980.** Physical Geography of the Yucatan Peninsula. In: Museley, E.H. y E.D. Terry. Yucatan: A World Apart. University of Alabama Press. USA.
- Yáñez-Arancibia, A. y J. W. Day, Jr., 1982.** Ecological characterization of Terminos Lagoon, a tropical lagoon-estuarine in the southern Gulf of Mexico. P. 431-440. In: Lasserre, P.H. Potsma (eds). Coastal Lagoons. Oceanologica Acta, Vol. Spec. 5(4):462 p.
- Zinck J. A., 1988.** Physiography and soils, soil survey course. ITC, Enschede, The Netherlands. 156 pp.



DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE LA COSTA DEL ESTADO DE CAMPECHE: ENFOQUES GEOMORFOLÓGICO Y GEOPEDOLÓGICO

A. Gerardo Palacio-Aponte¹, Víctor Medina-Medina¹ y Francisco Bautista²

¹Centro EPOMEX, Universidad Autónoma de Campeche

²Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán.

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran y discuten diversos enfoques para caracterizar el estado ambiental de los recursos naturales en la zona costera del Estado de Campeche. Se exponen principalmente tres enfoques diferentes pero al mismo tiempo complementarios, como son: el geomorfológico, el edafológico y el geopedológico. Se retoman los antecedentes cartográficos existentes y se complementan bajo la perspectiva de las unidades del territorio a través del uso de imágenes de satélites, fotos aéreas y trabajo de campo.

Al final se obtienen 22 unidades geomorfológicas y 51 geopedológicas exponiendo la utilidad relevante de los estudios geopedológicos como un instrumento útil en el conocimiento integral de la complejidad de los paisajes a niveles locales y el ordenamiento de las actividades económicas en el territorio.

ABSTRACT

This paper discusses diverse focuses to characterize the environmental state of the natural resources in the coastal zone of the Campeche State. Three different focuses complementary at same time are exposed mainly, like they are: geomorphologic, edaphologic and geopedologic. The existent cartographic antecedents are recaptured and they are supplemented under the perspective of the land units through the use of images of satellites and field work.

At the end 22 geomorphologic units and 51 geopedologic units was obtained exposing the excellent utility of the geopedologic studies like an helpful instrument in the integral knowledge of the complexity from the landscapes to local levels and the planning of the economic activities in the territory.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se reconoce cada vez más la importancia de las zonas costeras debido a los recursos naturales que oferta, a su diversidad y función ecológica y a su tradicional ocupación por los asentamientos humanos. Ante la creciente presión humana sobre los ecosistemas costeros es necesario buscar el equilibrio entre la preservación de la integridad de los ecosistemas y el uso racional de los recursos naturales, entre los cuales se encuentra el suelo.

En el caso del estado de Campeche, la zona costera presenta 523.3 km de extensión. Debido a su importancia ecológica se han decretado dos áreas protegidas, colocándose como uno de los estados con mayor superficie costera bajo algún régimen de protección. Al norte se encuentra La Reserva de la Biosfera de “*Los Petenes*” que ecológicamente forma parte de un continuo de humedales en zonas de karst que se extiende hasta la Reserva de la Biosfera de Celestún. Al suroeste se encuentra el Área de Protección de Flora y Fauna de “*Laguna de Términos*”, que cuenta con gran variedad de humedales estuario-costeros tropicales y hábitats críticos de importancia ecológica fundamental para organismos acuáticos. Esta área presenta una problemática de manejo compleja, debido a que en ella se localiza el segundo desarrollo urbano del estado (Cd. del Carmen) y se realizan actividades económicas de importancia nacional como la petrolera, pesquera y agrícola.

Una medida oficial para detener y/o eliminar los problemas de degradación, son los planes de ordenamiento ecológico del territorio (POET), que sirven para evaluar, normar y programar el uso de los recursos naturales. Son un instrumento de planeación ambiental contemplado en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, tanto a nivel federal como estatal. En teoría, es una estrategia realizable para la que incluso existen manuales. Sin embargo, en la realidad son escasos los POET

operativamente eficientes debido a la dificultad de la integración de los diversos elementos del paisaje para la identificación de las áreas homogéneas al interior de la zona de estudio. En primer término, los POET constan de una fase de diagnóstico, identificando la vocación y aptitud del suelo, los componentes naturales del paisaje, estado y uso actual, para lo cual se requiere la identificación de unidades homogéneas, en términos geomorfológicos, climáticos, edáficos y de vegetación, para proponer acciones concretas de manejo de recursos naturales.

El método geopedológico, propuesto por Zinck (1988) para el levantamiento de suelos, recientemente ha sido utilizado en la identificación de las zonas ambientales homogéneas. Es el resultado de un enfoque interdisciplinario y describe las interdependencias que modelan el medio físico, el cual para ser utilizado racionalmente, debe ser entendido tanto en sus características como en su dinámica (Tricart y Kilian, 1982).

Las unidades identificadas en los mapas geopedológicos, y que son objeto de estudio de este trabajo, son documentos síntesis que presentan una visión global del paisaje de los diferentes aspectos que lo componen. Por lo tanto, los mapas geopedológicos no son la sobreposición de mapas temáticos, sino una síntesis de los diferentes elementos del medio natural (Rossignol, 1987).

El objetivo de este trabajo es comparar los enfoques geomorfológico y geopedológico de la zona costera de Campeche, para seleccionar el más adecuado en la elaboración del diagnóstico ambiental de la Costa de Campeche.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca toda la costa del estado de Campeche. Se localiza entre los 18° 04' y 20° 20' de latitud norte y los 89° 55' y 96° 16' de longitud oeste. Comprende una franja de 25 km de amplitud hacia el continente y a partir de la línea de costa (Fig. 1). Esta frontera se estableció utilizando como criterio el nivel máximo de inundación asociada al agua marina (incluyendo intrusión salina) y según las evidencias bióticas de la influencia marina hacia el continente. Con fines prácticos, el área de estudio se dividió en tres regiones: norte, centro y suroeste, en correspondencia con los límites cartográficos de las cartas edafológicas 1:250 000 del INEGI.

ESTRATEGIA GENERAL

La identificación y caracterización de las unidades geopedológicas de la zona costera del estado de Campeche, se realizó bajo los siguientes criterios generales: 1) Identificación y caracterización de las unidades geomorfológicas de acuerdo con criterios morfogenéticos y morfodinámicos (Tricart y Kilian, 1982; Geissert, 2000); 2) Identificación de los principales procesos pedogenéticos asociados al relieve y los elementos más significativos del paisaje (litología, clima, cobertura vegetal); 3) Definición de los criterios conceptuales y cartográficos para la elaboración de mapas geopedológicos a escalas medias, actualizando al mismo tiempo la cartografía edafológica del INEGI (1984) según la nomenclatura de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) FAO *et al.*, (1999).



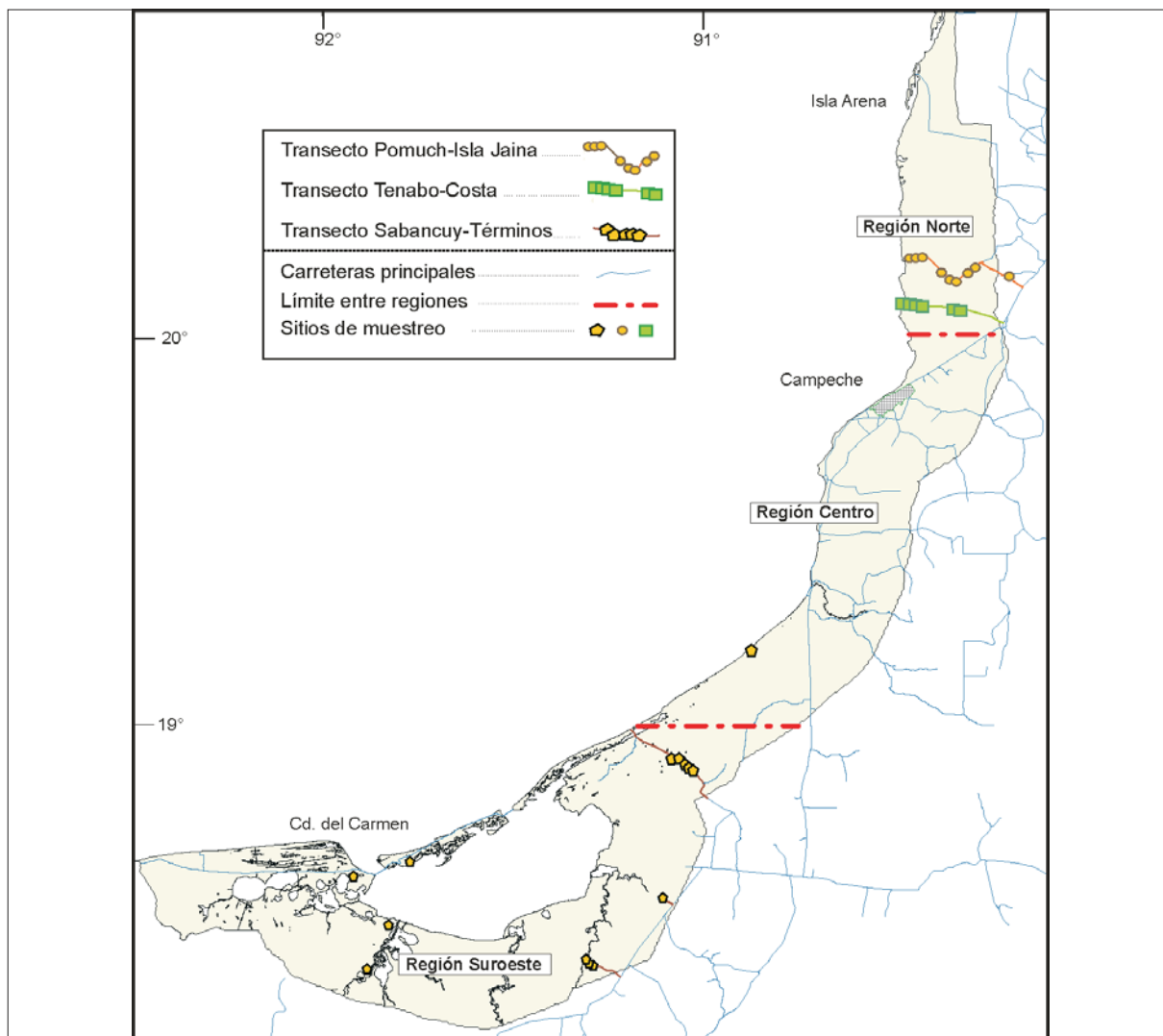


Figura 1. Localización del área de estudio.

La elaboración del mapa geopedológico se basa en la relación morfogénesis-pedogénesis. De manera que la selección de datos se orientó a verificar directamente la correlación relieve-suelo e indirectamente su relación con los demás elementos del paisaje. Incluye un conjunto de relaciones acerca de la expresión espacial de los procesos pedogenéticos y el peso relativo que cada componente del paisaje tiene en ellos.

EL MAPA GEOMORFOLÓGICO

El mapa geomorfológico de la zona de la zona costera de Campeche, propuesto por Lugo-Hubp y García Arizaga (1999) se tomó como mapa base. A partir de éste se tipificaron nuevas geoformas basadas en el análisis de patrones de humedad y suelos identificados en imágenes de satélite Landsat TM recientes, fotografías aéreas 1:75 000 y observaciones en campo.

La verificación en campo de las nuevas unidades geomorfológicas y edáficas se realizó a través de 3 transectos principales denominados: 1) Tenabo-costa; 2) Pomuch-Isla Jaina y 3) Sabancuy-Términos (Fig. 1).

EL MAPA GEOPEDOLÓGICO

En su etapa inicial se construyó un mapa geopedológico preliminar mediante el análisis de la cartografía y la bibliografía existentes y su incorporación a un SIG. Los procedimientos de digitalización, edición y elaboración tanto preliminar como final de los mapas del área de estudio se realizaron en los SIG Arc-Info y Arc-View 3.2. Se analizó cartografía temática en diversas escalas de hidrología, edafología, geomorfología, climas y vegetación (Flores y Espejel, 1994; Lugo-Hubp y García-Arizaga, 1999; Orellana *et al.*, 1999; Inventario Forestal Nacional, 2000). Se revisó la geología, según el mapa de Geología de México a

escala 1:4000,000 (Padilla y Sánchez y Aceves, 1990), las formaciones geológicas (López-Ramos, 1979) y la geología del estado de Campeche (SARH, 1985).

Para información específica de información no considerada en la cartografía se incluyó la interpretación visual de la imagen de satélite Landsat TM del año 2000 a través de compuestos de falso color RGB 4,3,2; 4,2,1 y 4,5,3. Con esta imagen también se actualizó la línea de costa del estado de Campeche sobre todo en las zonas de bajos intermareales y playas arenosas. La información adquirida se almacenó en formato vector (RMS menores de 0.003, cuando fue posible), permitiendo comparar y modificar la información digitalizada.

La elaboración del mapa geopedológico preliminar, consistió en la delimitación de las unidades geopedológicas mediante la interpretación, en un solo mapa, de todos los factores formadores del suelo, a partir de la sobreposición y síntesis de las coberturas digitalizadas de: geomorfología, litología y edafología.

Las coberturas de vegetación e hidrología funcionan como indicadores de la distribución y el comportamiento de los procesos pedogenéticos. Mientras que la geomorfología se basó en la morfogénesis y la morfodinámica. Todas estas coberturas fueron integradas para obtener las unidades geopedológicas, en el SIG Arc-View 3.2. Se fueron descartando las de menor dominancia o las de información menos relevante para la diferenciación y denominación de las unidades geopedológicas. Los criterios de agrupación relieve-suelo se basaron en un esque-

ma general de procesos geomorfológicos, morfología del terreno y procesos pedogenéticos (Fig. 2).

Sobre puntos específicos georeferenciados en la ruta de los recorridos de campo se realizaron barrenaciones y perfiles edafológicos, describiéndose y clasificándose los suelos según la WRB (FAO *et al.*, 1999). Esto se complementó con las observaciones cualitativas de la geomorfología y con la identificación de los tipos o asociaciones de vegetación como un indicador de los cambios locales de las condiciones del suelo, tal como recomiendan Flores y Ucan (1983). Mientras que la litología se observó en los afloramientos rocosos de los cortes de carretera y las orillas de los ríos, lagunas y dolinas.

Se utilizaron como mapas de referencia base los edafológicos 1:250,000 del INEGI. La unidades edafológicas se digitalizaron en el Sistema de Información Geográfica (SIG) Arc-Info para estación de trabajo. Aunque se mantienen las fronteras edafológicas, la clasificación de los perfiles del INEGI se actualiza considerando el esquema más reciente de la Base de referencia mundial del recurso suelo, mejor conocida como WRB (FAO *et al.*, 1999).

Se le dió una clasificación definitiva a las unidades geopedológicas, utilizando como mapa base el mapa geopedológico preliminar, en donde se transfirieron los datos ordenados y clasificados de las unidades geomorfológicas y edafológicas, clima e hidrología y utilizando como factor indicador a la vegetación. Después fueron reinterpretados y redefinidos los contornos de las unidades geopedológicas. Con toda esta información se pudo determinar la geo-

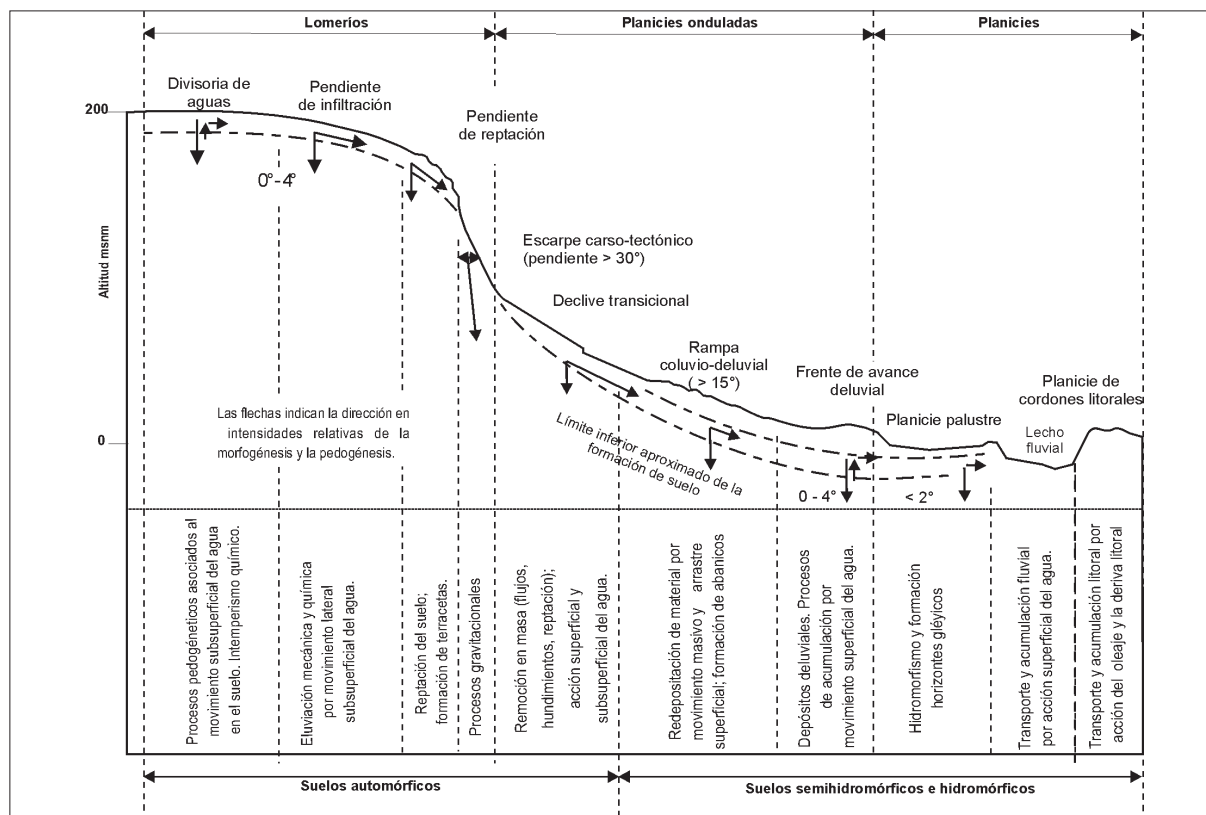


Figura 2. Esquema idealizado de la relación morfogénesis-pedogénesis.



dinámica actual del medio identificando medios estables, inestables y penestables (o integrados) con base en la clasificación de Tricart y Kilian (1992).

Los mapas geopedológicos finales se imprimieron a escala 1:250000, en donde se representaron las unidades

geopedológicas con su leyenda a través del SIG Arc-View 3.2. Se incluyó una tabla con las unidades en la primera columna y los componentes descritos de las unidades en tres columnas más. El nombre para cada unidad geopedológica se basa en iniciales del vocabulario geomorfológico e iniciales de los suelos dominantes.

RESULTADOS

GEOMORFOLOGÍA DE LA ZONA COSTERA DE CAMPECHE

Se identificaron y describieron 22 unidades geomorfológicas (Fig. 3). Las características morfogenéticas y morfodinámicas presentan diversos gradientes ambientales, principalmente en la región suroeste, en donde las unidades geomorfológicas son hidrodinámicamente más hete-

rogéneas de planicies palustres, fluviales y lacustre-marinas. En el norte las unidades son más homogéneas, con geoformas planas, y con acumulación de sales en superficie, debido a la escasez de precipitación durante un periodo más largo que en las otras regiones. En el centro las unidades geomorfológicas son de transición, y presentan la morfología de mayor altitud en toda el área de estudio (lomeríos y planicies cársticas elevadas), así como el único lecho cárstico-fluvial importante. A continuación se pre-

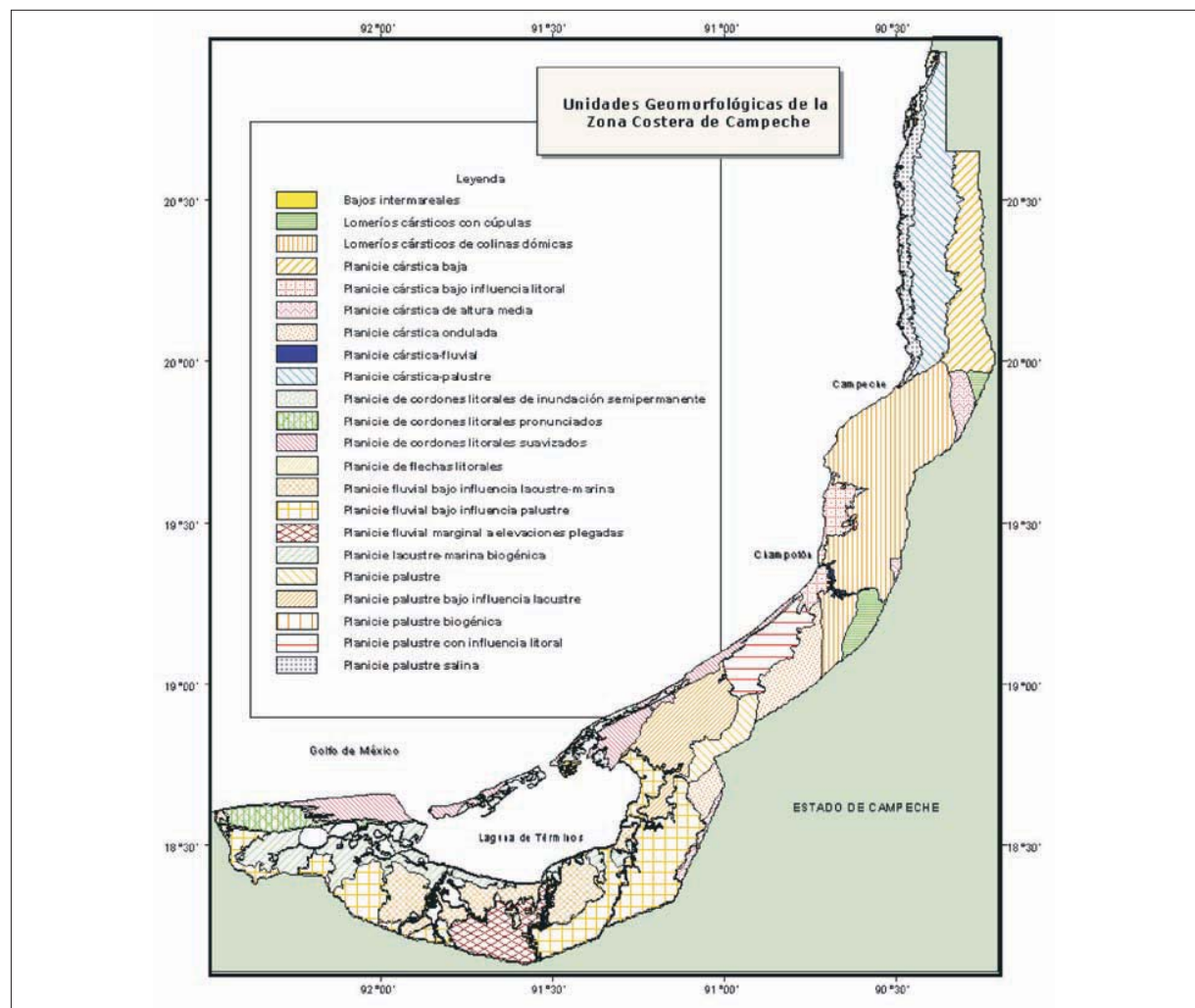


Figura 3. Mapa de unidades geomorfológicas de la zona costera del estado de Campeche.

sentan las descripciones de las unidades geomorfológicas.

Lomeríos cársticos de colinas dómicas. Elevaciones de hasta 150 msnm con laderas suaves y alargadas que alternan con planicies pequeñas. De origen carso-tectónico, son producto combinado del levantamiento tectónico y la disolución diferencial. Las elevaciones tienen forma de colinas dómicas más o menos isométricas con poca inclinación en la pendiente. Alcanzan varios kilómetros de longitud.

Lomeríos cársticos con cúpulas. De origen carso-tectónico, tienen una morfología y origen semejantes al de los lomeríos cársticos de colinas dómicas, a diferencia de que presentan menor altura, de entre 50 y 100 msnm, con cimas pronunciadas conocidas como cúpulas.

Planicie cárstica de altura media. De origen cárstico, compuesta por capas de calizas casi horizontales con altura de entre 10 y 50 msnm. En la región centro, se encuentra entre lomeríos cársticos y parece ser una prolongación sur derivada de la planicie cárstica baja, sólo que con una mayor altitud. En el suroeste, los rasgos cársticos cada vez son menos visibles, debido al régimen mas alto de precipitación y a la presencia de mayor cantidad de materiales acumulativos recientes.

Planicie cárstica bajo influencia litoral. De origen cárstico, influida por la acción erosiva de las olas. Altitud menor a los 10 msnm y presenta influencia salina. La línea de costa se caracteriza por presentar una serie de playas rocosas y rocoso-arenosas, y por tener un avance por emergencia.

Planicie cárstica-palustre. Es su origen es una planicie denudatoria cubierta por materiales del cuaternario, y condicionada por la humedad superficial y subterránea. Se presentan dolinas sobre terrenos fangosos y salinos. Su origen cárstico se observa en la serie de hondonadas y afloramientos rocosos con formas incipientes de lapiaz. El lapiaz está cubierto y/o semisepultado por formaciones insolubles de origen palustre y lacustre. Presenta cenotes y pequeñas cuevas de origen freático. Estas planicies tienen dos tipos de resurgencias como salidas de agua subterránea a la superficie: la submarina, en donde el aporte de agua dulce se reduce significativamente aumentando los niveles de salinidad y la sublacustre, en donde el agua dulce reduce la salinidad del entorno y propicia la presencia de formaciones vegetales denominadas regionalmente "Petenes".

Planicie cárstica baja. Planicie cárstica denudatoria fracturada con inundaciones temporales. Presenta hondonadas incipientes y montículos. Está conformada por calizas del terciario superior, las cuáles afloran a la superficie.

Planicie cárstica ondulada. Planicie con pequeñas ondulaciones a medida que se extienden al interior del continente, con numerosas depresiones cársticas. Tienen alrededor de 50 msnm.

Planicie cárstica-fluvial. Son planicies con origen cárstico que registran una acumulación de sedimentos aluviales. Presentan hondonadas incipientes y montículos con altitudes entre 2 y 7 msnm, aumentando gradualmente hacia el interior del continente. Ligeramente onduladas, con

gradientes variables entre 0 y 5°, sobre depósitos fluviales, sujetas a inundación temporal. Presenta rasgos cársticos en los alrededores del canal de estiaje.

Planicie de cordones litorales pronunciados. Formada a partir del material aluvial por la actividad del río San Pedro y San Pablo, y que han sido mezcladas con depósitos costeros holocénicos de arenas silíceas debido a la actividad de las olas, las corrientes litorales y las mareas. Los cordones de playa son numerosos y tienen una alineación paralela a la costa y con dirección este-oeste. Cada cordón representa las diferentes posiciones de la costa y su avance hacia el mar. Se alternan crestas o bordos y depresiones bajas a manera de represas. Tienen hasta 3 m de altura, con relieve plano, suavemente inclinado entre 0 a 3°, con playas, cordones costeros y dunas, que se intercalan con las áreas pantanosas.

Planicie de cordones litorales suavizados. Se encuentran desde Champotón hasta los alrededores del estero Sabancuy, así como el centro y oeste de Isla del Carmen, y la península de Atasta. Tienen entre 1 y 2 m de altura. En algunos casos, como en Sabancuy e Isla Aguada, hay calizas sepultadas o expuestas que originan dolinas entre los grupos de cordones litorales. El agua de la marea entra a través de las planicies de barras litorales entre cresta y cresta durante la época seca convirtiéndose en marismas y/o esteros.

Planicie de flechas litorales. Planicie litoral baja acumulativa, que tiene forma de depósitos alargados que se extienden paralelos a la línea costera. Son modificadas rápidamente por la dinámica litoral. Su origen se debe a la alternancia de la transgresión y regresión marinas, y a la deriva litoral, que ocasionan el desprendimiento y/o transporte de arena de origen biogénico y otros sedimentos en suspensión de forma paralela a la costa y claramente direccionados. Se ubican en la región norte aislando los esteros de Celestún y Yaltún. Presentan canales estrechos que mantienen cuerpos de agua cautivos, permiten la circulación de las corrientes de pleamar y bajamar, así como la comunicación con el mar de la planicie palustre biogénica.

Planicie de cordones litorales de inundación semipermanente. Son planicies arenosas acumulativas que funcionan como barreras pantanosas de captación de sedimentos e inundación semipermanente. Se han desarrollado sobre los bajos inundables y algunas veces han sido erosionados por las olas dejando al descubierto afloraciones rocosas, como rasgos del cambio en la dirección de la superficie de playa escalonada (bermas).

Bajos intermareales. Son bajos o regiones de sedimentación marina originada por acarreo de sedimentos de origen marino. Su morfología es de lóbulos modelados por la acción acumulativa de las olas, debido a la entrada de corrientes marinas por Boca de Puerto Real hacia la Laguna de Términos.

Planicie palustre salina. Es una planicie inundable condicionada por la humedad superficial y subterránea lo cual ha propiciado la acumulación de gran cantidad de sales, por intrusión salina y por los extremos regímenes de evapotranspiración. Regionalmente se le conoce como "Blanquizales". Son comparables a una cubeta de decantación alargada en donde se depositan arcillas y limos ori-



ginados por flujo intermareal y/o por el intemperismo químico de las rocas. Presenta dolinas inundadas, poca o escasa vegetación de manglar, y petenes aislados.

Planicie palustre biogénica. Son planicies pantanosas en donde la dinámica litoral y biogénica ha ejercido una actividad acumulativa. En la línea de costa que va de Celes-tún a Isla Jaina hay una alternancia de litorales estables con inestables, con avance natural biogénico hacia el mar. Mientras que la línea de costa que va de Isla Jaina a la Ciudad de Campeche tiene una constitución más sólida, definida por la colonización de manglar, afloramientos de rocas calcáreas y depósitos de arenas biogénicas en proceso de litificación. Presenta dolinas costeras con resurgencias de agua dulce.

Planicie palustre. De origen cárstico, pero debido a la presencia de muchas depresiones y clima con abundante precipitación, tiene una acumulación semipermanente de agua, configurándose como áreas pantanosas, con depósitos palustres. Presenta una altitud menor a los 10 msnm y está influenciada por agua dulce principalmente.

Planicie palustre con influencia litoral. Planicies pantanosas, donde los materiales palustres cubren una superficie con características litorales. Pueden presentarse inundaciones semipermanentes debido a la precipitación estacional y a resurgencias de agua dulce producto de la estructura cárstica subterránea. Esto permite que la concentración salina en la superficie se diluya, y que tenga un gradiente de mayor a menor concentración hacia el interior del continente.

Planicie palustre bajo influencia lacustre. Son planicies con depósitos palustres y algunas depresiones lacustres, que se inundan de forma semipermanente o permanente, quedando represadas las aguas con un nivel alto casi todo el año. Las planicies tienen hasta 1 m SNM de altitud con pendientes de 2°. Las depresiones lacustres-palustres semipermanentes son salobres y se encuentran interconectadas.

Planicie fluvial bajo influencia lacustre-marina. Originadas por la acumulación de sedimentos proluviales de los ríos adyacentes, presentan una influencia diaria y estacional de las mareas que predominan en la Laguna de Términos y en sus cuerpos lagunares periféricos. Están dispuestas entre 0 y 1 m de altura con pendiente de hasta 2° con lagunas y pantanos salobres permanentes y semipermanentes, que dependen tanto de la distribución de sedimentos y aguas fluviales, como de su interconexión formando parte de las depresiones entre cauces. Hacia el interior del continente pueden tener de 2 a 7 msnm, con topografía ligeramente ondulada. En la margen derecha del río San Pedro y San Pablo estas planicies fluviales son modeladas por la acción erosiva de las olas durante la época de nortes y huracanes, permitiendo la formación de sedimentos arenosos que originan cordones litorales (con mezcla de terrígenos y carbonatos).

Planicie fluvial bajo influencia palustre. Son planicies bajas, susceptibles a inundaciones ordinarias anuales o permanentes, y con acumulación de sedimentos aluviales y materia orgánica en regiones pantanosas adyacentes. Presentan alturas de 0 a 3 m, son ligeramente onduladas, sobre depósitos areno-limosos y arcillosos fluviales. Los diques pueden ser remanentes de albardones abandonados,

se localizan de forma intermitente, adyacentes a las corrientes principales, por lo que no se detectan a simple vista. En ella se llevan al cabo procesos de acumulación baja y transporte alto de terrígenos hacia la costa. Puede presentar cuerpos lagunares y cauces activos durante los periodos de inundación, así como pantanos interfluviales, que se originan como una depresión adyacente a la corriente de agua.

Planicie fluvial marginal a elevaciones plegadas. Presentan capas de calizas casi horizontales, con una altitud de 30-40 msnm. Son planicies onduladas sobre depósitos areno-limosos y arcillosos fluviales, sujetos a inundaciones temporales y son prolongación de las elevaciones plegadas de Chiapas.

Planicie lacustre-marina biogénica. Son planicies con depósitos predominantemente de origen lacustre-marinos debido al acarreo y sedimentación biogénica y la hidrodinámica de la Laguna de Términos. Son planicies con una altitud de entre 0 y 3 msnm, con depósitos areno-limosos y arcillo-arenosos de origen lacustre-marino, que han sido estabilizados por la vegetación de manglar. Están sujetos a inundaciones semipermanentes.

LOS MAPAS GEOPEDOLÓGICOS

La variabilidad de suelos encontrados por unidad geopedológica, se debe principalmente a la incidencia de los procesos morfogenéticos de tipo: cárstico, palustre, fluvial y litoral; y morfodinámicos específicos como: oleaje costero (acumulativo y/o erosivo), flujos intermareales (ordinarios, diarios y estacionales), resurgencias sublacustres, inundaciones (ordinarias, temporales y permanentes), erosión diferencial con escorrentías difusas y acumulación de sedimentos, depresiones de acumulación deluvial, hidrodinámica cárstica y fluvial, exhumación de regolita y todas las posibles combinaciones en los ecotonos morfogenéticos de influencia recíproca entre procesos. Para su mejor comprensión, la leyenda de los mapas geopedológicos incluye en la descripción de las unidades, iniciales categóricas explícitas tanto de las unidades geomorfológicas como edafológicas distribuidas por regiones. En la tabla 1 se describen las más representativas.

La gama de interacciones entre los procesos geodinámicos mencionados imprime características propias a cada unidad. La presencia o ausencia relativa de combinaciones condiciona muchos de los procesos pedogenéticos, tales como los asociados a los gradientes de humedad tanto horizontal como vertical. El hidromorfismo afecta a la mayoría de los suelos encontrados en el área de estudio debido a que se encuentran sobre planicies inundables (excepto en la región centro), ya sea de tipo palustre, fluvial, litoral o cárstico. Estos suelos son grises claros (Regosoles calcáricos, Gleysoles sódicos y Solonchaks gléyicos) o cafés oscuros (Histosoles éutricos), jóvenes y de poco desarrollo. Por otra parte, los Gleysoles éutricos, así como los Gleysoles vérticos y Vertisoles pélicos, tienen un mayor desarrollo en lugares de humedad permanente o semipermanente, como en las depresiones u hondonadas. En la región suroeste, la dinámica fluvial ha permitido que los sedimentos arcillo-limosos se mezclen con los suelos palustres aladaños, desarrollándose suelos

Tabla 1. Claves de identificación de las unidades geomorfológicas y edafológicas.

Unidad geomorfológica	Clave
Lomeríos cársticos de colinas dómicas, cúpulas	Lk cd, cu
Planicie cárstica de altura media, bajo influencia litoral, palustre, baja, ondulada, fluvial	Plk am, lit, pal, b,o, f
Planicie de cordones litorales pronunciados, suavizados, de inundación semipermanente	Plco p, s, inun
Planicie de flechas litorales	PIFlit
Bajos intermareales	Baim
Planicie palustre salina, biogénica, con influencia litoral, bajo influencia lacustre	Papal s, bio, lit, lac
Planicie fluvial bajo influencia lacustre-marina, influencia palustre, marginal a elevaciones plegadas	Plf lacmar, pal, m
Planicie lacustre-marina biogénica	PIlacmarbio
Suelos	Clave
Solonchaks gléyicos, ócricos	SC gl, oh
Regosoles calcáricos, éutricos	RG ca, eu
Histosoles éutricos	HSeu
Gleysoles sódicos, mólicos, vérticos, calcáricos	GL so, mo, vr, pl, ca
Leptosoles réndzicos, líticos, plínticos	LP rz, li
Nitsoles éutricos	NT eu
Vertisoles pélicos	VR pe

jóvenes tipo Fluvisol gléyico, en renovación continua de sus horizontes. Los suelos rojos como los Luvisoles son de los más profundos y más desarrollados en la región centro (Fig. 6). Los Cambisoles son suelos jóvenes, en donde el material geológico resiste al intemperismo físico-químico.

En la pedogénesis de los Leptosoles réndzicos y líticos, hay menor grado de exposición al intemperismo químico debido a la caliza geológicamente reciente, considerándose suelos jóvenes. Estos suelos se presentan en una geomorfología carso-tectónica tanto de planicies y lomeríos, y con una precipitación baja debido al clima $Aw_0(i'')gw''$ que es el más seco de los cálidos y muy cálidos subhúmedos en la región norte (Fig. 4).

De las condiciones geomorfológicas y edafológicas generales antes mencionadas el mapa geopedológico se basa en la caracterización de las principales unidades geomorfológicas y la integración de los procesos pedogenéticos dominantes expresados a través de unidades y subunidades de suelo que permiten diferenciar la dinámica geopedológica.

La forma y funcionamiento de un sistema geomorfológico en zonas tropicales es principalmente producto final de un conjunto de procesos hidrológicos y del paisaje que interactúan de manera simultánea (García *et al.*, 1995). En este sentido, para el área de estudio, los procesos hidrodinámicos y su interacción con ambientes palustres, fluvio-palustres, litorales, cársticos y cárstico-palustres son los procesos morfogenéticos que condicionan los procesos pedogenéticos. Modelan espacial y temporalmente la dinámica de las planicies inundables de las regiones norte y suroeste, mediante procesos asociados a la permanencia, magnitud, intensidad y frecuencia de las inundaciones.

En las unidades geopedológicas de génesis terrígena el transporte proluvial (región suroeste), especialmente activo en la época de lluvias, determina la naturaleza y distribución de los materiales desagregados provenientes de las cuencas medias y altas de los ríos (Fig. 5).

Por otra parte, el oleaje costero de baja intensidad, las corrientes litorales y las mareas son los factores morfodinámicos representativos de las unidades geomorfológicas de la línea costera y de algunas paleoformas sepultadas cercanas a la costa en las subregiones norte y suroeste. Los pulsos de la hidrodinámica litoral y las mareas en la subregión suroeste dan origen a planicies de cordones litorales donde alternan geoformas positivas (camellones) con geoformas negativas (hondonadas) que a su vez determinan asociaciones de suelos de la misma morfogénesis pero diferente pedogénesis.

Otro ambiente morfogenético importante es el cárstico y se puede diferenciar en automórfico e hidromórfico. Automórfico correspondiente a los lomeríos de la región centro, donde la escurrentía de la época de lluvias propicia procesos denudatorios en general y de erosión lineal en sitios restringidos. En estos lomeríos es más común observar intemperismo físico y químico sobre las rocas calcáreas que en el resto de las unidades geopedológicas. Por otra parte dentro planicies cársticas recién emergidas en el holoceno, se presentan ambientes hidromórficos con ecotonos de inundabilidad. Se encuentran suelos afectados por inundaciones permanentes salinas y salobres, inundaciones de agua dulce por resurgencias sublacustres e inundaciones semipermanentes asociadas a la época lluviosa. Es importante acotar que bajo una misma dinámica geomorfológica se presentan asociaciones de suelos.

En cuanto a las unidades de suelos y los principales procesos pedogenéticos se encontraron particularidades



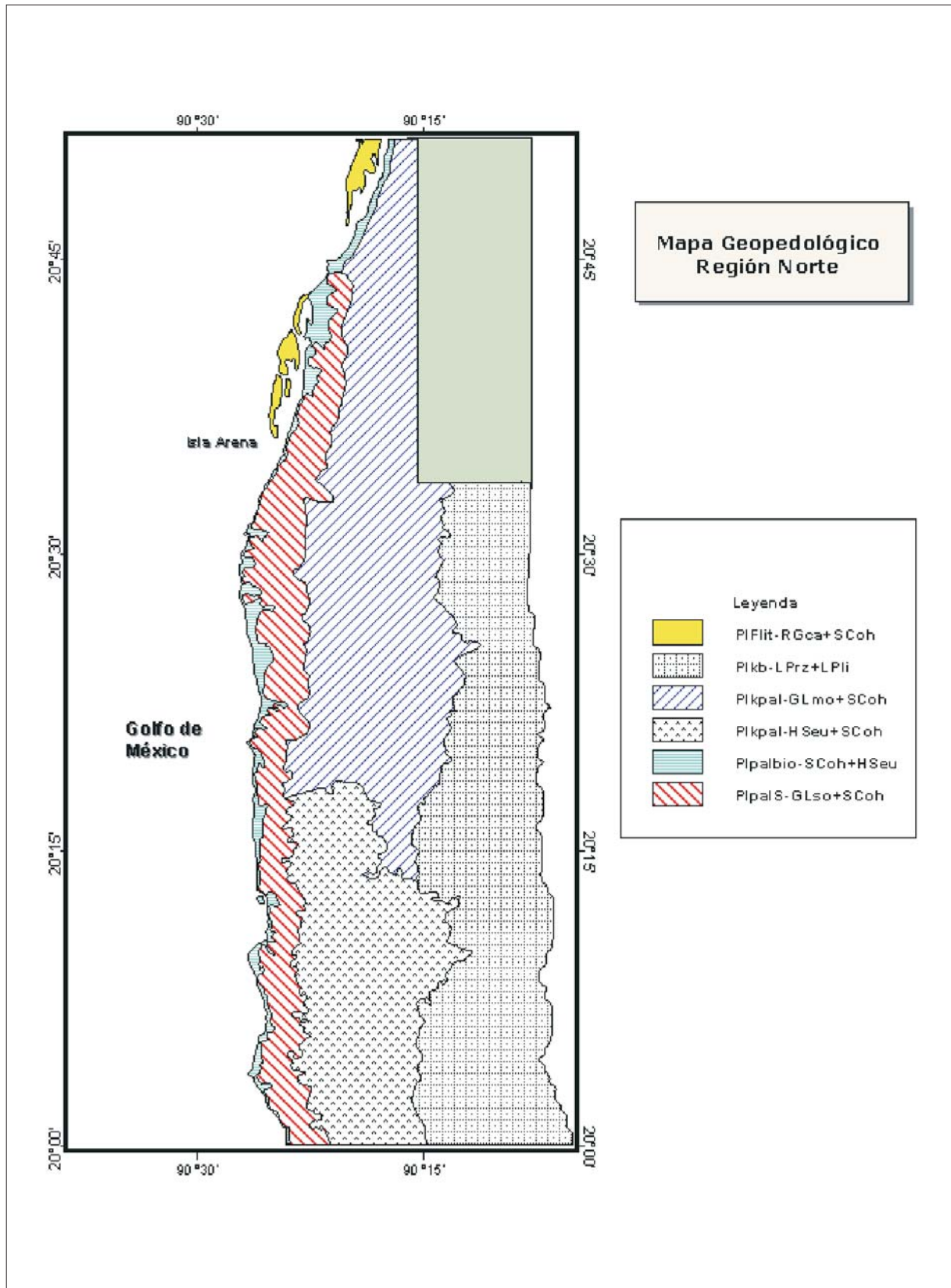
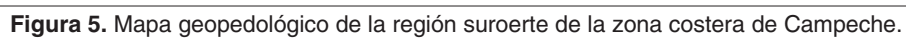


Figura 4. Mapa geopedológico de la región norte de la zona costera de Campeche.



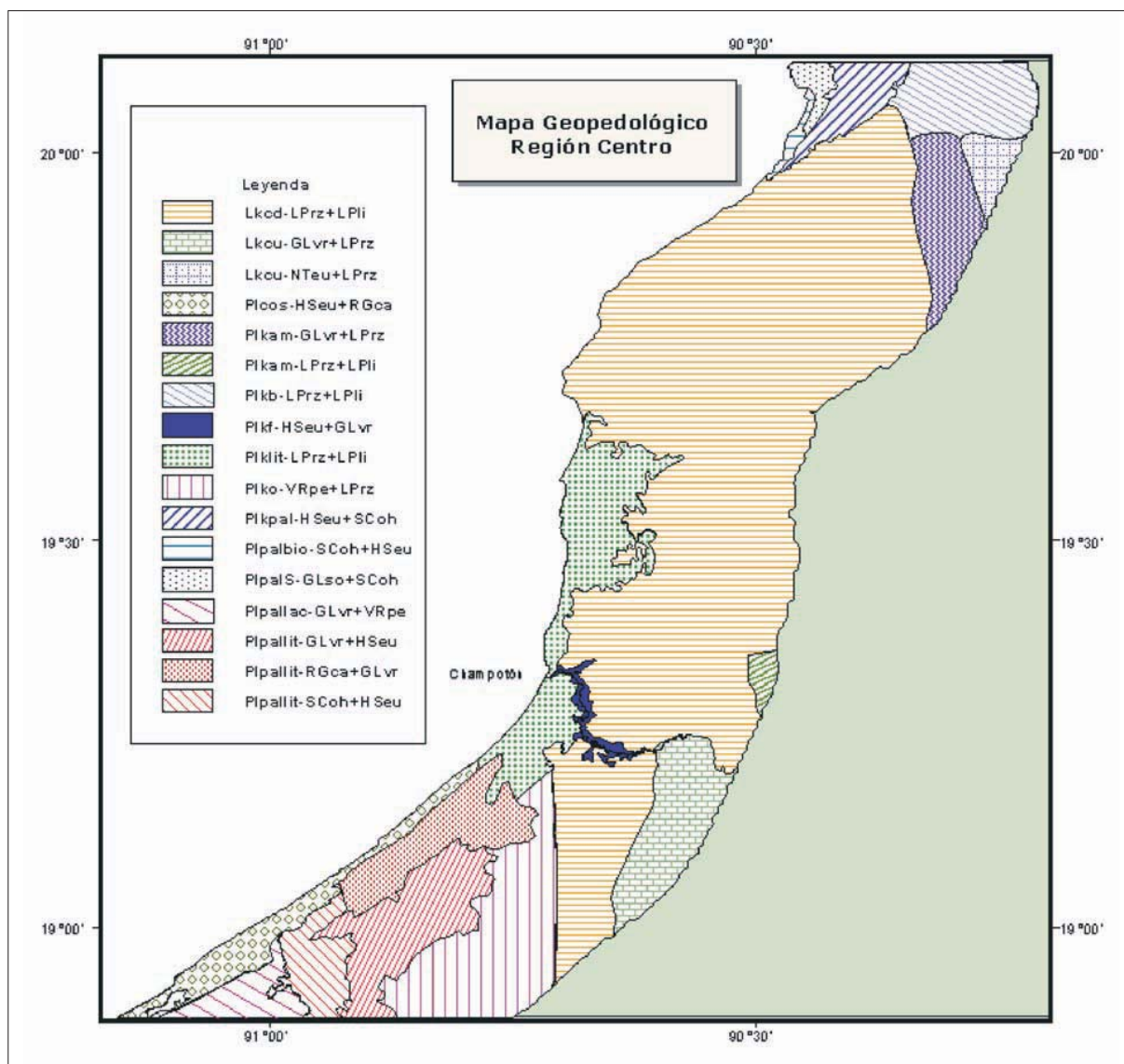


Figura 6. Mapa geopedológico de la región centro de la zona costera de Campeche.

propias de la región. Los Histosoles que se encuentran principalmente en las subregiones norte y centro, presentan importantes cantidades de materia orgánica en sus horizontes debido a su acumulación sobre planicies inundables en la época de lluvias. Bajo las mismas condiciones se distribuyen los Solonchaks aunque bajo procesos de salinización asociados a altos regímenes de evapotranspiración sobre cubetas de decantación. Los Cambisoles se presentan dispersos y en parches en toda el área de estudio debido a que son suelos jóvenes de transición, donde la coraza calcárea es resistente al intemperismo físico y químico. Los Luvisoles se encuentran en la región suroeste con un horizonte gley. Las coloraciones rojo amarillentas visibles en los Nitosoles al igual que en los Cambisoles y Luvisoles, se deben también a los mismos minerales arcillosos y óxidos de hierro, bajo diferentes intensidades de hidratación.

En los suelos calcáreos como los Leptosoles réndzicos y líticos, la capacidad de intercambio catiónico, a diferencia de los Luvisoles, Nitosoles y Cambisoles, es relativamente alta, debido a las también altas cantidades de materia orgánica humificada.

Los suelos hidromórficos como los Gleysoles, presentes en las regiones norte y suroeste tienen una abundante humedad interna, que condiciona una serie de procesos pedogenéticos específicos (gleyzación), independientemente de la naturaleza del material de origen y otros factores externos. La gleyzación reduce la intensidad de otros procesos pedogenéticos, como la intemperización y lixiviación, y hace que la descomposición y transformación de minerales sea lenta, actuando por fenómenos químico-biológicos, donde los microorganismos anaeróbicos desempeñan una función fundamental.

En el caso de los suelos aluviales como los Fluvisoles, que se presentan en una unidad geopedológica de la región suroeste, son poco desarrollados y con una incipiente diferenciación de horizontes. Tienen una sucesión en sentido vertical, de capas o estratos muy semejantes unos de otros, resultado de los frecuentes fenómenos de deposición de materiales durante los desbordes en el periodo de lluvias. Mineralógicamente dominan arenas de cuarzo, feldspatos y micas, con algunas partículas calcáreas.

En cuanto a la importancia relativa de los elementos del paisaje que permiten diferenciar las unidades geopedológicas, destaca sin duda el relieve y la dinámica e intensidad de los procesos geomorfológicos. Sin embargo, existen otros elementos del paisaje que modulan o bien son indicadores no solo de los procesos pedogenéticos sino de la dinámica del sistema, como la vegetación que es indicador de inundabilidad, salinidad, profundidad del suelo, degradación ambiental, así como indirectamente del régimen climático. Aunque presenta transformaciones antrópicas muy dinámicas sus límites y respuestas ecológicas son observables y por tanto cartografiables. Por otra parte el clima como elemento del paisaje además de no tener límites tangibles, para la península de Yucatán, salvo la anomalía climática del noroeste donde el clima es más seco, se presentan climas muy homogéneos debido, entre otras razones, al bajo efecto de la continentalidad, a rangos altitudinales irrelevantes (0-350 msnm) para la variabilidad climática, poca oscilación térmica, temperatura promedio superior a 18° C, zonalidad latitudinal poco significativa y régimen de lluvias en verano. Esta regularidad en el comportamiento climático permite inferir igualmente regularidades en las respuestas biogeográficas de la biota y por lo tanto no permiten diferenciar con claridad las fronteras entre unidades geopedológicas. La diversidad litológica que tradicionalmente condiciona la naturaleza mineral de los suelos en la península de Yucatán presenta mucha homogeneidad debido al mismo origen geológico reciente (plioceno-cuaternario) de las rocas carbonatadas que la componen (Lugo *et al.*, 1992). De esta manera las variaciones en la cantidad constitutiva de carbonatos en los suelos tienen que ver con el propio desarrollo del perfil y no solo con las rocas del sustrato.

La existencia de la diversidad litológica, las fluctuaciones climáticas, los cambios en los tipos de vegetación y la influencia de la actividad humana pueden afectar el desarrollo unidireccional esperado entre la topografía y distribución de los tipos de suelos (Gerrard, 1990; Gerrard y Baker, 1990; Gerrard y English, 1990). En el área de estudio la afectación por actividades antrópicas presenta diferentes grados dependiendo de la actividad económica y su persistencia en el tiempo. La afectación, sobre todo a la cobertura vegetal, impide en algunos casos hacer correlaciones directas entre el tipo de suelo y el tipo de vegetación, sin embargo, los relictos o las comunidades secundarias también pueden indicar el estado actual de los suelos así como su grado de afectación.

Los manglares de la región suroeste presentan una amplia variedad de sustratos de origen litoral inundados frecuentemente por aguas salinas y salobres sin oleaje fuerte, configurando planicies litorales, palustres y lacustres biogénicas. El grado de desarrollo y extensión de este tipo de vegetación indica el grado de estabilidad del medio en el que se encuentran, siendo los manglares más vigorosos y extensos los del sistema lagunar Pom-Atasta, esta-

blecidos en lodo, arena fina, y suelos limosos de costas deltaicas, líneas intracostas lagunares y líneas de playas de los sistemas estuarinos. Hasta hace unas décadas se encontraban más o menos conservados en la región suroeste, sin embargo, ha sido afectado por la ganadería extensiva interrumpiendo lo procesos de sucesión vegetal y compactado los suelos. Esto ocurre en mayor o menor grado en prácticamente todas las unidades geopedológicas de la región suroeste.

El desarrollo de la vegetación de planicies pantanosas, se debe a una constante y rápida saturación hídrica y acumulación de arcillas en los suelos. Tal es el caso de la vegetación de sabana, que cubre las planicies palustres con suelos profundos, arcillosos, con drenaje deficiente y fangoso en tiempo de lluvias. Lo mismo sucede con el tular, las selvas bajas inundables y los palmares, los cuáles tienen especies dominantes selectivas, como *Paurotis wrighthii* (tasiste) que se desarrolla mejor en suelos más húmedos y con drenaje más deficiente que *Sabal mexicana* (huano). Este último está mejor representado en las regiones norte y centro.

En el caso de las selvas altas y medianas subperennifolias se desarrollan en suelos con buen drenaje, desde los someros hasta los profundos y con relieve plano u ondulado. Mientras que la selva baja subperennifolia se encuentra sobre suelos profundos con drenaje deficiente. Tienen un mayor grado de conservación debido a que han sido considerados por mucho tiempo como suelos inapropiados para la agricultura. En la región norte el uso agrícola y ganadero extensivo se encuentra restringido por las condiciones salinas y de inundabilidad de los suelos.

La identificación y descripción de 51 unidades geopedológicas de la zona costera del Estado de Campeche, a partir de 22 unidades geomorfológicas evaluadas y posteriormente sintetizadas con los factores climáticos, de vegetación, litológicos y edafológicos, permitió inferir algunas claves sobre el balance morfogénesis-pedogénesis a escala regional. La morfogénesis predominante es la cárstica (principalmente en la regiones norte y centro), palustre (en las tres regiones de mapeo) litoral y fluvio-palustre (sólo en la región suroeste). Dominan las planicies por sobre las elevaciones. Los procesos morfodinámicos predominantes son: el oleaje costero de baja intensidad (acumulativo y/o erosivo), los flujos intermareales (ordinarios y máximos), las resurgencias subterráneas, las inundaciones (temporales, permanentes y extraordinarias), la erosión y disolución diferenciales, la acumulación deluvial en depresiones u hondonadas y hidrodinámica superficial entre hondonadas interconectadas.

Entre los ambientes naturales existen estuarios, lagunas costeras (Laguna de Términos), esteros (de Sabancuy), bajos y barras de arena, marismas, pantanos estuarinos y dulceacuícolas (cercaños a los sistemas fluvio-lagunares), selvas bajas inundables y petenes que conforman el mosaico geopedológico predominante, al interactuar morfogenética y pedogenéticamente. Sin embargo, se han creado diversos ambientes antrópicos que han modificado estos procesos naturales, tales como los pastizales cultivados e inducidos, los canales artificiales para la explotación petrolera, las humedales controlados para el cultivo de arroz y los estanques acuícolas abandonados y en funcionamiento



En general en el área de estudio domina la pedogénesis por sobre la morfogénesis, debido a una predominancia de unidades geopedológicas con planicies sobre las de lomeríos. Los Gleysoles vérticos típicos de planicies palustres se desarrollan a partir de horizontes C arcillosos. En el caso de los Leptosoles réndzicos y líticos la pedogénesis no se ve favorecida debido al fuerte intemperismo físico y químico y las lluvias torrenciales de temporada sobre áreas desprovistas de vegetación, manteniéndose en un estado incipiente de desarrollo, por lo que, en el balance morfogénesis-pedogénesis predomina el primero. En los Solonchaks e Histosoles la pedogénesis ejerce procesos de salinización y gleyzación respectivamente en planicies bajas. En cuanto a los Regosoles formados a partir de la estratificación de arenas, la pedogénesis se ve limitada

por las rompientes inestables afectadas por el oleaje y las corrientes litorales. Los Fluvisoles aparecen de forma puntual en la región suroeste y son favorecidos por la morfogénesis de ambientes fluvio-palustres.

En cuanto al conjunto de las unidades geopedológicas es notoria la mayor diversidad y cantidad de unidades en la región suroeste que en el resto de las regiones, esto debido a los ecotonos morfogenéticos y de inundabilidad identificados. En la región norte predominan las unidades cárstico-palustres y semihidromórficas de grandes extensiones territoriales y en la centro las unidades cársticas automórficas de lomeríos con extensiones intermedias y disgregadas.

DISCUSIÓN

El mapa geomorfológico propuesto en este trabajo identifica 10 nuevas unidades de mapeo en comparación con el de Lugo y Arizaga (1999), principalmente al sur de la zona costera, debido al trabajo de campo que permitió aumentar la precisión de las fronteras y observar unidades geomorfológicas imposibles de identificar con los mapas topográficos 1:50,000.

Según la norma de cartografía de suelos (SEMARNAP, 2000), el mapa geomorfológico de la zona costera de Campeche podría ser considerado como mapa base en la elaboración del mapa de suelos a escala 1:250,000. Sin embargo, comparando el mapa de suelos del INEGI (1984) con el geomorfológico, los polígonos no coinciden. En el mapa de suelo del INEGI el número de polígonos es mucho mayor a los 22 del mapa geomorfológico debido a que el área mínima cartografiada utilizada por el INEGI en ese tiempo era menor a 1 cm², que es la nueva área mínima propuesta por la norma de cartografía y clasificación de suelos (SEMARNAP, 2000).

En el mapa geopedológico se identificaron y describieron 51 unidades geopedológicas, con base a la siguiente información: 22 unidades geomorfológicas; 33 unidades de suelo; seis tipos de vegetación; y cinco tipos de formaciones geológicas.

La inclusión de la vegetación en la definición de las unidades geopedológicas permitió mejorar la definición de los límites de las unidades geopedológicas debido a que es finita y a pesar de que es móvil. Los límites intangibles del clima impidieron su utilización en la definición de las unidades geopedológicas.

La unidad de suelos más representativos del área de estudio son los Gleysoles vérticos, que están representados en 22 unidades geopedológicas, le siguen en orden descendente Gleysoles éutricos, Leptosoles réndzicos, Solonchaks gléyicos, Regosoles calcáricos, Solonchaks ócricos, Histosoles éutricos y Gleysoles mólicos.

CONCLUSIONES

En la elaboración del mapa geomorfológico se identifican tres procesos básicos: a) Los procesos de tipo cárstico, en las regiones norte y centro; b) Palustre, en las tres regiones de mapeo; y c) Fluvial, sólo en la región suroeste. Los *procesos geodinámicos* que se identificaron son: el oleaje costero acumulativo y/o erosivo; los flujos intermareales ordinarios, diarios y estacionales; las resurgencias subterráneas; las inundaciones ordinarias, temporales y permanentes; las erosiones leves y diferenciales con escorrentías de laderas y acumulación de sedimentos; las depresiones con acumulación coluvial; el hidrodinamismo en depresiones intercaladas e interconectadas; las inundaciones permanentes y/o semipermanentes con áreas de pantanos interfluviales, aunque sólo en la región suroeste.

Los mapas geopedológicos de la zona costera, por su nivel de detalle y por la integración de los elementos del ambiente son de mayor utilidad en el ordenamiento del territorio en comparación con los mapas geomorfológico y pedológico a escala 1:250,000. Por ejemplo, a) En general, en la región norte el uso agrícola para los suelos está muy restringido debido a las condiciones salinas y extremas del clima, la vegetación esta fragmentada. La unidad Pllacmarbio-SCgl+GLEu es la que presenta los manglares más conservados del área de estudio. Las unidades Plpal-lit-RGca+GLvr y Plfpal-GLEu+VRpe se encuentran cultivadas con palma de coco, logrando buenas rendimientos; en las unidades en las que predominan los Gleysoles la ganadería no es una actividad rentable y contribuye de manera importante a la degradación del suelo y opción para el cultivo de arroz.



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento del proyecto 31624B y por las becas a los dos primeros autores.

REFERENCIAS

- Benítez, J., J. Rojas, D. Zárate, G. García, 1991.** Avances en el diagnóstico ecológico-geográfico de la llanura deltaica del río Usumacinta, sureste de México. *Jaina Boletín Informativo*, 2 (3): 4-5.
- Coll Atántida, 1975.** El suroeste de Campeche y sus recursos naturales, Cuadernos del Instituto de Geografía. Univ. Nal. Aut. México, Editorial Universitaria, México, D. F. pp. 31-46.
- CRTP (Centro Regional Tropical Puyacatengo), 1979.** Suelos y su génesis. Colección agricultura tropical, UACH/Dirección de Centros Regionales/Centro Regional Universitario del Sureste. Publicaciones del CRTP, Vol. 2-3, Teapa, Tabasco, México.
- FAO-Unesco, 1999.** Base referencial mundial del recurso suelo, Informes sobre recursos mundiales de suelos, 84 (1): 1-90.
- Flores, J. S. y I. Espejel, 1994.** Tipos de vegetación de la Península de Yucatán, Etnoflora Yucatanense, Fascículo 3, Sostenibilidad Maya, Univ. Aut. Yucatán, México. pp. 44-86.
- Galicia, L., García Oliva F., y López Blanco J., 1995.** Efecto de la estructura jerárquica del relieve en la distribución de las características físicas de los suelos en una cuenca tropical estacional mexicana, Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía UNAM, No. 3, México. pp. 54 y 55.
- García de Fuentes A. y J. Córdoba y Ordóñez Eds. 1999.** Atlas de procesos territoriales de Yucatán. Fac. Arq. Univ. Aut. Yucatán, Editorial UADY-PROEESA, México. pp. 159-160, 166, 187 y 191.
- García, E., López G. J. L. y L. R. Orellana, 1999.** Mapa de climas de la Península de Yucatán, escala 1:1 200 000. In: García de Fuentes Y Córdoba y Ordóñez (Eds.) Atlas de procesos territoriales de Yucatán, Fac. Arq./Univ. Aut. Yucatán, Editorial UADY-PROEESA, México.
- Geissert, K. D., 2000.** La cartografía morfoedafológica: un método integral para la evaluación del recurso suelo, 1-14 pp. In: López-Olgún, J. F.; A. Aragón G. y M. A. Valera P. (Eds.) Métodos de investigación en las ciencias ambientales. Publicación especial de la Benemérita Univ. Aut. Puebla, México.
- INEGI, 1984.** Carta Edafológica: Calkiní F15-9-12, Campeche E15-3, Ciudad del Carmen E15-6 Frontera E15-5, Mérida F16-10, Felipe Carrillo Puerto E16-1, Chetumal E16-4-7, Tenosique E15-9, Escala 1: 250 000, México.
- INEGI, 1984.** Carta de Hidrología de Aguas Superficiales: Calkiní F15-9-12, Campeche E15-3, Ciudad del Carmen E15-6 Frontera E15-5, Mérida F16-10, Felipe Carrillo Puerto E16-1, Chetumal E16-4-7, Tenosique E15-9, Escala 1: 250 000, México.
- López-Ramos, E., 1979.** Geología de México, Tomo 3, ESIA, Instituto Politécnico Nacional, México. pp. 263-295.
- Lugo-Hubp, J., J. F. Aceves-Quesada y R. Espinasa-Pereña, 1992.** Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán, Instituto de Geología, UNAM, 10 (2): 143-150.
- Lugo-Hubp, J. y García-Arizaga Ma. T., 1999.** Mapa de geomorfología de la Península de Yucatán, Escala 1:1 200 000. En: García de Fuentes y Córdoba Y. Ordóñez (Eds) Atlas de procesos territoriales de Yucatán, Fac. Arq./Univ. Aut. Yucatán, Editorial UADY-PROEESA, México.
- Ortiz-Pérez, M. A. y J. Benítez, 1996.** Elementos teóricos para el entendimiento de los problemas de impacto ambiental en planicies deltáicas: la región de Tabasco y Campeche. p. 483-503. In: A. V. Botello, J. L. Rojas-Galaviz, J. A. Benítez, D. Hárte-Lomelí (Eds.). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica, 5. 665 p.
- Semarnap/Instituto de Geografía-UNAM/INEGI, 2001.** Inventario Forestal Nacional 2000-01, coberturas digitales a escala 1: 250 000, ñonas 14-15-16, México.
- Siebe, C., Jahn R. y K. Stahr, 1996.** Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Soc. Mex. de la Ciencia del Suelo A. C., Publicación Especial No. 4. Chapingo, México. 52 p.
- Tricart, J. y J. Kilian, 1982.** La eco-geografía y la ordenación del medio natural: 22 elementos críticos. Editorial Anagrama, Barcelona. pp. 132-135.
- Villalobos ñapata, G. J., 1998.** La zona costera y sus ecosistemas, módulo IX ñonas costeras. En: Centro Interdisc. de Invest. y Est. Medio Amb. y Des. del Inst. Pol. Nac./Inst. Nac. de Ecol. de la Sría. de Medio Amb. Rec. Nat. y Pesca, Diplomado en política y gestión ambiental: Programa de actualización académica, México. pp. 33-34 y 110-112.



LA NOMENCLATURA MAYA DE SUELOS: UNA APROXIMACIÓN A SU DIVERSIDAD Y SIGNIFICADO EN EL SUR DEL ESTADO DE YUCATÁN

Jorge Duch Gary

Centros Regionales de la Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN

El conocimiento tradicional de los suelos que aún persiste entre los campesinos mayas del estado de Yucatán, constituye un saber empírico derivado de su práctica agrícola milenaria. Se trata de un acervo que forma parte de un amplio legado cultural que hoy se expresa en el habla cotidiana de la sociedad rural yucateca, y en el que hay que destacar que la terminología edáfica maya sigue siendo un referente empírico básico para la toma de decisiones acerca del uso y manejo agrícola de los suelos en el sur de la entidad. Estos fueron argumentos suficientes para iniciar el estudio de este acervo lingüístico desde una perspectiva agronómica, con la intención de encontrar elementos y relaciones que permitieran avanzar hacia un mejor entendimiento de la composición, morfología y comportamiento de los suelos en dicha región y, sobre esta base, promover la búsqueda y el empleo de mejores y más adecuadas técnicas agrícolas. En esa perspectiva, el propósito central del trabajo es el de contribuir al estudio y explicación del conocimiento edafológico tradicional que aun se conserva como parte de la cultura Maya en el sur del estado de Yucatán. En lo particular, se pretende alcanzar los siguientes objetivos: a) Cuantificar el repertorio de los términos mayas relacionados con las nociones de suelo o tierra, y sus significados; b) Recuperar el contenido etimológico de los términos edáficos mayas de acuerdo con su equivalente en español y precisar la magnitud de la diversidad de los suelos; c) Determinar si la nomenclatura maya de suelos se apega a un esquema clasificatorio, y si así fuera, indagar cuál sería la forma y lógica de tal ordenamiento.

ABSTRACT

The traditional knowledge of the soils from the Mayan farmers in Yucatan is a empirical knowledge coming up for their agriculture practices from several centuries. It is a knowledge accumulation that is part of a cultural heritage that is expressed in everyday life in the rural society and the Mayan edafic terminology is still present and it is basic for taking decisions and for the use and soil management in south side from the state. These were the facts to initiate the study of the Mayan soil terminology from the agronomic point of view and with the purpose of finding relationship for a better

understanding of soil morphology, composition of this region and on this base, to promote new and better agricultural techniques. From this point of view, this study pretend to explain the traditional edafologic knowledge that still remain as a part of the cultural heritage in south side of Yucatan. The objective are: a) To Know the Mayan terminology related to the soil and land and their meanings. b) To recover the etymologic content of the Mayan edafic terms according to its equivalent in Spanish to make more precise the soil classification. c) To determine if the Mayan nomenclature is close to a classification system and what would be the logic of it.

INTRODUCCIÓN

En México es común encontrar estudios edafológicos en los que sus autores consideran apropiado aplicar términos regionales derivados de lenguas prehispánicas, algunos de los cuales son todavía utilizados por los campesinos para denominar ciertos aspectos relativos a los suelos (o tierras), ya sea de manera genérica o específica. En el estado de Yucatán se ha llegado, incluso, a adoptar los términos mayas como denominación principal de ciertas unidades de clasificación y cartografía de suelos (*grupos, series o tipos*) en los estudios que sobre el tema han realizado destacados investigadores de distintas instituciones académicas, o prestadoras de servicios técnicos al sector rural, como es el caso de diversos reportes científicos relacionados con temas agronómicos, geográficos y ecológicos, o los informes de los levantamientos agrológicos y mapas edafológicos que se han realizado en la entidad.

El conocimiento tradicional de los suelos que aún persiste en el estado de Yucatán, constituye un saber empírico derivado de la práctica concreta de los agricultores mayas. Esto significa que se trata de un acervo milenario que forma parte de un amplio legado cultural que perdura como parte del habla cotidiana de la sociedad rural yucateca y, en ese sentido, hay que destacar el hecho de que en la actualidad la terminología edáfica maya sigue siendo un referente empírico básico para la toma de decisiones acerca del uso y manejo agrícola de los suelos, y que tales decisiones han sido históricamente exitosas para sustentar la reproducción biológica y cultural de este amplio conglomerado social.

No obstante, a primera vista llama la atención la existencia de un extenso repertorio de términos edáficos mayas, lo cual ha conducido con relativa frecuencia a suponer, por un lado, una igualmente abundante diversidad de *tipos de suelo*¹ presentes en la entidad, situación que en apariencia no concuerda con la variación que se ha podido observar de manera directa y, por otra parte, que esta terminología constituye un *sistema de clasificación de suelos* equiparable a los esquemas de la taxonomía edáfica moderna.

Estos hechos fueron, por sí mismos, argumentos suficientes para iniciar el estudio de este saber campesino desde una perspectiva académica, con la intención de encontrar elementos y relaciones que permitan alcanzar un mejor entendimiento de la composición, morfología y comportamiento de los suelos en el sur del estado de Yucatán y, sobre esta base, promover el empleo de aquellas técnicas

que faciliten su uso y manejo. Lo anterior podría ser útil, asimismo, para demandar con argumentos cada vez más precisos la aplicación de políticas públicas acordes con las particularidades del campo yucateco.

El propósito general del trabajo es el de contribuir al estudio y explicación del conocimiento edafológico tradicional que aun se conserva como parte de la cultura Maya en la península de Yucatán. Además, en lo particular pretende alcanzar los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar el repertorio de los términos mayas relacionados con las nociones de suelo o tierra, que aún utilizan los campesinos del sur de Yucatán como parte de su cultura productiva agrícola.
- Recuperar el significado etimológico de los términos edáficos mayas, y de acuerdo con su equivalente en español, determinar las razones y circunstancias de su aplicación genérica o específica.
- Precisar hasta qué grado el repertorio de términos edáficos mayas registrados se corresponde con la verdadera diversidad de suelos que es posible encontrar en el sur de la entidad.
- Verificar si la nomenclatura maya de suelos se apega o no a un esquema clasificatorio, y de ser así, precisar cuáles serían la forma y la estructura lógica del ordenamiento.

Es decir, se busca contribuir a un mejor entendimiento de la organización y sentido de la nomenclatura en su conjunto, lo mismo que de las consideraciones que ella encierra en relación con el comportamiento edáfico bajo diversos sistemas agrícolas, en virtud de que este saber podría aportar elementos destinados a enriquecer la confrontación de experiencias empíricas con las concepciones y técnicas de manejo que propone la moderna ciencia del suelo. También podría favorecer el establecimiento de una más sencilla y franca comunicación de los agricultores yucatecos con los promotores agrícolas, científicos e investigadores universitarios.

Además, y con la idea de ubicar el estudio en el marco de las orientaciones y medios aplicados en los programas y acciones del pretendido desarrollo rural que promueven las instituciones oficiales y los organismos no-gubernamentales

¹ En este trabajo, la expresión tipo de suelo se aplica para hacer referencia a una unidad taxonómica de alto nivel de generalización; esto es, a un cierto agrupamiento genérico de suelos sensiblemente similares en su constitución y morfología y no para identificar subdivisiones dentro de una determinada serie de suelos por diferencias en la textura del horizonte A, consideración solo válida para la taxonomía de suelos desarrollada en los Estados Unidos de Norteamérica.



mentales, el trabajo incluye una breve discusión respecto a la importancia que representaría incorporar este conocimiento a los contenidos de la enseñanza agrícola superior del país y a la formación de los profesionales universitarios.

Para los fines específicos de este documento, en la presente comunicación se exponen las principales ideas

que motivaron la puesta en marcha de este trabajo, se señalan ciertos aspectos de interés en torno a los esfuerzos realizados en ese mismo sentido por otros estudiosos del tema en el pasado y se comentan y discuten de manera sucinta algunos de los resultados obtenidos hasta ahora.

EL PUNTO DE PARTIDA

En el estado de Yucatán se conoce y emplea un amplio repertorio de términos o vocablos de origen maya relacionados con los suelos o tierras. En efecto, es una costumbre generalizada entre las personas que tienen que ver con la cuestión rural, y muy especialmente con la agricultura, trátase de los propios productores campesinos o empresarios, de jornaleros, técnicos y promotores agrícolas, o de estudiosos de su singular problemática, la de utilizar en su hablar cotidiano una serie de términos que provienen de la lengua maya que todavía pervive en la región peninsular, para reconocer y denominar los diversos tipos de suelo que aparecen en la entidad.

Todavía hace pocos años no resultaba extraño, hasta para el común de la gente que habitaba en los principales centros urbanos yucatecos, llamarle *kancab* (*k'áankab*) al suelo café rojizo de los jardines y parques de su colonia o barrio, *tseque* (*tsek'e*) al terreno pedregoso y con afloramientos rocosos, típico de patios o solares, y *saskab* (*sahkab*) al terreno material de color blanco que suele aparecer en excavaciones más o menos profundas, como sucede en los pozos artesianos y canteras.

De hecho, también es frecuente escuchar en los ámbitos técnico y académico, incluso fuera de la península yucateca, de una clasificación maya de suelos, lo que da por supuesto la existencia de una organización consciente -cualquiera que ésta sea- del conocimiento empírico relativo a los suelos que ha sido generado en esta peculiar región geográfica como parte de su proceso cultural, acumulado en la memoria colectiva de sus pobladores y transmitido por medios tradicionales, generación tras generación, desde los tiempos prehispánicos hasta la época actual.

En respaldo de tales apreciaciones, Aguilera (1959) comenta en su trabajo sobre los suelos de Yucatán lo siguiente:

- Que la nomenclatura empleada por los mayas es tan clara como la que se utiliza en los estudios edafológicos actuales para clasificar a los suelos de acuerdo con las reglas de la taxonomía internacional.
- Que la terminología de los agricultores mayas es muy parecida a la empleada por los agricultores y edafólogos de la escuela rusa y estadounidense.

A la luz de resultados obtenidos en algunos otros estudios realizados en la misma época, han surgido opiniones en el sentido de que el conjunto de términos mayas, no obstante su evidente utilidad para identificar distintos tipos de suelo, reconocer muchas de sus diversas características y apreciar sus cualidades agrícolas, no constituye un verdadero sistema de clasificación de suelos.

Al respecto, Hernández (1959) señala dos conclusiones importantes con relación a la terminología maya empleada en la descripción de los suelos que presenta en su trabajo sobre la agricultura de la península de Yucatán:

- Que no representa una clasificación pedológica (o edafológica) basada en los conocimientos actuales de dicha ciencia, pues no sugiere una idea clara de la influencia de los fenómenos a largo plazo.
- Que sí, en cambio, refleja relaciones importantes entre los factores suelo-sistema de cultivo-producción de maíz.

Estas dos últimas consideraciones dejan entrever, asimismo, que dicha terminología podría más bien configurar una forma peculiar de *nomenclatura edáfica*, lo que implicaría entonces una organización en apariencia más concreta del conocimiento tradicional relativo a los suelos de la península de Yucatán, no necesariamente menos compleja aunque sí diferente a los propósitos y esquemas aplicados en los sistemas modernos de clasificación de suelos².

En ese sentido, ciertos aspectos parecen sugerir que este ordenamiento aún no ha sido cabalmente comprendido. Tal vez esto sea así, por el hecho de admitirse *a priori* que la terminología edáfica maya está organizada en un esquema similar a los que muestran los sistemas modernos de clasificación de suelos que se conocen en México, sin haberse planteado antes la posibilidad de que este conocimiento pudiera estar ordenado de otra manera; esto es, indagar cuál sería su estructura lógica y sus criterios de diferenciación o agrupamiento y que sentido tendrían.

Con la intención de clarificar algunas de las dudas señaladas, se consideró conveniente intentar responder las siguientes cuestiones: ¿Cuál es la noción o significado conceptual de suelo (o tierra) que poseen los campesinos yucatecos? ¿De qué manera ellos identifican al suelo en

² En el contexto de este trabajo se entiende por *nomenclatura* aquella relación de voces técnicas referidas a una especialidad en el campo de la ciencia o el arte; o bien, el conjunto de términos que se usan en las clasificaciones para denominar a los individuos o grupos que son objeto de tales ordenamientos.

general y en que forma captan su variabilidad específica? ¿Cómo se encuentra organizado el conocimiento empírico relativo al suelo? ¿Cuáles son los principios y la lógica de su estructura? y ¿Cuál es el sentido o significación de tal ordenamiento?

De cualquier manera, trátase este conjunto de términos mayas de un sistema de clasificación de suelos con una lógica y sentido similares a los modernos o de un ordenamiento distinto, para el caso del estado de Yucatán es indispensable remarcar por lo menos tres hechos evidentes, tanto en la información contenida en distintas obras relativas al tema como en aquella que proporcionan directamente en el campo los agricultores.

Primero, que existe un grupo de vocablos que son utilizados para denominar determinados tipos de suelo de manera genérica, otro para hacer referencia específica a cada una de sus numerosas características morfológicas reconocidas, uno más para destacar la posición topográfica o condición ambiental donde los suelos se ubican y finalmente un cuarto agrupamiento de términos sobre la base de la calidad de los suelos respecto al uso y manejo agrícola.

Es asimismo evidente que en los cuatro grupos aparece de manera recurrente la raíz *lu'um*, que en lengua maya significa suelo o tierra³, y que estos vocablos se asocian de forma muy precisa con el considerable acervo de conocimientos empíricos relativos al entorno geográfico, así como con una amplia experiencia respecto al comportamiento edáfico bajo los distintos sistemas de uso y manejo agrícola que son propios de la entidad.

Segundo, que la aplicación de tales términos en la denominación de los suelos por parte de los campesinos yucatecos, genera en la práctica, y con notable frecuencia, algunas confusiones en los técnicos y académicos (agrónomos, edafólogos, biólogos, etc), porque en ocasiones un término relativo a una cierta característica morfológica, o a una condición topográfica o ambiental, puede emplearse lo mismo para identificar específicamente aquella característica o condición de la que se deriva su expresión semántica, que para denominar al suelo en su concepto genérico; es decir, como una unidad taxonómica.

En tercer lugar, se puede afirmar que en la medida en que existe un entendimiento insuficiente respecto a los principios básicos y alcances de la organización del saber edáfico maya, es probable que la cantidad de términos que se emplean para denominar a los tipos de suelo que aparecen en la región peninsular sea mayor que la diversidad que ellos muestran en la realidad; y a esto habría que agregar las confusiones e imprecisiones que, como se ha visto, conlleva la aplicación del amplio repertorio de términos mayas relacionados con los suelos; especialmente con su tipología, su morfología, los ambientes en los que se encuentran y sus cualidades agrícolas.

En resumen, lo que se busca es precisar la magnitud de este amplio repertorio de términos mayas, y si él configura un sistema de clasificación de suelos, o si se trata solamente de una relación -o listado- de voces referidas a este cuerpo natural.

Este propósito, hay que reconocerlo, entraña una seria dificultad epistemológica de origen, en virtud de que la postura del autor acerca de la percepción y conocimiento campesino está de alguna manera sesgada por el contenido y perspectiva del acervo que le da sostén a la moderna ciencia del suelo; sin embargo, en aras de remediar o, por lo menos, atenuar esta limitación involuntaria, se han postulado las siguientes hipótesis generales de trabajo:

- La amplia terminología maya de suelos constituye en su conjunto una modalidad particular de *nomenclatura edáfica*, por lo que ella encierra de manera simbólica una forma específica de percepción y saber empírico sobre el tema.
- La construcción semántica que muestran algunos de los diversos términos mayas acuñados en relación con los suelos, resulta parecida a la que siguen las nomenclaturas edáficas utilizadas en varios países (o en otras regiones de México), especialmente cuando derivan del color y la textura de los suelos.
- Lo anterior significa que dicha terminología parece fundamentarse en características propias de los suelos y no en interpretaciones referidas a propósitos utilitarios en particular, sin que ello signifique, de ningún modo, soslayar el vasto y preciso cúmulo de conocimientos respecto a sus propiedades y cualidades agrícolas.
- No obstante la nomenclatura edáfica maya contiene algunos principios taxonómicos generales, a la luz de la información disponible en relación con la organización del conjunto de términos mayas empleados en la denominación de diversos suelos, no se aprecia con suficiente claridad la existencia de una armazón o estructura taxonómica similar a la de los sistemas modernos de clasificación de suelos.

En ese orden de ideas, se consideró que lo conveniente sería entonces no intentar encuadrar de entrada a la nomenclatura edáfica maya en el esquema de un sistema formal (moderno) de clasificación de suelos, en razón de que este amplio repertorio de términos no responde necesariamente a los criterios de un ordenamiento de carácter sistemático y jerárquico. Es decir, frente al insuficiente entendimiento inicial no fue posible apreciar evidencias que permitieran sustentar con firmeza la existencia de categorías taxonómicas de mayor o menor nivel jerárquico para los tipos de suelo que son reconocidos con una determinada denominación.

Con otras palabras, si bien no se pudo identificar, por ejemplo, la presencia de subtipos dentro de los tipos de suelo reconocidos como tales, tampoco se descarta la posibilidad de reconocerlos en el curso del presente estudio. Aceptar lo anterior no implica negar que en algunos casos -no muchos por cierto- se pudieron apreciar esfuerzos por parte de los campesinos yucatecos para distinguir variantes de un mismo tipo de suelo, pero tampoco se logró precisar si éste ha derivado del saber propio de los campesinos, o de interpretaciones inducidas por técnicos y estudiosos de la agricultura yucateca, en su persistente

³ Las concordancias y discrepancias entre los conceptos de suelo y tierra, tanto en lo que toca a formulaciones científicas como al conocimiento empírico que manejan los campesinos yucatecos, constituye un tema polémico que se ubica en el contexto de las llamadas subjetividades, y el cual será discutido más adelante en otro apartado de este mismo documento.



afán por adecuar el conocimiento empírico a los cánones que dicta la moderna ciencia del suelo⁴.

En el estado de Yucatán, como en otras entidades del país, no es posible soslayar el hecho de que la sabiduría tradicional ha estado sujeta a un largo, espontáneo e inevi-

table proceso de aculturación que, sin ningún propósito de polemizar al respecto, ha introducido modificaciones sustanciales en el *corpus* del conocimiento autóctono de los suelos, transfigurando el acervo y sus significados originales.

ANTECEDENTES

Es de sobra conocido que en el estado de Yucatán existen diversos estudios relacionados con la agricultura tradicional, los cuales en buena parte están fundamentados en la sistematización y análisis del conocimiento empírico forjado y acumulado colectivamente por los propios campesinos, a través del trabajo realizado por incontables generaciones.

En todos o en la gran mayoría de estos estudios se destinan algunos tramos de su contenido para hacer referencias más o menos precisas al significado en español de los términos mayas utilizados para la denominación de los distintos tipos de suelo y/o sus diferentes características. Conviene aclarar, no obstante, que en unos casos la información relativa a la terminología maya de suelos que aparece en ellos es resultado de una indagación directa en campo, mientras que en otros corresponde a transcripciones, no siempre apegadas al texto original, de estudios edafológicos realizados con anterioridad. Asimismo, en el estado de Yucatán puede encontrarse una buena cantidad de estudios -ya sea volúmenes completos o capítulos de éstos- que se han hecho con el propósito específico de estudiar la composición y morfología de los suelos, o el uso y manejo agrícola a que ellos se destinan, y correlacionar los resultados con el conocimiento edáfico tradicional.

Entre los principales documentos encontrados sobre esta temática, es obligado mencionar entre otros los siguientes: a) *Tratado sobre la clasificación de los terrenos de Yucatán* (Cervera, 1896); b) *Reconocimiento agrológico regional del estado de Yucatán* (Ortiz, 1950); c) *Los Suelos* (Aguilera, 1959); d) *Reconocimiento de los suelos de la península de Yucatán* (Wright, 1967); e) *Estudio general del uso potencial de los suelos de la península de Yucatán* (Cervantes, 1972); f) *Capacidad de uso y manejo de los suelos de la península de Yucatán* (López, 1980); g) *El estudio de los suelos calcimórficos con relación a la producción maicera* (Pool, 1981); h) *Conocimiento y uso de la clasificación maya de suelos en el estado de Yucatán* (Pérez, 1984); e i) *La conformación territorial del estado de Yucatán* (Duch, 1988).

Aparte de las obras que se enumeran antes, resulta indispensable citar aquí también los muy numerosos y variados *levantamientos de suelos* realizados en la península de Yucatán por técnicos de la antigua Residencia de Agrología en Mérida, Yucatán, en los cuales por disposición institucional, las series de suelos fueron denominadas de

acuerdo con la terminología maya que hace referencia a los principales tipos de suelo regionales⁵.

Otra información importante al respecto es la que se consigna en las cartas edafológicas elaboradas por el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), a través de su Dirección de Geografía⁶.

Finalmente, hay que anotar la excelente recopilación de información edáfica contenida en el monumental Diccionario Maya-Español, realizado por un grupo de especialistas en lengua maya bajo la dirección del Maestro Alfredo Barrera Vázquez, y editado por la desaparecida empresa CORDEMEX en 1980.

En esta misma línea editorial es posible citar algunos documentos de interés: Términos mayas para la denominación de suelos, vegetación, topografía, cultivos y aguas (Canul, 1967); Glosario de términos agrícolas Maya-Español (Arellano, 1992) y Diccionario básico Español-Maya-Español (Bastarrachea, 1992).

De la revisión de las contribuciones anteriores se puede destacar, como una notoria tendencia natural, el interés de los autores por mostrar, traducido al español, el significado literal de cada término edáfico maya, o por describirlo brevemente también en aquel idioma.

De la confrontación de las diversas informaciones que aparecen en dichas obras, con frecuencia se aprecian numerosas diferencias en lo que toca a la ortografía del nombre maya de lo que parecería ser un mismo tipo de suelo, así como una gran variedad de significados para términos iguales o muy similares. Se observa, asimismo, que en algunos casos estas consideraciones pueden ser complementarias, en otros claramente diferentes y en algunos más hasta francamente contradictorias. Y esto se presenta tanto en relación con los tipos de suelo y sus características morfológicas, como con respecto a las interpretaciones que se hacen en cuanto a su calidad agrícola.

Hay igualmente casos en los que el contenido temático de una obra sufre algunas transcripciones modificadas, apareciendo en otros escritos con algunos cambios en su redacción. Un ejemplo de lo anterior se aprecia en el fascículo N° 3 del Programa Etnoflora Yucatanense, intitulado *Tipos de Vegetación de la Península de Yucatán* (Flores y

⁴ Tal es el caso, por ejemplo, de la subdivisión del tipo de suelo *áak'alche* en dos subtipos, atendiendo al color de su horizonte B: *áak'alche gris* y *áak'alche amarillo*.

⁵ Dependencia de la extinta Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, y que hoy pertenece a la Comisión Nacional del Agua.

⁶ Antes de incorporarse al INEGI se denominó Dirección General de Estudios del Territorio Nacional DETENAL).



Espejel, 1994), en el cual se transcribe parte del trabajo *Tratado sobre la clasificación de los terrenos de Yucatán*, escrito por Cervera (1863). En este trabajo las descripciones de los terrenos formuladas por tan insigne agrónomo yucateco aparecen reproducidas sólo parcialmente y con algunas alteraciones formales en relación con su texto original.

El problema que aquí se presenta son algunas confusiones que puede acarrear entre los lectores la versión modificada, al aparecer nuevas formas de escritura y connotaciones semánticas distintas sobre un determinado término edáfico, sin que medie una referencia que lleve a entender los significados anteriores, o por lo menos una explicación respecto a los cambios realizados, lo que permitiría discernir, entonces, si lo que se lee hoy incumbe a un planteamiento legado de tiempo atrás, o si es producto de un análisis o reflexión actual.

En la Tabla 1 se expone como ejemplo del problema relativo a las reproducciones modificadas que fue comentado anteriormente. La información que se incluye permite observar claramente algunas variaciones entre lo que cada autor señala con relación al nombre y descripción de un mismo tipo de suelo: así, mientras que para Cervera (1896) el suelo del ejemplo en cuestión se denomina *ca-*

por medio de un apóstrofe, escritura que se toma directamente del Diccionario CORDEMEX (Barrera, 1980).

Por otro lado, Bastarrachea (1992) indica que atendiendo al último acuerdo sobre la práctica, enseñanza y difusión del idioma maya yucateco celebrado en 1984, la escritura correcta del nombre de este tipo de suelo sería *káakab*.

Por otra parte, la definición de Arellano (1992), que no es sino una reproducción de la que aparece en el mencionado diccionario CORDEMEX, es notablemente distinta a las anteriores, pero además contiene una aparente contradicción al señalar que se trata de un “suelo pardo oscuro, de rendzina, *humocarbonatado*, con poco contenido de *humus*”.

En la definición que presenta Bastarrachea (1992), en su citado diccionario, aparece la primera parte de la que proporciona Arellano (1992), aunque ya la segunda es diferente, pues menciona que el *káakab* es un “suelo pardo oscuro, de rendzina, bueno para la agricultura.”

Por lo antes expuesto, conviene ser cautos en la revisión de la información contenida en los estudios precedentes, e intentar ser rigurosos en las transcripciones. Si por

Tabla 1. Comparación de información edáfica recopilada en diferentes obras documentales sobre los suelos del estado de Yucatán.

Autores	Cervera (1863)	Flores y espejel (1994)*	Arellano (1992)
Denominación	Cacab	Kakab	Ka' kab
Descripción	Con este nombre se designan generalmente aquellos lugares en que se encuentran escombros de los antiguos naturales del país; la tierra vegetal que en gran cantidad contienen sobre un lecho de piedra calcárea y abonada con una parte de la caliza de las ruinas, dan a esta clase de terrenos una gran fertilidad para el maíz, tabaco algodón y legumbres; pero como la tierra es muy suelta y fina, cuando la lluvia escasea suele perderse la cosecha, especialmente la de maíz.	Se designa generalmente a aquellos lugares en los que se encuentran escombros o ruinas de los antiguos; la tierra vegetal que contiene en gran cantidad sobre el lecho de piedras calcáreas y abonada con una parte de calizas de las ruinas, da a este suelo una gran fertilidad para la milpa, sin embargo, como la tierra es suelta y fina, cuando la lluvia escasea, suele perderse la cosecha.	Suelo pardo oscuro, de rendzina, humocarbonatado, con poco contenido de humus y con inclusiones de roca caliza.

Esta información está basada, según los autores, en Robles Ramos (1958) y en Flores y Ucán (1983), pero no mencionan a Cervera (1896).

cab, Flores y Espejel (1994), casi 100 años más tarde, lo llaman *kakab*, en lo que parece sólo una simple sustitución de la *c* por la *k*, siguiendo casi seguramente las normas convenidas por los especialistas para la escritura de la lengua maya con grafías latinas.

De la comparación de estas informaciones, salta a la vista que la descripción de Flores y Espejel (1994) está basada en la de Cervera (1896), aunque contiene modificaciones formales de redacción y algunas omisiones que la hacen poco diferente de la que proporciona el texto original.

También llama la atención que de acuerdo con Arellano (1992), la denominación que se le da a este mismo suelo es la de *ka' kab*, separando las dos sílabas del término

una parte éstos constituyen indudablemente un valioso punto de referencia documental, útil para evaluar los avances logrados respecto al conocimiento edáfico tradicional en el estado de Yucatán, por otra parte, su reproducción con modificaciones no declaradas puede convertirse en un medio a través del que se pueden arrastrar y perpetuar algunos errores u omisiones.

En esa línea de pensamiento, pareciera que lo recomendable en las referencias a la información relativa al conocimiento edáfico tradicional, es remitir a los lectores a las fuentes documentales primarias, respetar la redacción original de las descripciones de los suelos, aun cuando pudiera apreciarse incorrecta, y en el caso de los términos utilizados para la denominación de éstos o de sus características, reproducir la escritura del primer autor señalando, hasta donde sea posible, las sinonimias correspondientes.



PERCEPCIÓN CAMPESINA DE LOS SUELOS

EL VOCABLO *LU'UM*: SU RELACIÓN CON LOS TÉRMINOS SUELO Y TIERRA

En algunos trabajos que abordan el estudio del conocimiento tradicional de los suelos en diferentes ámbitos de la geografía mexicana, pero sobre todo en aquellos donde se asientan poblaciones indígenas que viven de la agricultura. Se ha visto que, a la par de las alentadoras contribuciones en materia de la llamada Etnoedafología, de manera espontánea aparecen aseveraciones polémicas relacionadas con el significado conceptual de los términos suelo y tierra (Williams y Ortiz, 1981; Pájaro, 1987; Ortiz, 1990; Narváez, 1992; Licona, 1992). En esta discusión, dos puntos estrechamente relacionados resultan relevantes en la contradictoria posición que expresan los autores, a pesar de su cercana práctica académica: uno radica en la atribución de un uso excluyente de los términos suelo y tierra, por parte de técnicos (edafólogos) y campesinos respectivamente; el otro se refiere a la diferencia o similitud que pareciera tener para unos y otros el significado conceptual que encierra cada término.

En tal sentido, Williams y Ortiz (1981), afirman en su trabajo que el término equivalente a lo que el técnico denomina suelo es designado por el campesino tierra. La lectura de la información que ofrecen estos autores sugiere la idea de un uso diferenciado de ambos términos; es decir, que suelo, es la expresión que usan los técnicos y tierra los campesinos. Además, por otra parte, esta afirmación sugiere de manera implícita que los autores no encontraron entre dichos términos ninguna discordancia conceptual, sino más bien una cierta semejanza.

No obstante, años después Ortiz (1990) considera que a raíz de toda una serie de trabajos inscritos en esta temática, se pudo establecer que el concepto tierra del campesino difiere del concepto suelo del técnico y que ambos tienen propiedades comunes y muchas discrepantes. A su vez, Narváez (1992), en un estudio que realizó en el estado de Oaxaca, asienta una opinión hasta cierto punto similar a la anterior en cuanto a forma, pero que en su esencia es distinta porque acepta que el campesino también posee un concepto de suelo, aunque sea diferente al definido en el ámbito técnico.

Si bien en estas consideraciones unas veces se alude a la idea del uso excluyente de los términos suelo y tierra por parte de técnicos y campesinos respectivamente, mientras que en otras no, todas ellas consignan la existencia de una importante diferencia conceptual entre uno y otro, lo que se destaca en la aseveración de que tierra encierra una noción más amplia que suelo, y en la que aquella incluye parcialmente a éste, como lo propone Narváez (1992).

En una de sus explicaciones, Ortiz (1990) da por sentado que el concepto tierra de los campesinos, no obstante incluye componentes y relaciones ambientales que traspo-

nen los límites del concepto suelo del técnico, soslaya la estratificación vertical asociada al carácter tridimensional que distingue a este último, y que la intersección entre los conceptos tierra (del campesino) y suelo (del técnico) ocurre en la llamada capa arable. Y que fuera de esta intersección, el suelo tendría a los horizontes y sus métodos analíticos, mientras que por las tierras campesinas se tendría el ambiente, principalmente el clima y el manejo.

Aceptando en principio que la anterior constituye una disquisición convincente de las diferencias y punto de articulación de los multicitados conceptos, parece indispensable anotar que ella más bien parece ser una formulación teórica del autor que una reconstrucción de la percepción empírica campesina respecto a su entorno y objeto de su trabajo agrícola.

En el caso del análisis de la nomenclatura maya de suelos que se utiliza actualmente en el estado de Yucatán, las interpretaciones acerca de la cuestión de los significados conceptuales de los términos tierra y suelo llevaron a interpretaciones unas veces similares y otras sensiblemente diferentes a las que se plantearon en los trabajos comentados anteriormente⁷.

En primer lugar, se encontró que la condición de hablantes bilingües (maya-español) de muchos de los campesinos que habitan en las comunidades rurales del sur del estado de Yucatán, les permite el uso de los términos tierra y suelo como parte de su vocabulario habitual; empero, no siempre son aplicados en su hablar cotidiano como sinónimos, en razón de que cada uno puede aludir también a otras connotaciones semánticas.

Cuando se usan como tales, y en su relación con la agricultura, el significado conceptual de uno y otro término es prácticamente el mismo, y sensiblemente similar, aunque bastante más concreto y preciso, a los elaborados conceptos genéricos que han llegado a establecer en la actualidad la Pedología, la Edafología y otras disciplinas afines (Aguilar, 1994), lo que concuerda parcialmente con una de las conclusiones de Narváez (1992).

Hasta donde fue posible interpretar de su percepción y saber edáfico, los campesinos yucatecos denominan tierra o suelo en su acepción general, a la capa de material suelto que ocupa la parte más superficial de todo terreno y que sirve de sostén, o medio natural, de crecimiento a las plantas, tanto si son silvestres como cultivadas⁸.

Consideran, asimismo, que esta capa esta formada por una mezcla de muy diversos componentes, entre los que incluyen, sin diferenciarlas por sus diámetros, a las partículas minerales más finas, las piedras de muy distinto tamaño, los residuos orgánicos de diverso origen, así como los fragmentos de objetos y desperdicios de factura humana.

⁷ Es necesario señalar las limitaciones del autor de este trabajo respecto al conocimiento de la lengua maya, de modo que las consideraciones que aparecen en el cuerpo del documento se refieren más bien a cuestiones formales que motivan interés y curiosidad a primera vista; por ningún motivo se pretenden poner en duda o confrontar la opinión de los expertos.

⁸ Los campesinos yucatecos conciben al suelo (o tierra) como una entidad de origen natural, diferente del sustrato rocoso, y lo ubican en su cosmovisión en el mismo nivel jerárquico de los objetos que forman parte del mundo, como son: las rocas, las plantas, los animales, el agua, los seres humanos, etc.

Y si bien pareciera que no toman en cuenta la diferenciación edáfica en sentido vertical (formación de horizontes), hay varias razones para pensar, a diferencia de lo que observaron Williams y Ortiz (1981) en Tepetlaoxtoc, estado de México, que los campesinos yucatecos si registran una clara percepción del carácter tridimensional que distingue al concepto de suelo desde la perspectiva técnica y científica⁹.

Se observó, asimismo, que más allá de su relación con la agricultura, el vocablo maya *lu'um* es empleado de manera indistinta como traducción de los términos suelo y tierra, pues éste encierra, además de su ya comentada expresión genérica, otros significados conceptuales que son similares o equivalentes a los que presentan ambos términos en español como son: piso, terreno, paisaje, patria, entre los más usuales.

Segundo, no se pudo constatar que la connotación diferente y más amplia a la de suelo que se le ha dado a tierra en español, quizá por la traducción y/o adaptación del inglés *land* (Christian y Steward, 1967; FAO, 1977), se encuentre implícita en el vocablo *lu'um*.

Para hacer referencia a un área de terreno que se distingue de otras por exhibir un conjunto particular de condiciones ecológicas, y que por su comportamiento se le

puede considerar como una unidad ambiental, lo que sería en español una noción de tierra en su sentido amplio, en la lengua maya existe toda una serie de vocablos específicos, como son: *k'aankab* (planadas), *káakab* (terrenos con vestigios de ocupación humana), *ya'axhom* (amplias depresiones con suelos profundos y acumulación de humedad), *áak'alche* (terrenos bajos e inundables), *chak'an* (sabanas), *k'om* (hondonadas), *bu'tun* (terrenos con amontonamiento de piedras), *wits* (cerros de origen cárstico), *pu'uc* (serranía), *hubché* (asociaciones vegetales secundarias y arbustivas) y *k'aax* (asociaciones primarias o secundarias arbóreas), algunos de los cuales se aplican también para darle nombre al tipo de suelo que se localiza dentro de los límites de tales unidades ambientales, lo que se presta con regular frecuencia a confusiones en las interpretaciones de los técnicos respecto a la percepción edáfica de los campesinos.

Finalmente, otro vocablo maya con acepciones relacionadas con el término tierra es *kab* o *kaab*, y aunque en apariencia está presente como elemento gramatical, por lo menos fonéticamente, en vocablos que tienen que ver con tipos de suelo o ámbitos ecológicos como *k'ankab* o *ka'-kab*, (*k'aankaab* y *káakab* respectivamente), su significado conceptual más difundido alude en realidad a lo que es el mundo, el planeta tierra (Barrera, 1980)¹⁰.

LA NOMENCLATURA MAYA

Algunas acepciones convencionales que pueden encontrarse en diversos diccionarios del idioma español, coinciden en señalar que en lo general la palabra nomenclatura se refiere a la relación de voces que son propias de cierta especialidad científica o técnica. Otras, de manera más estricta, advierten que sólo comprende al conjunto de términos empleados en las clasificaciones.

Por extensión, la nomenclatura edáfica maya podría pensarse, entonces, como aquel catálogo de nombres acuñados en esta lengua, para dar cuenta de aspectos que tienen que ver con el suelo (o la tierra) y su clasificación, razón por la que su estudio implicaría, en principio, una compilación de este repertorio de vocablos con la finalidad de formular un listado que recogiera sus correspondientes significados en español.

Desde el momento mismo de abordar su estudio, se pudo apreciar que este copioso acervo lingüístico encierra una lógica de abstracción y construcción semántica que responde a propósitos de ordenamiento consciente del saber edáfico en general, y no sólo a una orientación específica de clasificación utilitaria. Lo anterior motiva a remontar el interés inicial de solamente elaborar un vocabulario bilingüe, y a incursionar sobre algunos aspectos que pudie-

ran contribuir tanto a precisar el significado de los términos, como a descifrar la compleja trama de tal nomenclatura.

En ese sentido, se propone que la nomenclatura maya de suelos sea entendida como una forma simbólica de darle unidad a la percepción empírica de la diversidad edáfica regional, la cual ha sido conformada por los agricultores mayas como pieza esencial de su proceso de evolución cultural.

Al parecer cada nombre acuñado, lo mismo que el arreglo estructural del repertorio en su conjunto, contiene significaciones conceptuales y valoraciones pragmáticas que sin duda han dado la pauta para la organización y transmisión del conocimiento que, en el largo acontecer de su historia, este grupo humano ha generado sobre la cuestión edáfica, permitiendo, asimismo, preservarlo hasta la actualidad en la memoria colectiva de los campesinos yucatecos¹¹.

En esa línea de pensamiento, uno de los resultados del estudio que deben destacarse es el reconocimiento de que la construcción semántica del conjunto de términos que integran la nomenclatura edáfica maya se basa en la aplica-

⁹ Como se verá en su oportunidad, en la nomenclatura edáfica maya existen vocablos y expresiones semánticas para diferenciar suelos someros de los que son profundos.

¹⁰ Al cotejar la información recabada en campo con aquella que aparece en los más actualizados y confiables diccionarios especializados y otras fuentes documentales, se pudieron apreciar algunas discrepancias en cuanto a la escritura de los vocablos mayas y a sus significados semánticos y conceptuales, lo que acarrea imprecisiones y confusiones involuntarias a lo largo del presente trabajo.

¹¹ La cuestión edáfica es indispensable ubicarla como un recorte temático dentro del vasto conocimiento agrícola desarrollado por los mayas en el marco de su proceso civilizatorio.



ción de criterios diferentes, los cuales pueden agruparse de acuerdo con cuatro propósitos esenciales: taxonómicos, referenciales, descriptivos y valorativos.

Los criterios *taxonómicos* se aplican en la formación de términos destinados a la denominación de tipos de suelo (unidades taxonómicas), a los que se define como agrupamientos edáficos, de carácter genérico o específico, que comparten un conjunto similar de componentes, características y propiedades. Los criterios *referenciales* aparecen en vocablos que aluden a la posición que ocupa el suelo sobre el relieve, o bien a su localización en una determinada condición ambiental, mientras que los criterios *descriptivos* sirven para acuñar términos que dan cuenta de algún aspecto particular de los suelos (rasgos fisonómicos generales, características morfológicas, propiedades constitutivas). Finalmente, los criterios *valorativos* destacan las cualidades o las restricciones de los suelos para su uso y manejo agrícola.

No obstante, es necesario señalar que en el estado de Yucatán ocurre un serio inconveniente en relación con la interpretación de la nomenclatura edáfica maya: el problema de las confusiones e imprecisiones ligadas a la terminología, el cual no se circunscribe únicamente al marco de la bibliografía que configuran los estudios previos, sino que también se aprecia con frecuencia en el ámbito de la identificación y denominación de los suelos que se da en la práctica misma.

Tal desatino se manifiesta usualmente bajo dos variantes: por un lado, cuando un mismo tipo de suelo es denominado de distinta manera, lo que ocurre en la medida que el término empleado no hace referencia precisa al concepto genérico del tipo de suelo en cuestión o si sólo se aplica para destacar alguna característica sobresaliente; o bien, se limita a señalar la condición ambiental en la que el suelo se localiza.

Por otro lado, la incertidumbre también se presenta porque en algunas ocasiones diferentes tipos de suelo son identificados con igual nombre, lo que acontece cuando ellos comparten alguna característica preponderante o se ubican en una condición ambiental similar, y el término aplicado alude únicamente a una u otra y no lo hace con relación a un determinado concepto genérico.

Como un ejemplo de esta cuestión se puede citar, en el caso de la aplicación de diferentes términos para denominar un mismo tipo de suelo, el de aquellos que son profundos y sin piedras, ricos en materia orgánica en su estrato más superficial, y que se extienden sobre las más o menos amplias planadas del sur del estado de Yucatán. Estos suelos por lo regular son denominados *k'áankab* o *k'áankab lu'um* atendiendo a su concepto genérico, definido ante todo por la condición topográfica de terreno plano, así como por el color café rojizo de su matriz mineral y su falta de (o muy escasa) pedregosidad; sin embargo, en ocasiones estos suelos son identificados también con los términos *chac lu'um* o *chac k'áankab* si, a juicio de quien lo nombra, el color de la matriz mineral del suelo es más bien rojo y no café rojizo; asimismo, estos suelos pueden ser reconocidos con el término *éek' lu'um* o *box k'áankab*, cuando su estrato más superficial (horizonte A) es de color negro o café muy oscuro; o como *chich lu'um* si este mismo estrato presenta una estructura masiva y su consistencia es dura o muy dura.

En el caso de la asignación de un mismo nombre a tipos de suelo distintos, basta señalar como ejemplo el ya referido término *éek' lu'um*, que se utiliza de igual modo para denominar a los suelos de color negro que se localizan en los promontorios rocosos localizados en las formaciones cerriles alargadas que distinguen a la llamada *Sierrita de Ticul*, sin importar que éstos, a diferencia de los que se localizan en terrenos planos, sean someros y pedregosos.

Otro caso corresponde al término *áak'alché*, el cual se utiliza para designar a todos aquellos suelos que no obstante pudieran ser diferentes en algunas de sus características morfológicas, se distinguen por su ubicación en terrenos bajos sujetos a inundaciones durante todo o la mayor parte del año.

CRITERIOS DE PERCEPCIÓN EDÁFICA

Con base en una sistematización inicial de la información, a continuación se presentan algunos ejemplos de la función práctica de los cuatro agrupamientos de términos señalados antes: taxonómicos, referenciales, descriptivos y valorativos, así como el significado semántico de cada uno de ellos.

Términos taxonómicos

Como se ha comentado antes, dentro del repertorio de términos que configuran la nomenclatura edáfica maya, es posible identificar un grupo que responde a nociones taxonómicas; es decir, vocablos que cumplen la función de nombrar diferentes tipos de suelo (o tierra) conforme al conjunto particular de componentes, características y rasgos morfológicos que le dan unidad de expresión a cada uno y lo distinguen de otros.

De este modo, cada nombre sintetiza el concepto genérico de un determinado tipo de suelo y, por ello mismo, encierra ciertos principios de ordenamiento clasificatorio.

En la Tabla 2 aparecen los 13 tipos de suelo que fueron identificados, en sus respectivas parcelas, por el grupo de 53 campesinos a quienes se entrevistó durante el trabajo de campo, lo que junto con numerosas observaciones directas, generó la información que sirvió de base al presente estudio.

Lo primero que se observa es que del total de términos acopiados durante las entrevistas, y cuyo número se aproxima a los 120, únicamente 13 se refieren a la denominación de unidades taxonómicas. Esto indica, en efecto, que la cantidad de términos en los que aparece el vocablo *lu'um* es mucho mayor que la diversidad edáfica real en lo que toca a tipos de suelo, de modo que en la mayoría de los casos este vocablo estaría referido a algún rasgo, característica o propiedad edáfica y no tendría, por lo tanto, connotaciones de orden taxonómico.

Llama también la atención la ausencia del término *tsek'el* o *tsek'el lu'um*, pese a que según observaciones di-



Tabla 2. Suelo reconocidos por el grupo de campesinos entrevistados.

Número	Denominación maya	Frecuencia	Porcentaje
1	Nap' al k'áankab	2	3.8
2	K'áankab del kaaba-che'	1	1.9
3	K'áankab del ho áac-tun pu'uk	1	1.9
4	Chak k'áankab	7	13.2
5	Pus lu'um	6	11.3
6	Eek' lu'um	8	15.1
7	Eek' lu'um del ho áac-tun pu'uk	2	3.8
8	Aak'alche'	5	9.4
9	Káakab lu'um	5	9.4
10	Ya'ax hom	4	7.5
11	Box lu'um	6	11.3
12	Chak lu'um	2	3.8
13	Buy lu'um	4	7.6
	Total general	53	100.0

rectas dicho tipo de suelo se encuentra presente en toda el área de estudio. No obstante dicha omisión, el término se incluye en el análisis de la nomenclatura edáfica maya, aprovechando información general recabada en todas las entrevistas realizadas.

Al comenzar a revisar los datos contenidos en la Tabla 2, un aspecto que destaca enseguida es que la frecuencia con la que aparece cada uno de los tipos de suelo, lo mismo que su respectivo porcentaje, es bastante diferente, dentro de un intervalo de variación que va del 1 al 8 en números absolutos y de 1.9 a 15.1 % en los correspondientes valores relativos. En la medida que la participación de los campesinos informantes derivó de un muestreo aleatorio, tales frecuencias y valores porcentuales parecerían sugerir una cierta tendencia respecto a la presencia más o menos recurrente de los tipos de suelo en los terrenos agrícolas visitados.

Empero, no hay elementos suficientes para asegurar de manera concluyente que estos resultados representan la dominancia relativa de unos tipos de suelo sobre otros, ni tampoco que ellos ocupen una mayor o menor superficie dentro del área de estudio. Los datos solamente indican el número de veces que aparece en la muestra cada uno de los diferentes tipos de suelo identificados, así como el valor proporcional correspondiente, lo que apoyaría, en todo caso, la idea de un diferente grado de confiabilidad para las consideraciones hechas en torno a cada uno de ellos¹².

En la misma Tabla 2 se aprecia que no todos los nombres genéricos de los 13 tipos de suelo contienen el vocablo *lu'um*, sino que éste solamente aparece en siete casos, lo que representa un valor ligeramente superior a 50 % del total. Esto podría deberse a dos razones principales: una, porque, en efecto, el nombre no incluye en su composición

original dicho vocablo, como sucede con los suelos *áak'alche'* y *ya'ax hom*. La otra se funda en la costumbre de abreviar el nombre de algunos tipos de suelo, hecho que se puede apreciar fácilmente en los casos donde está presente el término *k'áankab*, pues con frecuencia se omite la denominación más larga *k'áankab lu'um*. Si esta apreciación es correcta, el total de nombres en los que presumiblemente estaría apareciendo la terminación *lu'um* aumentaría a 11, lo que correspondería, a su vez, a 78 % de los tipos de suelo.

Como se verá en su momento, otro de los nombres que con frecuencia suele abreviarse es el de *káakab lu'um*, motivo por el cual a este tipo de suelo se le identifica también sólo con el término *káakab*. Llama la atención que en ambos casos aparece el vocablo *kaab* formando parte de los nombres abreviados, el cual encierra, como se ha visto antes, la connotación de tierra aunque no exactamente en su relación con la agricultura.

Este hecho permite plantear, pese a que no existen argumentos suficientes para poder probarla, la presunción de que ésta sea una razón que sustenta la costumbre de abreviar dichos nombres. Pero también es muy probable que la abreviatura responda solamente al interés de acortar la palabra -en aras de la economía del lenguaje- como sería el caso del *tsek'el lu'um* al que con mayor frecuencia se le denomina simplemente *tsek'el*.

Otro aspecto que merece la pena comentarse es la participación de los términos *k'áankab* y *éek' lu'um* como elementos centrales del nombre más extenso de varios tipos de suelo. En ambos, el complemento nominal sirve para reconocer tipos de suelo que comparten ciertos rasgos comunes aunque diferentes en cuanto a su expresión morfológica general.

Términos referenciales

Como se sabe, en el área de estudio la variación de los suelos se encuentra visiblemente asociada con las contrastantes formas del relieve, la gradación de los declives que las caracterizan, así como las condiciones de mayor o menor humedad acumulada en el subsuelo a consecuencia de la topografía; de hecho, algunos de los numerosos términos mayas utilizados se aplican en esencia para referirse al suelo que se encuentra en unas u otras. Esto es así, como puntualizan Aguilera (1959) y Hernández (1959), autores antes citados, porque la configuración topográfica del terreno afecta la dinámica de la precipitación pluvial que recibe cada área, tanto en lo que se refiere a la escorrentía superficial como a la infiltración o estancamiento del agua, lo que acarrea efectos directos sobre la génesis y morfología de los suelos, principalmente a causa de los fenómenos de erosión, lixiviación e hidromorfismo que esta condición favorece.

De acuerdo con la información recabada en el área de estudio, es posible reconocer la existencia de diferentes términos mayas para identificar a los suelos que se despliegan en asociación con cada una de las formaciones to-

¹² El número total de campesinos entrevistados (53) quedó distribuido en las ocho comunidades que fueron seleccionadas dentro del área de estudio, desde Oxcutzab hasta Huntochac.



pográficas, los cuales tienen significados o connotaciones diversas, pero precisas y consistentes según el rasgo o atributo edáfico que se pretenda destacar.

Los productores agrícolas del sur del estado de Yucatán perciben sin dificultad la existencia de una clara asociación entre las características de los suelos y su localización sobre cada una de las prominencias del relieve, pudiendo, en algunos casos, precisar la relación específica que guardan con los elementos topográficos en los que cada una de estas topoformas cársticas se puede desagregar con fines descriptivos, como son las cimas o crestas y los declives, o destacar la posición más alta que ellos ocupan respecto al nivel general de la superficie del terreno.

Por otra parte, se observó que los términos aplicados a tal fin no son todos distintos entre sí, sino que por lo regular algunos mantienen ciertas relaciones con otros atendiendo a su ortografía y semántica; o bien, a la interpretación personal de cada productor en lo tocante a la cuestión edáfica que se le pide destacar, lo que se manifiesta también en el uso de expresiones idiomáticas afines.

Para el caso de los suelos que se localizan sobre los promontorios, se aprecia que en el repertorio de términos y locuciones afines que aluden a esta relación espacial aparecen por lo menos cuatro criterios referenciales diferentes:

- Términos que se refieren a la denominación genérica de la topoforma en la que se localiza el suelo.
- Términos que hacen referencia a condiciones específicas de la topoforma en la que se ubica el suelo.
- Términos que están referidos al suelo en general por la posición que ocupan en relación con la configuración del relieve.
- Términos que hacen referencia a la denominación de aquellos tipos de suelo cuya presencia se considera propia de una determinada topoforma.

Para hacer referencia específica, por ejemplo, a los suelos que se localizan sobre los promontorios denominados genéricamente montículos, en la Tabla 3 se presenta la diversidad de términos que utilizan los campesinos en-

trevistados agrupados de acuerdo con los cuatro diferentes criterios referenciales que sirven de base a su composición semántica.

Términos descriptivos

En este apartado se presenta una descripción de la variación de los suelos en el área de estudio, en función de la forma de percibir la realidad edáfica por parte de los campesinos yucatecos, lo cual se manifiesta a través de la apreciación de un conjunto de rasgos fisonómicos de los suelos, de diversas características morfológicas, especialmente del estrato más superficial, así como de ciertas propiedades derivadas de sus componentes minerales y orgánicos. Estos términos sirven para distinguir a los suelos, independientemente de la unidad taxonómica (tipo de suelo) a la que pertenecen, en razón de una única característica destacable.

En las Tablas 4, 5 y 6 se presentan algunos ejemplos relativos a los términos edáficos mayas que aluden a criterios descriptivos de diferente carácter, con la finalidad de ilustrar las formas semánticas que adopta la nomenclatura.

Un breve análisis de la información que contienen las tres tablas anteriores, permite afirmar que la nomenclatura aplicada con propósitos descriptivos incluye, además de los términos específicos acuñados sobre la base de tales criterios, términos que compuestos con criterios taxonómicos y referenciales.

Lo anterior es resultado de la diferente interpretación que hace cada uno de los campesinos a las diferentes preguntas formuladas durante las entrevistas y observaciones de campo.

En ese sentido, por ejemplo, cuando se consulta acerca de la denominación que recibe un suelo por su poco espesor (rasgo fisonómico general), en las respuestas aparecen términos como *haay lu'um*, cuyo acepción genérica es, en efecto, suelo delgado o *ma' taan lu'um*, que significa lo contrario, es decir, que el suelo no es profundo.

Tabla 3. Agrupamiento de los términos que se aplican a los suelos que se localizan sobre los montículos que caracterizan el relieve del sur del estado de Yucatán.

Criterios referenciales	Términos en lengua maya	Significado genérico
Referencia a la topoforma en la que se localiza el suelo de interés	Mulu'uch, Chan mulu'uch, Múul, Mulu'uch lu'um	Denominaciones que reciben en general los montículos o los suelos que se ubican en ellos
Referencia a los suelos en función de su ubicación específica en una determinada topoforma	Ho-lu'um, Ho-ruinas	Denominaciones de la cresta o cima de los promontorios en general o de los suelos que se ubican en ella
Referencia a los suelos por la posición que ocupan en el relieve	Ka'anal lu'um	Denominación genérica para los suelos que se localizan en terrenos elevados
Referencia a tipos de suelo presentes en determinada topoforma	Box lu'um, Eek' lu'um, Pus lu'um, Pupuski lu'um.	Denominaciones que corresponden a los tipos de suelo que son propios de los montículos
Referencias imprecisas o confusas	Mulu'ch k'aax, Ya'ax k'aax, Chan táax kabi	-----



Tabla 4. Términos mayas relativos a los rasgos fisonómicos que muestran los suelos encontrados en el sur del estado de Yucatán.

Rasgo fisonómico	Términos en lengua Maya	Significado genérico
Profundidad	Taan lu'um, Taan taan lu'um, K'áankab	Suelos profundos
	Hach taan lu'um, Taan taan lu'um, Hach taan taan lu'um, Taan k'áankab	Suelos muy profundos
	Haay lu'um, Tsek'el, Tsek'el lu'um, Ma' taan lu'um	Suelos someros o que no son profundos
	Chaltún, Tsek'el lu'um, Hach ma' taan taan lu'um	Suelos muy someros o que no son nada profundos (en ellos aflora la laja)
Anegamiento	Tsek'el lu'um, Aakalche', Koom lu'um, Kaabal lu'um	Suelos que anegan o inundan con frecuencia y tardan en drenarse
	Pus lu'um, Tan tan lu'um, K'áankab lu'um, Chac lu'um	Suelos que por lo regular no se anegan, y se drenan rápidamente

Tabla 5. Términos mayas relativos a algunas de las características morfológicas que muestran los suelos encontrados en el sur del estado de Yucatán.

Característica	Términos en lengua Maya	Significado en español
Color del suelo o de su estrato más superficial	Chac lu'um, Chac k'áankab, K'áankab lu'um	Suelos rojos
	Box lu'um, Box k'áankab lu'um, Eek' lu'um	Suelos negros
	Eek' lu'um, K'áankab, K'áankab lu'um, Káakab lu'um	Suelos cafés
	Aak'alche', Box lu'um, Káakab lu'um, Eek' lu'um	Suelos grises
Consistencia en húmedo	Chich lu'um, Chi chich lu'um, Babahki lu'um, Chich ha'an lu'um, Chich cha ha'an lu'um	Suelos duros
	Hahalki lu'um, Luk' ha'an lu'um, Luk' cha ha'an, Ku hutu lu'um	Suelos suaves (friables), o que se desmoronan entre los dedos
	Papaa'ki lu'um, Tsaay lu'um	Suelos pastosos
	Tata'ki lu'um, Papa'ki lu'um, Tak luk' lu'um	Suelos pegajosos

Tabla 6. Términos mayas relativos a algunas de las propiedades constitutivas que muestran los suelos encontrados en el sur del estado de Yucatán.

Propiedad	Términos en lengua Maya	Significado en español
Textura	Huy lu'um, Ha hal lu'um, Ha halki lu'um, Pus lu'um, Sahkab lu'um	Suelo arenoso
	Hach huy lu'um, Hach huhuyki lu'um, Hach pus lu'um	Suelo muy arenoso
	Kat lu'um, Papaa'ki' lu'um, Tata'ki lu'um, Chich lu'um, Aakalche'	Suelo Arcilloso
	Hach, Hach kat lu'um, Hach papaa'ki' lu'um, Aakalche'	Suelo muy arcilloso
Pedregosidad	Ch'och'ol, Ch'och'ol lu'um, Ch'ech lu'um,	Suelo con muchas piedras grandes en la superficie
	Ch'ich' lu'um	Suelo con muchas piedras chicas o grava fina en su interior

Pero también suele emplearse la expresión *tsek'el lu'um*, la cual corresponde a una denominación basada en un criterio taxonómico que se refiere específicamente a un cierto tipo de suelo de poca profundidad.

Términos valorativos

La nomenclatura edáfica maya que se sustenta en criterios valorativos, alude por lo regular a la calidad de los suelos, a la que en el contexto de este trabajo se entiende

como una apreciación cualitativa acerca del comportamiento o respuesta que ellos tienen en relación con el uso agrícola a que son destinados en un momento dado.

En esta forma, los términos encierran un significado de suelo “bueno”, “regular” o “malo” para un determinado propósito utilitario dentro de la gama de actividades agrícolas que realizan los campesinos en el sur del estado de Yucatán.

Para ilustrar estas ideas, en la Tabla 7 se muestran algunos ejemplos de los términos mayas que dan cuenta de



la calidad agrícola de los suelos para el cultivo de la milpa tradicional bajo el sistema de roza-tumba-quema.

Del conjunto de términos mayas aplicados para expresar de manera general la calidad agrícola de los suelos, es posible observar que si bien la mayoría corresponden a su significado semántico específico, como es el caso del término *ma'alob lu'um* que significa suelo fértil o bueno para la agricultura, algunas otras denominaciones corresponden a criterios taxonómicos y/o referenciales.

Tales son los casos de aquellos términos que sirven para identificar tipos de suelos que son fértiles por su composición misma como el *éek' lu'um* o el *káakab*, por su localización en una condición ambiental favorable como el *chac been lu'um* (suelo en un terreno recién desmontado) o por una propiedad constitutiva como sucede con el *sohol lu'um* (suelo suave o de hojarasca) o el *sis lu'um* (suelo fresco).

Tabla 7. Términos mayas relativos a la valoración de la calidad de los suelos encontrados en el sur del estado de Yucatán respecto a diversos usos con propósitos agrícolas.

Uso agrícola	Términos en lengua Maya	Significado en español
Fertilidad	Ma'alob lu'um, Eek' lu'um, Káakab lu'um, Chac been lu'um, Sis lu'um	Suelo fértil, bueno para la agricultura (fresco)
	Hach ma'alob lu'um, Hach tah ma' lob lu'um, Hach sis lu'um	Suelo muy fértil o muy bueno para la agricultura
	X'la lu'um, Ma' ma'alob lu'um, Oots'il lu'um, Buy lu'um, Sohol lu'um, Tsek' el lu'um	Suelo pobre o malo (o que no es bueno) para la agricultura
	Ma' hach ma'alob lu'um, Chan ma'alob lu'um, Chac lu'um	Suelo regular para la agricultura
Productividad	Ka' ana'an lu'um, Ts'o'ok lu'um	Suelo cansado para la agricultura
	K'oha'an lu'um, Buy lu'um	Suelo enfermo o malo para la agricultura
	Tsek'el lu'um, Buy lu'um, Ch' ich' lu'um	Suelo improductivo para propósitos agrícolas

CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos hasta el momento no permiten formular todavía aseveraciones definitivas respecto a la magnitud de la diversidad y significados que encierra la nomenclatura maya de suelos en el sur del estado de Yucatán, ni tampoco acerca de la organización que guarda este importante acervo de conocimientos.

No obstante, la información recabada a través de las entrevistas resultó suficiente para aceptar la hipótesis que propone que la cantidad de términos edáficos empleados no se funda exclusivamente en propósitos taxonómicos, es decir, a la sola denominación de tipos de suelo, sino que ella tiene su origen en por lo menos otros tres criterios de percepción de los suelos (referenciales, descriptivos y valorativos), de modo que la real diversidad en cuanto a tipos de suelo presentes en el sur del estado de Yucatán, entendidos éstos como unidades taxonómicas, es bastante menor que el repertorio terminológico actualmente en uso.

Se encontró, asimismo, que si bien hay una tendencia hacia la composición de cada uno de estos términos de acuerdo con el criterio específico que interesa destacar, también es claro que su aplicación práctica no siempre

responde a ese mismo sentido de correspondencia, pudiéndose en algunos casos emplear un término de carácter taxonómico para indicar, por antonomasia, una característica morfológica o un atributo valorativo, por ejemplo, el término *box lu'um* para hacer referencia no sólo a una unidad taxonómica precisa, sino para señalar que se trata, o bien de un suelo negro, independiente del tipo de suelo específico que le corresponda, o de un suelo localizado en un montículo, o de un suelo fértil y bueno para la agricultura.

No se pudo, por otra parte, aceptar la hipótesis de que este repertorio de términos, a pesar de que muestra ciertos principios de ordenamiento taxonómico, no constituye un sistema de clasificación de suelos equiparable a los esquemas de la edafología moderna; sin embargo, tampoco la información acopiada aportó elementos suficientes para rechazarla.

En ese orden de ideas, se considera que esta línea de trabajo no puede ni debe concluirse, sino que tendrá que revisarse en sus premisas básicas y continuar repensando sobre el tema y sus contribuciones.

AGRADECIMIENTOS

A Paulino Cimá, entusiasta milpero de Tixcaltuyub, Yuc., por su colaboración en las entrevistas. A la M. en C. Silvia Terán por la motivación para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Aguilera H., N., 1959.** Suelos. Los recursos naturales del Sureste y su aprovechamiento. *En*: Beltrán, E. (Ed.). Pub. Inst. Mex. Rec. Nat. Renov. II(2):177-212, México.
- Barrera Bassols, N., 1998.** Etnoedafología purépecha. *México indígena*. INI, Vol. 4(24) México, D. F.
- Barrera Marín, A. y P.A. Gómez, 1977.** El manejo de la selva por los mayas: sus implicaciones silvícolas y agrícolas. *Biótica*. 2(2):47-61.
- Barrera Marín, A., 1980.** Sobre la unidad habitacional tradicional campesina y el manejo de los recursos bióticos en el área maya yucatanense. *Biótica*, 5(3):115-129.
- Barrera Vázquez, A., 1980.** *Diccionario Maya Cordemex Maya-Español-Maya* Ediciones Cordemex Mérida, Yucatán, México.
- Cervantes, 1972.** Estudio general del uso potencial de los suelos de la península de Yucatán.
- Cervera, T. 1896.** Tratado sobre la clasificación de los terrenos de Yucatán. Repertorio pintoresco de Mérida.
- Duch G., J., 1988.** La conformación territorial del estado de Yucatán. UACH. Chapingo, Méx.
- FAO, 1977.** Esquema para la evaluación de tierras. Boletín de suelos. N° 32. Roma. 66p.
- Flores, J. S. y E. Ucán Ek, 1983.** Nombres usados por los mayas para designar a la vegetación. *Cuadernos de Divulgación 10*. INIREB. Xalapa, Veracruz.
- Flores, S. e I. Espejel, 1994.** Etnoflora Yucatanense. Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Fascículo 3. pp.135.
- Hernández X., E., 1959.** La agricultura en la Península de Yucatán. *En*: Beltrán, E. (Ed.). Los recursos naturales del Sureste y su aprovechamiento. Publ. IMRNR, año 1959, Vol. 3, pp. 3-57.
- Licona V., A. y L. Sosa M., 1992.** El estudio de la tierra para el análisis regional de la agricultura en el centro del estado de Veracruz. *En*: Duch G., J. y Col. (Ed) 1992. Estudio de los recursos naturales para la agricultura en el SCRUI. UACH, Chapingo, Méx.
- López, 1980.** Capacidad de uso y manejo de los suelos de la península de Yucatán. SARH. México, D. F.
- Narváez C., G. 1992.** El conocimiento campesino de los recursos naturales para la agricultura. *En*: Duch G., J. y Col. (Ed) 1992. Estudio de los recursos naturales para la agricultura en el SCRUI. UACH, Chapingo, Méx.
- Ortiz M., R., 1950.** Reconocimiento agrológico regional del estado de Yucatán. *En*: Los recursos naturales del estado de Yucatán. *Bol. de la Soc. Mex. de Geo. y Est.* N° 69. México, D. F.
- Ortiz S., C. A., 1990.** Desarrollo de la Etnoedafología en México. Centro de Edafología. CP. Montecillo, Méx.
- Ortiz S., C. A., D. Pájaro H. y V. M. Ordáz Ch. 1990.** Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. *Cuadernos de Edafología N° 15*. Centro de Edafología. CP, Montecillo, Méx.
- Pérez P., J. M. 1984.** Caracterización y utilización de la clasificación maya de suelos en el municipio de Oxcutzcab, Yuc. Tesis profesional. UACH, Chapingo, Méx.
- Pool N., L. 1981.** El estudio de los suelos calcimórficos con relación a la producción maicera. *En*: Hernández X., E. 1981. Seminario sobre producción agrícola en Yucatán. GEY, SPP, CP, SARH. Mérida, Yuc. México.
- Robles Ramos, R., 1958.** Geología e hidrología de la Península de Yucatán. *En*: Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento. I.M.R.N.R. México. D.F.
- William Barbara, J. y C. A. Ortiz Solorio, 1981.** Middle American Folk Soil Taxonomy. *Annals of Association of American Geographers*. Vol. 71. N° 3.
- Williams, B. J., 1981.** La clasificación Nahuatl de suelos. *En*: Rabiela, R., T. y W. Sanders. 1981. Historia de la agricultura. Época prehispánica – Siglo XVI. Col. Biblioteca del INAH. INAH, México, D. F.
- Wright, 1967.** Reconocimiento de los suelos de la península de Yucatán. Informe final. Doc. mimeográfico. ENA – Chapingo. México.



COLECCIÓN DE MONOLITOS DE SUELOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Claudia May-Acosta² y Francisco Bautista¹

¹Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán.

²Lic. en Biología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán

RESUMEN

La capacidad de la tierra para producir alimentos a disminuido un 16%, debido a que el 40% de las tierras agrícolas del mundo están afectadas por la degradación; éste es un problema que tiende a ser ignorado por el escaso conocimiento que se tiene de los suelos, su uso y manejo de los mismos. La elaboración de colecciones de monolitos de suelo sería de mucha utilidad para un mejor conocimiento de los suelos en investigación, docencia, educación ambiental y otros. El objetivo de éste trabajo fue la elaboración de una colección de monolitos de suelo, con base en las adaptaciones a las técnicas de extracción, preparación, tallado, montaje y exposición de monolitos de acuerdo con las particularidades de los suelos de la Península de Yucatán. La selección de los sitios de muestreo se realizó con base en la identificación de las zonas de mayor representación de los sistemas geomorfológicos. Para la extracción y preparación se utilizó el método del monolito interno. De 11 monolitos obtenidos, seis son del edo. de Yucatán, dos del edo. de Campeche y tres del edo. de Quintana Roo y representan a siete de los 12 grupos de suelos reportados para la Península de Yucatán. Para la extracción de Vertisoles, Solonchaks, Phaeozem y Arenosol se utilizan cajas metálicas, y para Luvisoles, Cambisoles y Leptosoles cajas de madera armables. Las herramientas a utilizar en la extracción del monolito dependen de la unidad de suelo y del horizonte. La aplicación de la laca se realiza de acuerdo con la textura y estructura del suelo. En el tallado se comienza por los bordes para determinar el grosor del monolito. El montaje y la exposición dependen de los objetivos de estudio y de los intereses del grupo de usuarios al que se destine.

ABSTRACT

The land capacity to produce food had decreased 16% due to 40% of the world agricultural lands are affected by the degradation; this problem is ignored because the scarce knowledge of the soil and its use and management. The soil monoliths collections are very useful to have a better understanding of soils in researching, teaching, environmental teaching and others. The purpose of this work was to obtain a soil monolith collection in base to the technique adaptations of extraction, preparation, carving, set up and expositions of monoliths according to the particularities of the soils from the Peninsula de Yucatan. The selection of the sampling places were done based on the identification of the areas of higher representation of the geomorphologic systems. For the extraction and preparation it was used the methods of the internal monolith. From the eleven obtained monoliths six are from Yucatan, two from Campeche and three from Quntana Roo. All of them represent seven from twelve reported soils in the Peninsula de Yucatan. For the

extraction of Vertisols, Solonchaks and arenosols they were used metallic boxes and for the Luvisols, Cambisols, and Leptosols wooded boxes. The tools used for the extraction of the monoliths depended from the soil unit had the horizons. The lacquer application was done according to the soil texture and structure. The carving started from the edges to determine the size of the monolith. The set up and the exposition depends from the study purpose and the type of people who will be participating in the exposition.

INTRODUCCIÓN

La capacidad de la tierra para producir alimentos a disminuido un 16% en los últimos años, debido a que el 40% de las tierras agrícolas del mundo están siendo afectadas por la degradación (física, química y biológica), lo cual ha reducido su capacidad productiva debido a los problemas de salinidad, acidificación, compactación, anegamiento, contaminación y a las actividades humanas como: deforestación y explotación de bosques (574 Mha), sobrepastoreo (679 Mha), manejo impropio de suelos agrícolas (552 Mha), sobreexplotación de la vegetación para usos domésticos (133 Mha) y actividades industriales (23 Mha), representando el 15% de los suelos mundiales (ISRIC, 2001., PNUD, PNUMA, Banco Mundial y WRI, 2001).

En América latina el 16% del suelo se encuentra afectado por alguna forma de degradación, amenazando la productividad agrícola, las obras físicas y la situación socioeconómica (PNUMA, 2001).

En México, el 60% del territorio (120 millones de hectáreas) está afectado por la erosión que va de severo a extremo; asimismo, se cuenta con una gran cantidad de superficie ocupada por zonas áridas y semiáridas en las que avanza la desertificación (FAO, 2001).

En la Península de Yucatán el 90% del territorio total sufre de algún tipo de degradación, ya sea eólica 95%, química 4%, física 1%, biológica 95%, salina 55% y sódica 25% (INEGI, 1999); cada región enfrenta diversos tipos de deterioro, sus suelos han sido expuestos a diversos y variados procesos de degradación como consecuencia de la deforestación y cambio de uso del suelo.

La degradación del suelo es un problema que, a pesar de estar amenazando la subsistencia de millones de personas en la región, así como la pérdida de la biodiversidad por deterioro de ambientes donde se localizan especies endémicas, tiende a ser ignorado por los gobiernos y la población en general (FAO, 2001), esto se debe al escaso conocimiento del uso y manejo de los suelos, por la falta de profesionistas que se dediquen al estudio de este recurso no renovable.

Esta situación, hace que los tomadores de decisiones que participan en la administración del espacio físico de la región, así como los productores agrícolas, forestales y pecuarios, no cuenten con suficiente información (en calidad y cantidad) para fundamentar la toma de decisiones en el uso y manejo del suelo.

Es por eso, que la elaboración de colecciones de suelos (monolitos) en la que se muestran los perfiles con sus horizontes (Chang *et al.*, 1994; Jamagne *et al.*, 1994), sería de mucha utilidad en los siguientes aspectos:

Investigación. La colección de monolitos de suelo provee material accesible para investigaciones biológicas, ecológicas, agronómicas y ambientales brindando información útil para saber en qué puede ser utilizado el suelo, cuales son los principales factores edáficos que limitan el desarrollo de los cultivos, ayudando a definir tecnologías sostenibles de manejo que contrarresten estas limitaciones y permitan alcanzar sus rendimientos potenciales.

Docencia. Los monolitos son de indudable valor didáctico para estudiantes de todos los niveles escolares; en cuestiones de uso práctico, los productores agropecuarios podrían utilizar la información generada y contenida en los monolitos para la toma de decisiones.

Educación ambiental. En particular, la elaboración de colecciones de monolitos de suelos es de gran importancia en la generación de una mejor conciencia de la población, en general, sobre el manejo y conservación de dicho recurso, el cual es soporte de gran variedad de organismos, medio físico de sostén de la estructura socioeconómica y fuente de materiales minerales.

Transferencia de tecnología. La adopción y adaptación de nuevas técnicas y estrategias de cultivo pueden ser mejor comprendidas por los extensionistas y productores si la capacitación o instrucción se realiza con el conocimiento integral de los suelos.

Planificación agropecuaria. Al conocer con mayor detalle el suelo, sus propiedades químicas, físicas, biológicas, y sus relaciones con el uso y manejo, es posible realizar mejores recomendaciones sobre el uso del mismo en aspectos de quema, fertilización, aplicación de abonos, labranza, riego, control de arvenses, plagas y enfermedades, en cada una de las unidades y asociaciones de suelos.

Por otro lado, en México no se cuenta con una colección de monolitos de suelos, ni mucho menos con un museo que contenga la información básica sobre este recurso, además de que la información para la elaboración de monolitos es escasa, se requiere la descripción detallada de nuevas técnicas de extracción y preparación de monolitos, así como documentar las adaptaciones de las técnicas recomendadas con base en las particularidades de los suelos de la península de Yucatán.

El objetivo de este trabajo, fue la elaboración de una colección de monolitos de suelos, con base en adaptaciones a las técnicas de extracción, preparación, tallado, montaje, preservación y exposición de monolitos (Mas *et al.*, 1998), de acuerdo con las particularidades de los suelos de la Península de Yucatán.



ÁREA DE ESTUDIO

La Península de Yucatán se ubica en la porción oriental de la República Mexicana, comprende un área de 139 811 km² e incluye los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo (Cabrera-Cano y Flores, 1993). Borneada por las aguas de dos mares del Océano Atlántico: el Golfo de México por el occidente y norte, y el mar de las Antillas o Caribe por el oriente, representa el extremo oriental del territorio mexicano, a manera de un apéndice. Comprende además el territorio de Belice y norte de Guatemala (Lugo, 1999) (Fig. 1).

La Península de Yucatán es una estructura geológica que corresponde a una plataforma. Las rocas paleogénicas se encuentran en todo el subsuelo y consisten principalmente en calizas, areniscas, evaporitas del paleoceno y eoceno (López, 1975). La constitución geológica de la superficie de la península es en su totalidad de rocas sedimentarias marinas-calizas y derivadas de éstas (Duch-Gary, 1991).

El clima según el sistema de Köppen modificado por García (1999), se clasifica como tropical cálido subhúmedo con lluvias en verano en casi toda su extensión.

Los climas encontrados son: Bs con sus subtipos Bs0 (h') (x')i, Bs0 (h') (e), BS0 (h') W'' i y Bs1 (h') w'' i, y el tipo Aw con sus subtipos Aw0 (con sus variaciones Aw''0 (x') (i')g, el Aw0 (w) (e)g y el Aw0(i')g) Aw1 (con sus variaciones Aw''1 (x') (i')g, Aw1 (i')g, Aw''1 (x')i), Aw2 (con sus variaciones Aw''2 (i')g, Aw''2 (i')i) y Am (con su variación Am (f)i) (Orellana-Lanza, 1999).

Los suelos que predominan en las elevaciones son someros con fragmentos rocosos, clasificados como Litoso-

les y Rendzinas; en las depresiones, son comunes los suelos profundos, de un mínimo de 80 cm de grosor. De acuerdo con la humedad se forman Gleysoles (mayor cantidad de agua) y Vertisoles (menor hidromorfismo). En la planicie costera se forman Regosoles, suelos inmaduros resultado de la acumulación de material calcáreo (conchas) reciente, sin consolidación (INEGI, 1984; Duch-Gary, 1991).

En términos generales, la vegetación de la Península de Yucatán es tropical, sin elementos de bosque boreal. En el estado de Yucatán son típicas las selvas baja caducifolia, baja caducifolia espinosa y mediana subcaducifolia, integradas por comunidades y asociaciones vegetales propias de rejolladas, cenotes, aguadas y cavernas. En Campeche, la vegetación se compone por selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia, alta perennifolia, selva baja inundable, sabanas, petenes y manglares; en Quintana Roo domina la selva mediana subperennifolia y los manglares; además de que en los tres estados existe la vegetación de duna costera, carrizales, seibadales y tulares (hidrófitos) (Flores y Espejel, 1984).

En todo el territorio de la Península no existe una red fluvial definida. Algunos ríos escurren en los márgenes de ésta, en la porción meridional, se encuentran los ríos: Champotón, Hondo, San Pedro y Candelaria. Algunos tienen su origen en las elevaciones montañosas que se encuentran al sur, en Chiapas, Guatemala y Belice. Son corrientes de temporada, aisladas que no han logrado formar un sistema fluvial por el predominio de infiltración y circulación del agua en el subsuelo (Orellana-Lanza, 1999).

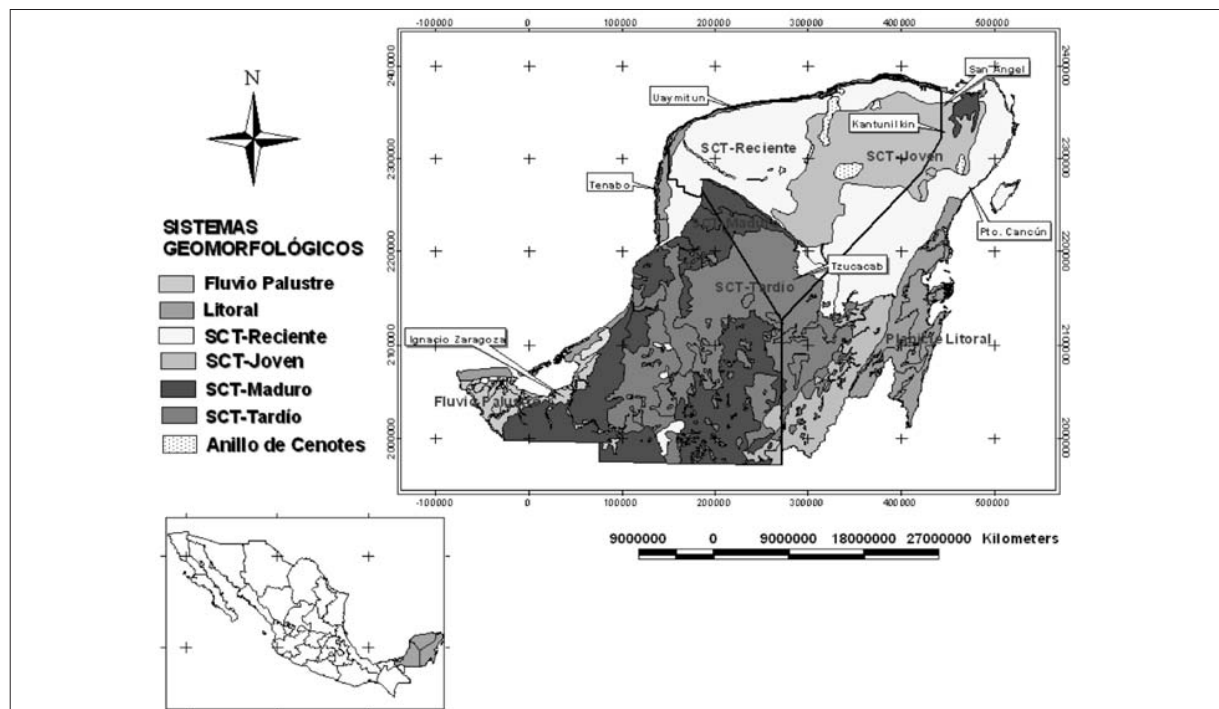


Figura 1. Mapa de sistemas geomorfológicos con la ubicación de los sitios de muestreo.

MATERIALES Y MÉTODOS

SELECCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

La selección de los sitios de muestreo se realizó con base en la identificación de las zonas de mayor representación de los sistemas geomorfológicos que son: Fluvio-palustre, Litoral y Carso-tectónico.

El sistema carso-tectónico puede ser dividido en reciente, juvenil, maduro y tardío (Fig. 1).

Para la extracción y preparación de monolitos se utilizó el método interno o del monolito de suelo (Baren y Bommer, 1982), la experiencia del Museo Internacional de Suelos (ISRIC, 2001) y el Centro de Referencia de Suelos de Cuba (Mas *et al.*, 1998).

La selección de los sitios específicos de muestreo se realizó con base en el conocimiento de las catenas para el caso de los suelos del sistema carso-tectónico o por la identificación del suelo dominante en extensión para el caso del sistema de litoral y el fluvio palustre.

A continuación se describe la estrategia general seguida para la elaboración de la colección de monolitos.

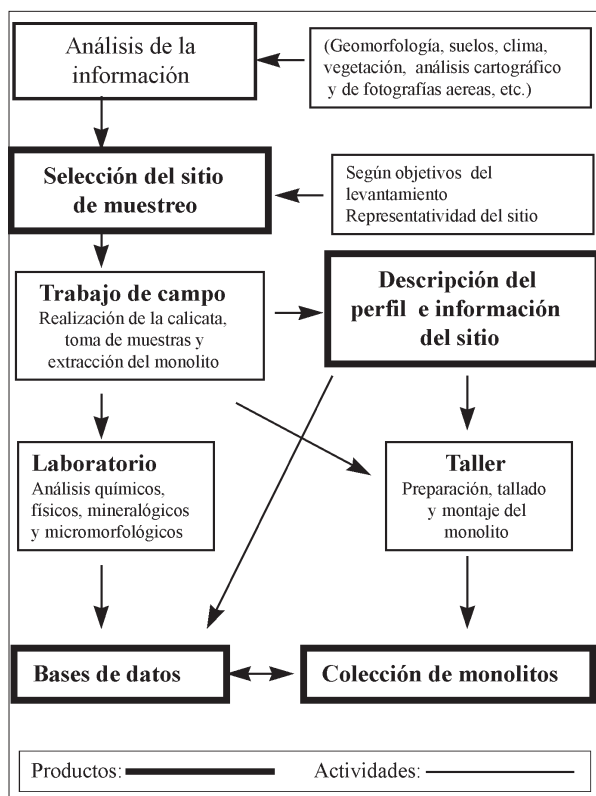


Figura 2. Metodología general para la elaboración de una colección de monolitos de suelos (Mas *et al.*, 1998)

TÉCNICA DE EXTRACCIÓN

Para el estudio de la morfología del perfil es necesario realizar un pozo pedológico o calicata (excavación) en los suelos representativos de la unidad de mapeo. Los sitios específicos de muestreo deben realizarse en lugares lo menos perturbados posible.

Al abrir una calicata el material de la parte superior, corresponde al epipedón, se amontonará separadamente del resto, de forma que no se mezclen los materiales y al tapar la calicata se pueda reponer en su lugar y se rehabilite el suelo adecuadamente. Para la calicata, se dibuja un rectángulo de 1.5 m de ancho por 3 m de largo sobre la superficie del suelo, tratando de que uno de los lados de 1.5 m quede expuesto al sol al término de la calicata; tanto para la descripción del perfil como para la extracción del monolito.

La cara que recibirá la luz directa del sol, debe ser lo más vertical posible, evitando colocar tierra encima, sin alterar la vegetación natural o el cultivo, de forma que se puedan tomar fotografías de calidad (Fig. 3) (Porta *et al.*, 1999).

Se recomienda contar con cajas de tres tamaños de largo, (por ejemplo 1.5, 1.0 y 0.5 m). En la realización de la calicata se recomienda utilizar palas rectas, curvas y pi-



Figura 3. El pozo pedológico o Calicata es una excavación que se realiza para conocer las características del suelo en estudio.



cos. La pala recta se utiliza para realizar cortes en las paredes de la calicata de manera que las paredes queden rectas o lisas, además la pala recta sirve para sacar bloques de suelo enteros en suelos arcillosos. Los bloques de suelo se sacan a manera de escalones, es decir, primero se introduce la pala de manera recta hacia abajo, posteriormente se introduce la pala de manera tangencial al primer corte. Se debe tener el cuidado de que el tamaño de la calicata no disminuya conforme se avanza en la excavación.

La descripción del perfil del suelo se realizó de acuerdo a la guía para la descripción y codificación de datos de suelo (Waveren y Bos, 1987; Siebe *et al.*, 1996). En la identificación de los horizontes, se recomienda tener en cuenta los cambios en el color, consistencia, textura, estructura, presencia de concreciones, raíces y tipo de minerales y otros rasgos pedológicos.

Las muestras de suelo se tomaron de los horizontes previamente identificados inferiores a los superiores, para evitar la posible contaminación de los mismos.

Las muestras de suelo por cada horizonte, se enviaron al laboratorio para su caracterización analítica, mediante análisis químicos, físicos, micromorfológicos y mineralógicos, lo más completa posible, como lo recomienda la "Base mundial de referencia del recurso suelo" (ISSS, ISRIC y FAO, 1999).

Se realizó un registro fotográfico del paisaje, en el que se incluye la calicata, perfil, detalle de los rasgos pedológicos, vegetación y cultivos. Este registro será expuesto junto con el monolito.

Con la pala recta o un azadón, se alisaron las paredes de la calicata donde se moldeó la columna de suelo, luego se marcaron, con un cuchillo, las dimensiones exteriores de la caja sobre la superficie lisa usando su tapa.

Posteriormente se cortó el suelo con cuchillo, espátula, cincel y piqueta de geólogo, quitando cuidadosamente el suelo de su alrededor, hasta lograr tallar una columna, la que sobresale claramente del perfil (Fig. 4).

Si el material de suelo presenta suficiente cohesión se puede seccionar también la base de la columna, la cual debe caber ajustadamente en la caja. Esta se empujó suave y lentamente contra la columna, quedando el monolito en su interior.



Figura 4. Herramientas utilizadas en la extracción de monolitos: 1) gurbias, 2) espátulas, 3) segueta, 4) tijera jardinera, 5) cinceles, 6 y 7) picoletas, 8) mazo.

La caja debe mantenerse firmemente en posición vertical, sosteniéndola en la base con un cincel largo y empujándola contra la columna mediante una barreta. La separación del suelo comenzó por la parte superior, conforme se corta el monolito y la caja se envolvieron con vendas anchas para evitar su fragmentación o rompimiento al separarlo del suelo (Fig. 5). Si el suelo no está compactado, con estructura granular o poco desarrollada debe evitarse el desprendimiento de la columna por la base, ya que se corre el riesgo de que se desprenda y caiga. Se recomienda tallar con un serrucho, de la base hacia el interior con sumo cuidado conforme se va metiendo la caja. La caja se forró por dentro con plástico, para proteger el suelo de desecamiento durante su transporte y almacenaje, al mismo tiempo que evita que el monolito se adhiera a las paredes de la caja durante la impregnación.



Figura 5. Extracción del monolito en un Arenosol.

Cuando la caja resulta más grande que el monolito, los espacios vacíos se rellenan con bolsas de suelo o poliespuma para evitar movimientos y su posible fragmentación; cuando se utilizan bolsas de suelo, deben ser retiradas al llegar al laboratorio, ya que pueden deformar al horizonte superficial debido a su peso, por lo que es más recomendable el poliespuma.

Después que ha sido alisado el perfil, se cubrió con un plástico y se atornilló la tapa. Se recomienda tomar dos monolitos por cada suelo.

Los monolitos se transportaron en su caja, utilizando una colchoneta para amortiguar la vibración brusca durante el viaje. Para transportar Arenosoles se recomienda colocarlos en forma vertical, para que su peso recaiga y se disminuya el riesgo de fragmentación.

PREPARACIÓN DE LOS MONOLITOS

La preparación de los monolitos consistió en el secado, aplicación de laca y prensado; a continuación se describen estas actividades.

Los monolitos se pusieron a secar en forma vertical ligeramente inclinados y recargados sobre una pared. El suelo se dejó secar hasta que aparecieron pequeñas grietas que favorecen la penetración de la laca; el secado tardó algunos días (entre cinco y 10 días), dependiendo del clima y la capacidad de retención de humedad del suelo (Fig. 6).



Figura 6. Monolito en etapa de secado, nótase la inclinación de la caja.

Por el hecho de que muchas lacas se “blanquean” cuando se aplican a un suelo demasiado húmedo, se debería realizar un pequeño ensayo antes de someter todo el perfil a tratamiento.

Para mejorar la penetración y profundidad de la laca, se perforó el monolito con un taladro de broca pequeña (0.5–1 mm de diámetro y de 15–20 mm de profundidad), para favorecer la formación de muchas grietas pequeñas y evitar la formación de grietas grandes que dificultan el tallado. A veces es conveniente utilizar una broca más gruesa, debido a que los orificios hechos con broca más delgada suelen saturarse más rápido y taparse.

Posteriormente se prepararon disoluciones de laca en thinner de diferentes concentraciones en dependencia de la textura y porosidad del suelo, si la textura es fina o arcillosa la primera aplicación es con una concentración de 2:8 (20%), la segunda de 3:7 (30%), la tercera de 5:5 (50%) y la última aplicación es de laca sin diluir es decir al 100%; si la textura es gruesa la primera aplicación se inicia con una concentración de 3:7 (30%), la segunda de 5:5 (50%) y la tercera con laca sin diluir (100%); se aplicó al suelo con un pulverizador o vertiéndola directamente una o más veces, hasta que el suelo se cubrió de una película muy fina del impregnante lo cuál requirió de algunos días. La dilución de la laca disminuyó con las aplicaciones consecutivas.

La última aplicación consistió en laca sin diluir. La laca es un producto tóxico que debe ser utilizado con mucho cuidado, se recomienda el uso de equipo de seguridad como máscaras contra gases, cubre bocas y lentes, así como trabajar en lugares ventilados.

Inmediatamente después de la aplicación de la laca concentrada (100%) y en esa misma cara del monolito, se colocó una tela de yute de igual dimensión externa que el monolito (25 cm de ancho y de largo tanto como la profundidad del suelo). Sobre el yute se repitió la aplicación de laca sin diluir o de cola (de secado rápido) y se adhirió una tabla de madera con un centímetro de grueso de la misma dimensión del monolito.

Posteriormente se pasó a prensar el monolito, el número de prensas a utilizar dependió del tamaño del monolito, y éstas se fueron apretando conforme pasaron los días; el tiempo de prensado dependió de las condiciones del clima y del tipo de suelo; cinco días como mínimo (Fig. 7).

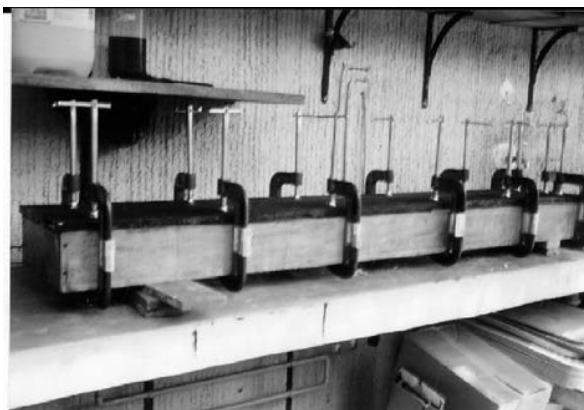


Figura 7. Monolito prensado.

Después del endurecimiento completo del pegamento y de la laca, se retiraron las prensas y la caja, sirviendo como base de soporte del monolito la madera antes pegada y con la ayuda de un compresor de aire se eliminaron las partículas más finas y con los instrumentos de dentista se quitaron algunos agregados del suelo lo más enteros posible para dejar al descubierto los detalles del monolito, como la estructura, la porosidad estructural, los cutanes (recubrimientos de arcilla en los agregados), motas, concreciones (material mineral y/o orgánico endurecido), raíces, túneles de lombrices, acumulación de semillas por algún insecto, entre otros; con la finalidad de apreciar un monolito lo más natural (Figs. 8 y 9). Por último, se cubre la superficie del monolito con laca transparente diluida (que no brille) con la ayuda de la pistola y el compresor de aire; procurando no poner mucha laca para que la columna se vea lo más natural posible.

Durante el acabado, se puede perder gran cantidad de suelo, quedando el monolito de un grosor de alrededor de cuatro centímetros.

MONTAJE DE LOS MONOLITOS

El monolito con su soporte se colocó en la parte lateral de un panel o tabla de triplay de 150 cm de largo, 110 cm de ancho y de uno a 1.5 cm de grosor. El triplay debe estar previamente pintado de color negro mate. El monolito se fijó con seis tornillos por la parte posterior, los cuales penetraron un centímetro aproximadamente.





Figura 8. Instrumental de dentista para el tallado de los monolitos. 1) elevador molar No. 1; 2 a 5) ganchos profilácticos.

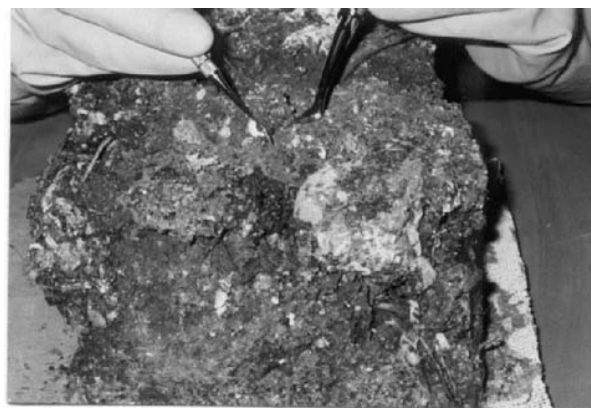


Figura 9. Tallado del monolito en el taller, nótese el levantamiento de los agregados para descubrir los rasgos petrológicos de detalle.

Cerca del monolito se colocó una regla que tiene por objetivo la observación del espesor de los horizontes. El resto de la superficie del panel es ocupado por fotografías del perfil, paisaje y algún otro detalle que se desee mostrar, por ejemplo, acercamientos de los horizontes con los colores al momento de la realización de la calicata.

En la misma tabla se montó información sobre las clasificaciones del suelo (internacionales, nacionales y locales), breve descripción del perfil, datos climáticos (climograma), la caracterización analítica, así como la interpretación de la misma, haciendo énfasis en los factores limitantes para el uso del suelo. También se recomienda la colocación de un mapa en el que se indique la localización del suelo representado en el monolito.

EXPOSICIÓN

Es deseable que se coloque un diagrama del perfil con los horizontes e información analítica en el mismo nivel, principalmente la referente a las propiedades diagnósticas necesarias para la clasificación.

A menudo, se utiliza un diagrama con el que se indica la calidad de la tierra, con base en el clima, el suelo y el manejo de la tierra.

La tabla de triplay con la información, se coloca sobre estantería de aluminio con una altura de 70 cm y del diseño acorde con la infraestructura de cada lugar.

La exposición de la colección de monolitos se acompaña de información impresa de los datos analíticos, evaluaciones técnicas y mapas (Fig. 10).



Figura 10. Monolito montado con: un mapa, fotografías de paisaje y perfil, diagrama de evaluación de tierras y su clasificación.

RESULTADOS

De los 11 monolitos obtenidos, seis corresponden al estado de Yucatán (Luvisol ródico, Cambisol ródico, Cambisol epiléptico, Leptosol réndzico, Cambisol mólico y Solonchak gléyico) y pertenecen al Sistema carso-tectónico maduro; dos al estado de Campeche (Vertisol eútrico y Solonchak gléyico) que pertenecen al Sistema fluvio-palustre y Sistema litoral respectivamente, y tres del estado de Quintana Roo (Calcisol epiléptico, Phaeozem gléyico y Arenosol álbito) los dos primeros pertenecen al Sistema carso-tectónico reciente y el último al Sistema litoral. A continuación se detalla la obtención de cada uno de los monolitos.

ADAPTACIONES A LA TÉCNICA DE EXTRACCIÓN

En los suelos compactados como el Luvisol ródico (LVro) y Vertisoles (VR) se humedeció el suelo para facilitar el tallado de la columna, evitando así que se caiga el suelo del horizonte superficial, que por lo general es de consistencia friable (en el caso del Luvisol ródico) y para facilitar la penetración de las herramientas en los horizontes más compactados. La herramienta más útil en este tipo de suelos fue la picoleta a partir del segundo horizonte, picando hacia adentro de la pared de suelo y hacia los lados. En el primer horizonte fueron de utilidad las gurbias de puntas curvas y rectas, así como espátula y cuchillo, tallando con cuidado ya que el suelo en este horizonte es friable (Fig. 4).

En Arenosoles (AR), y suelos muy arcillosos o que permanecen por un período de tiempo inundados como el Vertisol (VR) y el Solonchak gléyico (SCg), se recomienda utilizar cajas de lámina que estén lisas en la base, es decir sin bordes que formen ángulos hacia afuera, debido a que los ángulos que se forman, estorban al tratar de cortar el suelo hacia los lados con la caja, ya que se traban con alguna raíz o con el mismo suelo, impidiendo que la columna entre uniformemente a la caja; son de utilidad las espátulas, el machete y pala recta larga para la extracción. En los suelos arenosos, también se recomienda humedecer el suelo antes y durante el tallado de la columna para evitar que se caiga durante la extracción.

En suelos pedregosos como el Leptosol réndzico (LPrz), Cambisol mólico (CMmo), Calcisol epiléptico (CLlep) y algunos como el Cambisol ródico (CMro) y Cambisol epiléptico (CMlep), son de utilidad el cincel, la lima y la picoleta; así como cajas de madera. La columna de suelo se colectó con todo y piedras, las cuales son limadas o cortadas para estar al ras de la caja, si es posible, de lo contrario se les deja tal como estén, pues de lo que se trata es que la columna de suelo se vea lo más natural. También es recomendable humedecer el suelo.

En todos los tipos y clases de suelos, después de moldear la columna, se traza sobre ella las dimensiones interiores de la caja a manera de marca, para luego poder saber que tanto a entrado la columna de suelo a la caja.

En el Arenosol (AR), Luvisol ródico (LVro) y Cambisoles (CMro y CMlep), así como en suelos que presenten horizontes superficiales frágiles o friables, se recomienda comenzar el tallado de la columna de la mitad para abajo, o del horizonte más estable hasta su base, de tal forma que el horizonte superficial, en el caso del Arenosol, sea cortado por los bordes de la caja al empujarla hacia la columna; y en el caso de los Luvisoles, el horizonte superficial se corta al último con gurbias o espátula, hasta que ya se vaya a meter a la caja.

ADAPTACIONES DE LA PREPARACIÓN

Luvisol ródico (LVro)

Fue necesario hacerle a este monolito un mayor número de perforaciones, 5 cm², para una mejor penetración de la laca.

La primera aplicación de laca diluida fue 5 L al 10%, la siguiente aplicación 4 L al 20%, luego 2 L al 50% y por último 1 L al 100%, es decir, laca sin diluir. Debido al tamaño del monolito (150 cm de largo, 22 cm de ancho y 8 cm de grosor) la cantidad de laca total consumida fue 12 L; esta se aplicó poco a poco, permitiendo una mejor absorción y aplicando más en el primer horizonte, debido a la fragilidad y agrietamiento que presentó el suelo.

En este monolito, se probó darle tratamiento con pegamento blanco diluido al 10% con agua destilada, sin embargo, al secarse se observó agrietamiento, corriendo el riesgo de que el monolito se partiera por lo que se tuvo que raspar la capa de suelo impregnada con pegamento para luego poder tratarlo con laca.

Solonchak gléyico (SCgl)

El tiempo de secado para estos monolitos fue de dos semanas, además se les hizo un mayor número de perforaciones (5 cm²), para ampliar el área de absorción ya que este tipo de suelo no presenta poros. La aplicación de laca fue gradual, 3 L al 10%, 2.5 L al 20%, 2 L al 30%, 1 L al 50% y 1 L al 100%, consumiendo un total de 9 L; la aplicación de la laca se hizo lentamente, procurando que los orificios no se tapen y dando tiempo de que se absorba.

Phaeozem gléyico (PHgl)

Para el phaeozem gléyico (PHgl) se aplicó un secado parcial que duró 5 días sin permitir que las grietas que se iban formando al secarse el suelo sean grandes y profundas y puedan romper la columna.



La aplicación de laca fue 3 L al 20%, 3 L al 30%, 2 L al 50% y 1 L al 100% consumiendo un total de 9 L; haciendo mayor énfasis en los primeros horizontes y en las grietas.

Arenosol álbico (ARab)

El tiempo de secado es de tres a cinco días. La perforación de este monolito se hizo después de la primera aplicación de laca al 10%, ya que cuando se aplicó laca al 30% como lo recomienda Mas et al. (1998), la absorción fue muy lenta y únicamente penetró unos cuantos milímetros, por lo que se procedió a retirar esa capa de suelo y comenzar con una dilución al 10%, continuando con la aplicación gradual semejante a los anteriores, consumiendo un total de 30 L.

Leptosoles (LPprz), Calcisol (CLlep) y Cambisoles (CMro, CMmo y CMlep)

La primera aplicación de laca en el LP fue al 20%, en el CLlep 30% y en los CM fue al 10% y 20% respectivamente; la cantidad dependió del tamaño del monolito y la aplicación de la laca se hizo con mayor énfasis en los primeros horizontes y alrededor de las piedras. En los monolitos que presentaron piedras grandes, las piedras fueron rebajadas con cincel y segueta, una vez que la columna de suelo estuvo seca y endurecida por completo (después de la aplicación laca al 50%), pues de esta manera no se corre el riesgo de que se rompa el monolito.

El número de prensas a utilizar dependió del tamaño del monolito, y éstas se fueron apretando conforme pasaron los días; el tiempo de prensado dependió de las condiciones del clima y del tipo de suelo, cinco días como mínimo (Fig. 7).

Para asegurarse que la laca penetre, se introdujo una herramienta punzo-cortante en el monolito. También es posible levantar una capa de la laca para observar el suelo, si la herramienta entraba con facilidad y el suelo está suave o con demasiado polvo, entonces la laca no ha penetrado y se requiere mayor aplicación de laca.

ADAPTACIONES DEL TALLADO

Para que los agregados salgan lo más enteros posibles, se utilizó un elevador molar y un gancho profiláctico y así se definió la profundidad o tamaño del agregado, pues al enterrarlo en la columna de suelo, éste se rompe en pequeños terrones, luego con la ayuda de un gancho profiláctico se levanta el agregado para retirarlo (tratando de no dejar marcas con los instrumentos).

Este procedimiento se realizó una vez definido el grosor final del monolito, el cual se determinó quitando suelo en los bordes de la columna con la ayuda de una gurbia y/o espátula (Figs. 8 y 9).

En suelos pedregosos, las piedras pueden ser retiradas, siempre y cuando no se pierda mucho suelo o no se dañe algún horizonte del monolito. Si las piedras son suaves, éstas se pueden cortar con un serruchito o desgastar con una lima, pero ésta actividad se realiza una vez endurecido el suelo, para evitar el desmoronamiento de la columna.

Para los suelos que no presentan una estructura como tal (Arenosol), únicamente se elimina el exceso de laca con la ayuda de los instrumentos de dentista o con las gubias y el compresor de aire procurando dejar al descubierto los rasgos pedológicos que presente como en el caso del LVro, el cual presentó en tres de sus horizontes acumulación de semillas, probablemente de pastos (Figura 10).

El suelo removido que no ha sido impregnado con laca puede ser conservado para reparar posteriores daños en la columna, el suelo impregnado con laca se elimina.

MONTAJE

En la parte lateral de un panel o tabla de triplay (previamente pintada de negro mate) de 156 cm de largo, 110 cm de ancho y 1.2 cm de grosor, se fijó el monolito por la parte posterior con tornillos (el número de tornillos dependió del tamaño del monolito), los cuales deben penetrar solamente 1 cm aproximadamente (durante esta operación se presionó el monolito contra el panel, para que los tornillos no levanten el bloque compacto de suelo). A un costado del monolito se colocó una regla de dos colores (cada color representa 10 cm) con el propósito de que se note el tamaño del monolito y el espesor de sus horizontes. En el resto del panel se colocó la siguiente información: Clasificación del suelo de acuerdo a la WRB, 1999 (bibliografía), Soil Taxonomy (USDA, 1999), Local (INEGI, 1984) y Local-Maya (Duch-Gary, 1984). Material parental, Topografía, Vegetación, uso de la tierra, Clima (clasificación García, 1973, temperatura media anual, precipitación total anual, evaporación total anual). Caracterización, descripción de campo y datos analíticos (textura, carbón orgánico, acidez, suma de bases, capacidad de intercambio catiónico, mineral predominante, capacidad de aireación y humedad). Además fotografías del paisaje, usos y perfil del suelo, así como un cuadro de evaluación de tierras y un mapa geomorfológico para mostrar la ubicación de los sitios de muestreo (Fig. 10).

DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES DE LOS MONOLITOS

Después de montar los monolitos en el panel se les anexó debajo de cada uno, simuladores de roca y agua según correspondía el límite inferior del perfil para darle mayor naturalidad al monolito. Ver tablas de la 1 a la 11.



Tabla 1. Descripción del perfil Luvisol ródico de un monolito extraído de Tzucacab, Yucatán.

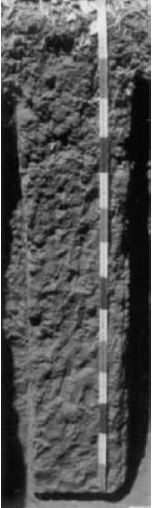
	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A	0 - 16 cm	Color café rojizo oscuro en húmedo (7.5 YR 2.5/3); textura arcillo limosa, pegajosa, superficie brillante; estructura en bloques subangulares; consistencia friable; estabilidad de agregados alta; materia orgánica media; densidad de raíces mediana; reacción al ácido clorhídrico baja, de 0.5-2%. Presencia de termitas, hormigas y otro tipo de insectos.
	B ₁	16 - 52 cm	Color café rojizo en húmedo (5 YR 3/4); textura arcillosa, pegajosa, consistencia de mantequilla; estructura en bloques angulares; estabilidad de agregados moderada; materia orgánica baja; densidad de raíces baja; reacción al ácido clorhídrico muy baja, de 0 - 0.5%. Presentó una pequeña acumulación de semillas (probablemente de pastos); también se observó la presencia de termiteros y larvas de cigarras y falso escorpión.
	B ₂	52 - 102 cm	Color rojo en húmedo (2.5 YR 3/6); textura arcillosa, pegajosa, consistencia de mantequilla; sin estructura; consistencia masiva (dura); materia orgánica baja; densidad de raíces muy baja; reacción al ácido clorhídrico muy baja, de 0 - 0.5%. Presentó una pequeña acumulación de semillas (probablemente de pastos).
	C	102 - 150 cm	Color rojo anaranjado en húmedo (2.5 YR 4/8); textura arcillosa, pegajosa, consistencia de mantequilla; sin estructura; de consistencia masiva; materia orgánica baja; densidad de raíces muy baja; reacción al ácido clorhídrico muy baja, de 0 - 0.5%. Presentó una pequeña acumulación de semillas (probablemente de pastos).

Tabla 2. Descripción del perfil Calcisol epiléptico de un monolito extraído de Kantunilkín, Quintana Roo.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A	0 - 18 cm	Color negro (5 YR 3/1); textura pegajosa y plástica, arcillo limosa; estructura granular; estabilidad de agregados baja; de consistencia friable; no presenta motas; con muchos poros finos, algunos atravesados por raíces gruesas; humedad fresca; Pedregosidad de 20-25%; porcentaje de materia orgánica media; porcentaje de raíces media; con reacción al ácido clorhídrico, fuerte y prolongado de 2-10%.
	A/C	18 - 29 cm 18 - 41 cm	Color pardo oscuro (2.5 Y 4/3) debido a una mezcla de suelo con piedra caliza; textura pegajosa y plástica, arcillo limosa; estructura granular; estabilidad de agregados baja; de consistencia friable; no presenta motas; con poros comunes y gruesos; humedad fresca; Pedregosidad de 40%; porcentaje de raíces baja; con reacción al ácido clorhídrico, fuerte y prolongado de 2-10%.
	C	29 - 50 cm 41 - 50 cm	Color pardo claro en húmedo debido a una mezcla de suelo con piedra caliza; material parental muy fragmentado; textura franco arenosa; estructura migajosa muy fino; desarrollo muy débil.

EXPOSICIÓN

El ordenamiento de los monolitos para su exposición puede ser de acuerdo a los principales tipos de suelos en el estado o en la Península de Yucatán, también puede ser de acuerdo a la principal actividad económica (por ejemplo la agricultura) de las zonas del estado como son: zona ex-henequenera, productora de básicos, hortícola y frutícola y ganadera de producción y explotación comercial.

Suelos de diferentes tipos de vegetación (selva, manglar, duna costera, sabana y otros), suelos del trópico, suelos con importancia ecológica, transferencia de tecnología con campesinos y otros productores, análisis de la contaminación ambiental, diseño y planeación de proyectos agropecuarios, fines didácticos de acuerdo a su distribución en el relieve, es decir, por catenas, entre otros.

En la parte inferior de cada estructura se colocan hojas con información resumida de las características y usos de los suelos para que las personas se las puedan llevar.

Los monolitos, por el momento se encuentran en el laboratorio de suelos del departamento de Protrópico de la Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia (FMVZ), pero posteriormente se trasladarán al museo que pretende fundar el proyecto "Base de datos digital de suelos para la Península de Yucatán incluyendo la nomenclatura Maya y FAO".

Para el diseño del local se diseñó un esquema que se muestra en la Figura 11.

Es recomendable que la instalación sea, preferiblemente, en la planta baja, para facilitar el transporte de los monolitos y demás materiales. Las habitaciones G, H e I deben estar bien ventiladas para disminuir los riesgos de intoxicación de los trabajadores debido a que se manejan solventes y otros productos tóxicos.



Tabla 3. Descripción del perfil Vertisol éutrico de un monolito extraído de Ignacio Zaragoza, La Carreta, Campeche.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A ₁₁	0 - 4 cm	Color negro en húmedo (2.5 Y 2.5/1); textura franco arcillosa, pegajosa, sin brillo; estructura angular; estabilidad de agregados muy alta; densidad de raíces extremadamente alta; sin reacción al ácido clorhídrico; presencia de grietas.
	A ₁₂	4 - 12 cm	Color gris oscuro en húmedo (10 YR 4/1); textura arcillo limosa, pegajosa; estructura subangular; estabilidad de agregados alta; presenta concreciones de sales; densidad de raíces extremadamente alta. Presencia de grietas.
	A ₁₃	12 - 21 cm	Color en húmedo (7.5 YR 4/2); textura arcillo arenosa, pegajosa, granos de arena perceptibles; estructura subangular; estabilidad de agregados alta; presenta concreciones de Manganeso y moteados de óxido de Hierro; densidad de raíces muy alta. Cuando seco presencia de grietas.
	A ₁₄	21 - 40 cm	Color gris oscuro en húmedo (10 YR 4/1); textura franco arcillosa, pegajosa; estructura angular; estabilidad de agregados alta; presenta muchos moteados de óxido de Hierro; densidad de raíces extremadamente alta. Cuando seco presencia de grietas.
	A ₁₅	40 - 65 cm	Color gris verdoso en húmedo (10 Y 5/1); textura franco arcillosa, pegajosa; estructura angular; estabilidad de agregados alta; presenta sales y moteados de óxido de Hierro; densidad de raíces extremadamente alta. Cuando seco presencia de grietas.
	C	65 - 86 cm	Color gris verdoso claro en húmedo (10 Y 8/1); textura arcillo arenosa, pegajosa; estructura en bloques subangulares; estabilidad de agregados consistente; presenta concreciones de sales de sodio y Manganeso (color negro) y un moteado de óxido de Hierro; densidad de raíces muy baja. Cuando seco presencia de grietas.

Tabla 4. Descripción del perfil Solonchak gléyico de un monolito extraído de Tenabo-Costa, Campeche.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A1	0 - 2 cm	Horizonte de transición entre el horizonte orgánico y mineral; color café pálido en húmedo (10 YR 6/3); textura franco arcillosa; estructura laminar; estabilidad de agregados alta; densidad de raíces extremadamente alta.
	A2	2 - 6 cm	Horizonte de eluviación; color café amarillento claro en húmedo (2.5 Y 6/4); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares; estabilidad de agregados alta; densidad de raíces extremadamente alta.
	A/C	6 - 17 cm	Horizonte de neoformación; color gris claro en húmedo (10 YR 7/2); textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares; estabilidad de agregados mediana; densidad de raíces extremadamente alta.
	C	17 - 47 cm	Material parental intemperizado; color rosa en húmedo (2.5 YR 8/3); textura franco arcillo limosa; estructura angular en bloques; estabilidad de agregados baja; densidad de raíces extremadamente alta.

Tabla 5. Descripción del perfil Phaeozem gléyico de un monolito extraído de San Ángel, Quintana Roo.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A	0 - 17 cm	Color negro en húmedo (10 YR 2/1); textura arcillo limosa; en húmedo sin estructura (masiva); en seco estructura angular; estabilidad de agregados muy alta; de consistencia masiva; no presenta motas; presenta pocos poros y finos; humedad mojado; 0% de Pedregosidad; porcentaje de materia orgánica alta; densidad de raíces alta; con presencia de mantillo de unos 5 cm de grosor.
	B	17 - 45 cm	Color negro en húmedo (2.5 YR 5/1); textura arcillo limosa; sin estructura (masiva); consistencia masiva; no presenta motas; presenta pocos poros y finos; humedad mojado; 0% de Pedregosidad; porcentaje de materia orgánica media; densidad de raíces media. Cuando seco presencia de grietas.
	C	45 - X cm	Color amarillo paja en húmedo (2.5 YR 4/1); textura arcillo limosa; sin estructura (masiva); consistencia masiva; presenta motas de color verdosas, amarillas y algunas moradas; presenta pocos poros y finos; humedad mojado; 0% de Pedregosidad; porcentaje de materia orgánica baja; densidad de raíces baja. Cuando seco presencia de grietas.

Tabla 6. Descripción del perfil Cambisol ródico de un monolito extraído de Tzucacab, Yucatán.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A	0 - 17 cm	Color café rojizo en húmedo (2.5 YR 3/2); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares; consistencia friable; estabilidad de agregados moderada; tamaño de agregados muy finos; poros comunes y entre agregados; humedad seca; materia orgánica abundante; raíces abundantes 60%, finas, delgadas y gruesas; Pedregosidad menor al 1%; densidad aparente 1.178 g/cm ³ . Presencia de termitas.
	Bw	17 - 54 cm	Color café rojizo en húmedo (2.5 YR2.5/3); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares; estabilidad de agregados moderada; tamaño de agregados finos; poros pocos y muy finos, entre agregados y algunos de forma cilíndrica; humedad seca; raíces 12% y finas; Pedregosidad 3%; densidad aparente 1.271 g/cm ³ .
	C	54 - 110 cm	Color café rojizo en húmedo (2.5 Yr 3/4); textura arcillosa; sin estructura (masiva); humedad seca; raíces 4%; Rocosidad 40%; Pedregosidad 40%; reacción al ácido clorhídrico medio, de 2 - 10%; presencia de grava revuelta con sascab y kankab; densidad aparente 1.082 g/cm ³ .

Tabla 7. Descripción del perfil Solonchak gléyico de un monolito extraído de Uaymitun, Yucatán.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A	0 - 6 cm	Color café pálido (10 YR 5/3); textura arcillo arenosa; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo plástico y pegajosa; abundantes microporos y poros muy finos; 0% de Pedregosidad; muy húmedo; densidad de raíces media, muy finas, finas, delgadas y algunas gruesas.
	A/C	6 - 23 cm	Color café amarillento en húmedo (2.5 Y 7/3); textura franco arcillo arenoso; sin estructura (masiva); consistencia en húmedo muy pegajosa; presenta poros abundantes micro y muy finos; 0% de Pedregosidad; muy húmedo; densidad de raíces media muy finas y finas.
	C	23 - 40 cm	Color café en húmedo (10 YR 6/4); textura franco arenosa; sin estructura (masiva); consistencia en mojado muy adhesiva; presenta abundantes microporos; humedad mojado; raíces pocas, finas y algunas gruesas.

Tabla 8. Descripción del perfil Arenosol álbico, de un monolito extraído de Puerto Cancún, Quintana Roo.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A ₁	0 - 19 cm	Color café pálido (2.5 Y 6/2); textura arenosa; sin estructura y consistencia muy friable; 0% de pedregosidad; microporos y poros muy finos; densidad de raíces extremadamente alta (80%); con un límite de horizonte claro; humedad seca; presencia de grava.
	A ₂	19 - 30 cm	Color café pálido (2.5 Y 7/2); textura arenosa franca; sin estructura; consistencia friable; poros muy finos y comunes; 0% de pedregosidad; densidad de raíces alta (60%); límite del horizonte claro; humedad seca. Presencia de un pequeño huevo vacío.
	A ₃	30 - 45 cm	Color en húmedo (2.5 Y 5/2); textura arenosa franca; estructura masiva y consistencia muy compactada; pocos poros y muy finos; densidad de raíces baja (20%); límite del horizonte claro; humedad seca.
	A ₄	45 - 60 cm	Color en húmedo (2.5 Y 6/3); textura arenosa franca; estructura masiva y consistencia dura o compactada; muchos poros finos y muy finos; sin raíces; 0% de pedregosidad; límite del horizonte claro; humedad fresca.
	A ₅	60 - 72 cm	Color en húmedo 2.5 Y 8/3; textura arenosa; sin estructura; consistencia ligeramente friable; muchos poros finos y algunos grandes; 0% de pedregosidad; densidad de raíces muy baja (menos del 10%); límite de horizonte gradual.
	C	72 - 95 cm	Color en húmedo 5 Y 8/2; textura arenosa franca; estructura masiva y consistencia dura o compactada; muchos microporos, poros finos y muy finos; humedad mojado; sin presencia de raíces; 0% de pedregosidad; límite de horizonte abrupto.



Tabla 9. Descripción del perfil Cambisol epiléptico de un monolito extraído de Tzucacab, Yucatán.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A	0 - 17 cm	Color café en húmedo 7.5 YR 2.5/3; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares; consistencia ligeramente friable; estabilidad de agregados media; pocos poros finos y grandes formados por raíces e insectos (como termitas, hormigas y lombrices); humedad seca; pedregosidad menos del 1%; reacción al ácido clorhídrico muy bajo (0-5%); densidad de raíces media 40%; límite del horizonte gradual.
	C	17 - 42 cm	Color café claro en húmedo 7.5 YR 2.5/2; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares; consistencia dura ligeramente compactada; estabilidad de agregados media; pocos poros finos y grandes formado por raíces e insectos (termitas, hormigas y lombrices); humedad seca; pedregosidad menos del 1%; reacción al ácido clorhídrico muy bajo (0-5%); densidad de raíces baja de 20 a 30%; límite del horizonte gradual.

Tabla 10. Descripción del perfil Leptosol réndzico de un monolito extraído de Tzucacab Yucatán.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A	0 - 23 cm	Color negro en húmedo 10 YR 2/1; textura franco limosa fina; estructura de bloques subangulares; consistencia friable; estabilidad de agregados moderada; muchos poros finos y grandes formados por agregados, raíces e insectos (hormigas); humedad seca; pedregosidad 30%, presencia de grava fina; reacción al ácido clorhídrico extremadamente alto; densidad de raíces extremadamente alta 80% (gruesas, finas y muy finas).

Tabla 11. Descripción del perfil Cambisol mólico de un monolito extraído de Tzucacab Yucatán.

	Horizonte	Profundidad	Descripción
	A	0 - 20 cm	Color café oscuro en húmedo 7.5 YR 2.5/2; textura franco arcillosa; estructura de bloques subangulares; consistencia friable; estabilidad de agregados alta; poros comunes finos y muy finos; humedad seca; pedregosidad menor al 1%; reacción al ácido clorhídrico muy bajo (0-5%); densidad de raíces alta 70% (finas y muy finas); límite de horizonte gradual.
	C	20 - 30 cm	Color café en húmedo 10 YR 2/2; textura franco arcillosa; estructura de bloques subangulares; consistencia ligeramente dura; estabilidad de agregados alta; poros comunes finos, muy finos y medianos; pedregosidad menor al 1%; reacción al ácido clorhídrico muy bajo (0-5%); densidad de raíces baja 30% (muy finas y finas); límite horizonte claro.

ALMACENAJE

Una vez terminados los monolitos, éstos pueden ser almacenados en anaqueles, por lo que se recomienda que la tabla en la que se montan los monolitos, no sean exactamente del tamaño de ellos, sino que tengan un margen de 5 cm por lado, esto permite el almacenaje de una gran cantidad de monolitos en un espacio reducido y poder

manejarlos y almacenarlos con mayor facilidad, tal y como se hace en el Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos (ISRIC).

La información que acompaña a cada monolito es colocada aparte en carpetas marcadas con la clave del monolito o el número del perfil para poder consultarlo en cualquier momento.

DISCUSIÓN

El material básico, usado por Kasatkin (1917), Van Baren y Bomer (1979) y Mas *et al.* (1998), comprende una caja de madera cuyas dimensiones interiores coinciden con las del monolito que se desea extraer, sin embargo, este ma-

terial no es recomendable para todos los tipos de suelos, ya que por ejemplo en la extracción del monolito Phaeozem gléyico (que se satura periódicamente con agua) la caja no penetra con facilidad debido al grosor de las tablas

Tabla 12. Información del sitio del levantamiento de los monolitos.

	MEX01	MEX02	MEX03	MEX04	MEX05	MEX06
Clasificación WRB (1999):	Luvisol ródico	Solonchak gléyico	Cambisol ródico	Vertisol éutrico	Calcisol epiléptico	Phaeozem gléyico
Soil Taxonomy (1999):	Typic Rhodus- talfsClayey,Kao- linitic Isohyperthermic	Entisol Fluvaquents	Dystric ustochrepts	Ustic endoaquerts	Lithic haplustolls	Typic Endoaquolls
Local INEGI (1970):	Luvisol crómico	Gleysol sódico	Cambisol	Vertisol	Rendzina	Histosol
Local Maya:	Kankab		Kankab	Ak'alché	Tsek'el	
Localización Sitio:	Tzucacab, Yucatán	Tenabo-Costa Campeche	Tzucacab, Yucatán	Ignacio, Zaragoza, Campeche	Kantunilkin, Quintana Roo	San Ángel, Quintana Roo
Coordenadas del perfil:	20° 0.550' N y 89° 1.052' O	20° 45' N y 90° 15' O	20° 0.562' N y 89° 1.062' O	18° 15' N y 91° 30' O	0449950UTMhor 2334428UTMver	0456514 2347522
Altitud:	49 msnm	10 msnm	49 msnm		31 msnm	38 msnm
Material parental	Caliza del Eoceno	Sedimentos	Caliza del Eoceno	Sedimentos aluviales	Roca caliza	Caliza
Topografía	Planicie	Planicie Palustre salina	Planicie	Planicie con Li- gera inclinación	Planicie	Planicie
Geomorfología	Lomeríos de ele- vaciones bajas	Planicie costera palustre	Lomeríos de ele- vaciones bajas	Planicie pluvio palustre	Planicie estructu- ral ondulada	Planicie estructu- ral ondulada
Clima Clasificación	A(W ₁) (i ₁)gw"	Aw ₀ (i ₁)gw"	A(W ₁) (i ₁)gw"	Aw ₂ (i ₁)g	Aw ₁ (i ₁)g	Aw ₁ (i ₁)g
Temperatura media anual:	26.3°C	26.2°C	26.3°C	26.2°C	24.7°C	24.7°C
Precipitación total anual:	1200 mm	1200 mm	1200 mm	1200 mm	1444.5 mm	1444.5 mm
Vegetación:	Selva mediana Subperennifolia	Manglar y Petén	Selva mediana subperennifolia	Selva baja inundable	Selva mediana subperennifolia	Pradera
Uso de la tierra:	Sistema silvopastoril	Ecológico	Sistema silvopas- toril	Ganadería	Cultivo de maíz	Pastizal

que la forman y porque la madera no se desliza con facilidad, corriendo el riesgo de esta manera que la columna se derrumbe, por lo que se recomienda utilizar también cajas de lámina (dura para que no se doble) en monolitos con estas características (como el Solonchak gléyico) y los Arenosoles que son suelos muy frágiles en estado seco y casi fluidos cuando están húmedos, ya que de esta manera la caja con sus bordes mas delgados y filosos pueden ayudar a cortar el suelo y la columna entra a la caja con mayor facilidad y menor posibilidad de que se derrumbe.

Mas *et al.* (1998) recomienda para suelos sueltos y turbosos utilizar adhesivos para obtener monolitos ligeros y delgados llamados, mondaduras lacadas, sin embargo, este tipo de suelos suelen estar empapados de agua y los tratamientos con adhesivos en el campo no dan buenos resultados, y en los suelos sueltos el espesor de la placa o lámina de suelo no debe exceder los 4 cm, ya que de lo contrario, se desmorona con facilidad la columna, por lo que el suelo colectado es muy poco; es por eso que las muestras pueden ser obtenidas mediante cajas metálicas con la tapa posterior desmontable que se introduce, en el área previamente tratada, comprimiéndolo y cortando a su alrededor, finalmente, el armazón con el suelo es extraído cortándolo por su cara posterior con un cuchillo bien afilado o una pala recta; teniendo la ventaja este método de ob-

tener una mayor cantidad de muestra, además que es menos engorrosa que utilizar adhesivos en campo.

Hodgson (1987), recomienda en el procedimiento para la extracción de los monolitos que hay que tener en cuenta las características físicas de los suelos, como su grado de desarrollo, estructura, presencia de piedras, etc., para saber que tipo de materiales y herramientas son buenas a utilizar, lo cual es de mucha utilidad ya que Mas *et al.*, (en revisión) y Van Baren y Bomer (1982) en su descripción, mencionan las herramientas que se usan en general (cuchillo, machete, espátula, cincel y picoleta), pero no especifican cuales utilizar para cada tipo de suelo, por lo que al reproducir la técnica de extracción se presentaron problemas, pues los suelos son diferentes entre sí e incluso entre horizontes, por lo que las herramientas tienen diferente uso en cada suelo y entre cada horizonte; es importante detallar este tipo de cosas ya que de esta manera se facilita el trabajo y se ahorra tiempo. Por ejemplo, para el tallado de la columna, la piqueta de geólogo no se utiliza en horizontes de consistencia friable (que por lo general son los superficiales) y las gurbias, espátula y cuchillo son más útiles en los primeros horizontes o de consistencia friable, y estos deben tener un mango largo para una mejor manipulación.



Tabla 12. Información del sitio del levantamiento de los monolitos. (Continuación)

	MEX07	MEX10	MEX11	MEX12	MEX13
Clasificación WRB (1999):	Solonchak gléyico	Arenosol albico	Cambisol mólico	Leptosol réndzico	Cambisol epiléptico
Soil Taxonomy (1999):	Entisol fluvaquents		Lithic haplustolls	Lithic haplustolls	Lithic haplustolls
Local INEGI (1970):	Gleysol sódico	Arenosol	Rendzina	Litosol	Cambisol
Local Maya:		Arena	Boxlum	Boxlum	Kankab
Localización Sitio:	Uaymitun, Yucatán	Puerto Cancún, Quintana Roo	Tzucacab, Yucatán	Tzucacab, Yucatán	Tzucacab, Yucatán
Coordenadas del perfil:	21° 18' 47.5" N y 89° 28' 52.5" O	20° 10' 34.5" N y 86° 46' 23.7" O	20° 05' 42" N y 89° 01' 01.9" O	20° 00' 35.8" N y 89° 01' 0.6" O	20° 00' 35.8" N y 89° 01' 01.3" O
Altitud:	32 msnm	12 msnm	52 msnm	54 msnm	52 msnm
Material parental	Caliza		Caliza del Eoceno	Caliza del Eoceno	Caliza del Eoceno
Topografía	Planicie	Planicie	Comienzo de la pendiente	Cima de la pendiente	Planicie
Geomorfología	Planicie estructural baja	Planicie plustre costera de inunda- ción marina	Lomeríos de elevaciones bajas	Lomeríos de elevaciones bajas	Lomeríos de elevaciones bajas
Clima Clasificación (Köppen):	Bso (h') w (x')	Ax' (W0) iw"	A (w1) (i1)gw"	A (w1) (i1)gw"	A (w1) (i1)gw"
Temperatura media anual:	de 22 a 26°C	Mayor de 22°C	26.3°C	26.3°C	26.3°C
Precip. total anual:	800 mm	1300 mm	1200 mm	1200 mm	1200 mm
Vegetación	Manglar	Duna costera	Selva mediana subperennifolia	Selva mediana subperennifolia	Selva mediana subperennifolia
Uso de la tierra	Ecológico	Ecológica y Turístico	Sistema silvopastoril	Sistema silvopastoril	Sistema silvopastoril

El perfil de suelo puede presentar horizontes friables y horizontes duros o compactados, es por eso que durante el tallado de la columna se recomienda humedecer la misma, para evitar el desmorono del horizonte friable, pues el suelo tiende a pegarse cuando está húmedo, y también se humedece para facilitar la excavación alrededor del monolito, pues de esta forma las herramientas pueden penetrar con menor dificultad.

De acuerdo con las técnicas descritas por Baren y Bommer (1982) y Mas *et al.*, (1998), el clima es un factor muy importante en la preparación de los monolitos pues influye en el secado de la laca, por lo que se recomienda, aplicar la laca en época de secas, así como la colecta de los mismos.

Para la preservación de los monolitos, Mas *et al.*, (1998) Baren y Bommer (1982) y Wright (1971) recomiendan utilizar diluciones de laca en thinner de diferentes concentraciones, dependiendo estas principalmente de la composición textural y presencia de poros en el suelo, comenzando con una dilución de dos partes de laca y ocho partes de thinner (20%) para suelos con textura arcillosa, y tres partes de laca y siete de thinner (30%) para suelos de textura gruesa, y así sucesivamente; Baren y Bommer (1979), mencionan que la primera aplicación de laca es muy importante, pues de ésta depende la profundidad a la que se desee llegar, y ésta a su vez depende del suelo y su estructura, sin embargo estas recomendaciones no fueron

aplicables para todos los monolitos, ya que para el LVro, SCg, VR y CM e incluso el AR, la laca se tuvo que diluir más (10%), debido a que la laca no penetraba lo suficiente y formaba una capa delgada y dura en la superficie, por lo que también se les hizo un mayor número de perforaciones (5 cm²); por lo que las características del suelo no es el único factor que debe importar, sino también las características del agente preservante como es la viscosidad influida por el clima.

En el tallado es importante tener en cuenta las características y rasgos pedológicos que presente el perfil de suelo, así como las actividades biológicas que ocurren en él, por lo que al quitar agregados o terrones de suelo, hay que tener cuidado de no deteriorarlos con los instrumentos empleados o peor aún eliminarlos; es por eso que los agregados que se retiran no deben ser muy grandes, porque se corre el riesgo de eliminar o maltratar algún detalle como acumulación de semillas por algún insecto, raíces, túneles de lombrices, etc.

En el montaje y exposición de los monolitos como lo mencionan Mas *et al.*, (1998), Baren y Bommer (1982) y Krasnyuk (1917), es recomendable colocar información estándar sobre el perfil de suelo como clasificación, descripción del perfil, datos climáticos, caracterización analítica, factores ambientales, una evaluación del suelo y cualidades de la tierra, así como fotografías y un mapa de localización del suelo; sin embargo, el contenido de la

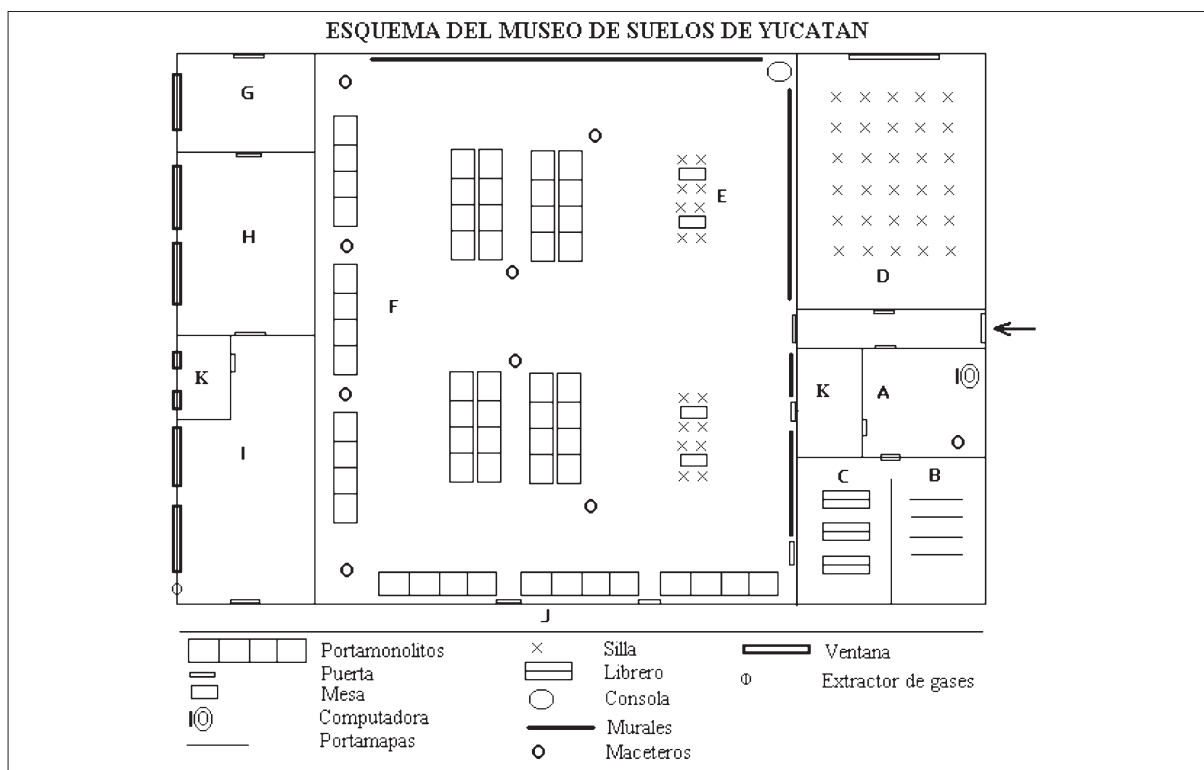


Figura 11. Instalación para la exposición de la colección de monolitos de suelos. A=Oficina; G= Bodega para guardar los instrumentos, B= Mapoteca, H= Cuarto de secado, C= Minibiblioteca, I= Cuarto de preparación de monolitos, D= Sala de conferencias, J= Pasillo Lateral, E= Sala de consultas, K= Baño, F= Sala de exposiciones. El esquema no está a escala.

información y el acomodo de los monolitos de suelo en la exposición dependen entre sí, de los objetivos de estudio y de los intereses del grupo de usuarios al que se destine.

Cuando se lleva a cabo la exposición de alguna colección, ésta entra en contacto con una serie de agentes degradantes como luz, calor, humedad y polvo, es por eso, que cuando un ejemplar no va a ser utilizado por el momento en alguna exposición, es recomendable almacenarlos (Navarro-Sigüenza *et al.*, 1991), en el caso de los monolitos se recomienda envolverlos y guardarlos verticalmente en cajas de madera u horizontalmente en anaqueles de metal, guardando toda su información en carpetas previamente identificadas con la clave o número del perfil.

Se pretende que la colección de monolitos de suelo permita a los biólogos, ecólogos, agrónomos y demás in-

vestigadores, desarrollar estudios y definir tecnologías sostenibles que permitirán un mejor manejo de los suelos y por consiguiente la conservación de los recursos naturales (de los cuales depende en gran parte nuestra economía), es decir, que sirva de referencia para todos los estudios sobre manejo de recursos que se desarrollen en la región.

En el plano universitario se proyecta fomentar la formación de estudiantes que permita que éstos se inicien en el estudio formal de los suelos y así tener más profesionales que se dediquen a ésta área que buena falta nos hace.

Otra proyección es acrecentar la colección para que sea la más completa y representativa del Sureste de México.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron en total 11 monolitos que representan a ocho de los 12 grupos de suelos reportados para la Península de Yucatán. Los grupos de la colección son: Arenosol, Cambisol, Leptosol, Luvisol, Solonchak, Phaeozem, Calcisol y Vertisol.

Para la extracción de Vertisoles, Solonchaks, Phaeozem y Arenosoles se deben utilizar cajas metálicas, y para los demás, como el Luvisol, Cambisol, Calcisol y Leptosol cajas de madera armables. Las herramientas a utilizar en la extracción del monolito dependen de la unidad de suelo



y, más específicamente, del horizonte; sin embargo, las herramientas de mayor utilidad y de las cuales no se puede prescindir son: picoleta, espátula, pala recta, lima, cincel y martillo. El humedecimiento del monolito facilita su extracción.

La aplicación (cantidad y frecuencia) de la laca debe realizarse de acuerdo con la textura y estructura del suelo.

En el tallado se recomienda comenzar por los bordes y determinar el grosor del monolito para que quede uniforme

y se facilite esta actividad. De acuerdo con cada unidad de suelo se debe tener cuidado en descubrir o mostrar los procesos pedogenéticos, así como los rasgos producto de la actividad de la biota

El montaje y la exposición dependen de los objetivos de estudio y de los intereses del grupo de usuarios al que se destine.

REFERENCIAS

- Baren, J. H. V. Van y W. Bomer, 1982.** Procedimientos para la Colección y Preservación de Perfiles de Suelo. Publicación Técnica No. 1. ISRIC, Wageningen. The Netherlands.
- Cabrera-Cano, E. F., J. S. Flores, 1993.** Guía de Excursiones Botánicas en México. En: XII Congreso Mexicano de Botánica. Mérida, Yucatán. UADY. pp
- Chang R, Villegas R., S. Kauffman, R. Marin, C. Balmaseda, F. Arcia y D. Ponce de León, 1994.** Establishment in Cuba of the National soil collection and its database within NASREC Programme. Symposium A world reference base for soil resource. Volume 6b. Word Congress of soil science. Acapulco, Gro., México.
- Duch-Gary, J., 1984.** La conformación territorial del Estado de Yucatán. Los componentes del medio físico. Universidad Autónoma de Chapingo. México. pp 299-307.
- Duch-Gary, J., 1991.** Fisiografía del Estado de Yucatán. Universidad Autónoma de Chapingo. México. pp
- Espejel-Carvajal, I. y J. S. Flores-Guido, 1994.** Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. En: Etnoflora Yucatanense. Fascículo 3. Ed. UADY. Mérida, Yucatán. pp
- FAO, 2001.** El enfoque de planificación participativa para enfrentar la degradación de tierras en América Latina.
- Hodgson, J. M., 1987.** Muestreo y descripción de suelos. Ed. Reverte, S. A. Barcelona. pp 22-35.
- INEGI, 1984.** Guía para la interpretación de las cartas edafológicas. INEGI. México, D. F. pp. 8-45.
- INEGI, 1999.** Anuario estadístico del estado de Yucatán. Ed. INEGI-Gobierno del estado de Yucatán, México. pp 80-87.
- ISRIC, 2001.** Global Assessment of the Status of Human-induced Soil Degradation (GLOSOD). <http://www.isric.nl/GLASOD.htm>
- ISSS, ISRIC and FAO, 1999.** World reference base for soil resources. Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. FAO, ISRIC and ISSS. Roma, Italia. pp 14-18.
- Jamagne, M., D. King, C. Le Bas, J. Daroussin, P. Vossen y A. Burrill, 1994.** Elaboration and use of the european soil geographical data base. Symposium Soil data need for expressing land qualities at different scales. Volume 6b. Word Congress of soil science. Acapulco, Gro., México.
- Kasatkin, V. G. y A. A. Krasnyuk, 1917.** Aid to field work in soil investigations. Petrograd, Russia.
- López-Ramos, E., 1975.** Geological summary of the Yucatán Peninsula. En: Nairn, A. E. M. *et al.* Ed. The Gulf of México and the Caribbean. Plenum Press, Nueva York, pp 257-282.
- Lugo, Hubp J., 1999.** La conservación y el aprovechamiento del patrimonio natural. En: Universidad Autónoma de Yucatán Ed. Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. México, D. F.: PROEESA. pp. 155-162.
- Mas-Martínez, R., I. Fernández-Denis, R. Villegas, 1998.** Monolitos de suelo para colecciones científicas. ISRIC. Cuba.
- Navarro-Sigüenza, A. G. y J.E. Llorente-Bousquets, 1991.** Museos, colecciones biológicas y la conservación de la biodiversidad: una perspectiva para México. En: Memorias del seminario sobre conservación de la biodiversidad biológica en México. No. 3 Ed. UNAM. México. pp 6-9.
- Orellana Lanza, R., 1999.** La conservación y el aprovechamiento del patrimonio natural. En: Universidad Autónoma de Yucatán Ed. Atlas de procesos Territoriales de Yucatán. México, D. F.: PROEESA. pp 163-182.
- PNUD, PNUMA, Banco Mundial y WRI, 2001.** Estudio Global Revela Nuevas Señales de Peligro. http://www.wri.org/press/goodsoil_spa.html
- PNUMA, 2001.** El informe GEO América Latina y el Caribe: perspectivas del medio ambiente 2000 presenta datos relevantes sobre la situación ambiental de la región.
- Porta Casanellas, J., M. López-Acevedo Reguerín y C. Roquero de Laburu, 1999.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª. Ed. Mundi-Prensa. España. pp
- Siebe, C., R. Jahn, K. Stahr, 1996.** Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México. pp 5-57.
- Waveren, E. J. Van y A.B. Bos, 1987.** Guidelines for the description and coding of soil data. Technical paper. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Wright, M. J., 1971.** The preparation of soil monoliths for the ninth International Congress of soil Science. Adelaide, 1968. Geoderma. 5: 151-159.





ACTUALIZACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DEL ESTADO DE YUCATÁN

Francisco Bautista¹, David Palma-López² y Wendy Huchin-Malta³

¹*Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán*

²*Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco*

³*Lic. en Biología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán*

RESUMEN

El estado de Yucatán se caracteriza por tener una gran diversidad de suelos en extensiones pequeñas de terreno, lo que complica el manejo homogéneo de los mismos. A pesar de ésto el 62% de las tierras dedicadas a la agricultura son destinadas al monocultivo de pastos. Esta situación podría deberse al escaso conocimiento de los suelos en todos los niveles y a la poca información sobre el uso y manejo de los mismos. Para conocer las particularidades de los suelos es necesario caracterizarlos y clasificarlos correctamente para así poder establecer planes de desarrollo que nos conduzcan a utilizar los suelos en forma correcta. No es posible impactar la agricultura sin caracterizar y designar precisa e inequívocamente los suelos.

Este trabajo tomó como base de estudio las cartas edafológicas 1:250000 elaboradas por el INEGI (1984), se actualizó la clasificación de acuerdo al sistema WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999) y *Soil Taxonomy* (USDA, 1999), se realizaron verificaciones en campo y se digitalizó las cartas edafológicas. Se reclasificaron un total de 142 perfiles en todo el estado de Yucatán. El sistema WRB demostró ser el más adecuado para la clasificación de los suelos de esta región al separar las particularidades de los suelos más detalladamente. Esto se demuestra al tener 36 unidades de suelo, mientras que realizando la clasificación en el sistema *Soil Taxonomy* se encontraron 22 subgrupos. Además se identificaron los grupos y órdenes con mayor potencial agrícola.

ABSTRACT

Yucatán is characterized by its vast soil diversity in small land areas and this make the management more complicated. However, 62% of the land used in agriculture are grass monoculture. This situation is due may be to the lack of knowledge in soils in different levels and the little information about the use and management of them. To know the particularities of the soils is necessary to characterize and classify them to be able to establish development plans to use the soils in the right way. It is impossible to impact the agriculture without characterizing and designing of the soil with precision. This work was base on the edafologic cartography 1:250000 done by INEGI (1984) and the classification was updated by system WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999) and *Soil Taxonomy* (USDA, 1999), it was done field inspection and the edafologic cartography was digitalized. The classification was done again with a total of 142 side views in Yucatan, the WRB system shown to be the best because classify the soil regions by its particularities and details, this is demonstrated having 36 units and with the soil taxonomy system were only 22 subgroups, also were identified the groups and orders with a higher agriculture potential.

INTRODUCCIÓN

El estado de Yucatán se caracteriza por tener una gran diversidad de suelos en extensiones pequeñas de terrenos (Duch, 1988). Este es un hecho que tiende a ser ignorado, debido al escaso conocimiento de los suelos en todos los niveles y a la poca información sobre el uso y manejo de los mismos. Para conocer las particularidades de los suelos es necesario caracterizarlos y clasificarlos correctamente para así poder utilizar la información que se tiene en la planeación y manejo del recurso. No es posible impactar en la agricultura si no se caracterizan y designan precisa e inequívocamente los suelos (Porta, 1999).

Todo sistema de clasificación tiene como finalidad el ordenamiento de los objetos con base en sus características principales, de tal manera que toda esa información se sintetiza en unas cuantas palabras. En el caso de los suelos, el objetivo de la clasificación no es diferente. Se conforma en un medio de comunicación con el cual se identifican y mencionan las propiedades distintivas principales, logrando un medio de comunicación entre especialistas. Para que la clasificación cumpla con su objetivo debe ser lo más precisa posible.

México no cuenta con un sistema de clasificación de suelos propio, lo que origina que se tenga que adoptar sistemas de clasificación desarrollados en otros países. Por tal motivo se adoptó la clasificación propuesta por la FAO/UNESCO en 1968, y que fue modificada por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) (actualmente INEGI) y que es utilizada en la caracterización y cartografía de los suelos.

La clasificación FAO/UNESCO (1968) fue modificada por FAO en 1988; El número de jerarquías principales se incrementó de 26 a 28 grupos y las unidades de suelo de 106 a 153; recientemente la clasificación FAO (1988) ha sido actualizada por FAO-ISRIC-SICS (1999) al sistema WRB; en donde el número de grupos se incrementó de 28 a 30.

Por otro lado, el sistema de clasificación de los Estados Unidos (*Soil Taxonomy*) aunque no se utiliza oficialmente en México, es un sistema de clasificación usado ampliamente en el mundo y en México por agrónomos, científicos, maestros, etc. Esto obedece a que se ha difun-

dido ampliamente a pesar de que fue elaborado para clasificar los suelos de los Estados Unidos.

Las principales diferencias que existen entre estos dos sistemas de clasificación son: el sistema de clasificación WRB usa terminología tradicional por que conservo la mayoría de los nombres usados en sus versiones anteriores, además de autoexplicativa, mientras que el sistema *Soil Taxonomy* usa terminología solamente autoexplicativa, el sistema WRB no toma en cuenta los regímenes de humedad y temperatura, mientras que el sistema *Soil Taxonomy* estos son parte integral en la clasificación de los suelos y por último el sistema WRB utiliza dos divisiones importantes (grupo y unidades de suelo), mientras que el sistema *Soil Taxonomy* utiliza seis divisiones.

Entre las similitudes que presentan estos dos sistemas, se encuentra el uso común de los horizontes y propiedades de diagnóstico; un hecho desafortunado es que en ambos sistemas se utilizan los mismos nombres para ciertos horizontes de diagnóstico, si bien con definiciones y requerimientos distintos, lo que puede inducir a confusiones y errores.

La actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán diferenciara las particularidades de los suelos que se encuentran sobre roca caliza, con lo que se repercutirá de manera benéfica en la productividad de los sistemas agropecuarios, forestales y en la conservación de los recursos naturales del estado de Yucatán. Además de que permitirá identificar al sistema de clasificación más adecuado para los suelos del estado de Yucatán.

Por todo lo anterior el objetivo de este trabajo es actualizar la clasificación de los suelos del estado de Yucatán generada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 1984; en base al sistema FAO, 1970) al sistema WRB (FAO-ISRIC-SICS, 1999) y a la clasificación norteamericana o *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1999) para tener información actual que nos permita tomar mejores decisiones sobre el uso y manejo de los suelos.

MARCO TEÓRICO

CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Las personas tienen una tendencia natural a separar y clasificar los objetos naturales de su entorno. Los suelos no son la excepción pero por ser una colección de cuerpos naturales no consolidados, formados por sólidos, minerales u orgánicos, líquidos y gases (Buckman y Brady, 1991), la clasificación tiene que ser más científica y organi-

zada. El uso de un sistema de clasificación en este campo tiende a reflejar "el estado del arte" y los pensamientos actuales en este campo (Boul *et al*, 1980).

Los propósitos de una clasificación de suelos son claros y se resumen en 5 puntos.

1. Organizar el conocimiento para poder comunicar la impresión de la naturaleza de un suelo con relación a otro.



2. Extraer y entender la relación y principios en la población que clasificamos, para seleccionar las propiedades usadas como criterios para clasificar.

3. Recordar las propiedades de los suelos clasificados.

4. Aprender nuevas relaciones y principios de la población que se está clasificando.

5. Establecer grupos o subdivisiones de los suelos que se estudian, para identificar sus mejores usos, estimar su productividad y predecir su comportamiento. Esto es muy importante en el desarrollo de la agricultura (Boul *et al*, 1980).

Las limitaciones que presentan los suelos, su aptitud para aceptar determinados usos o su papel como elemento del medio ambiente pueden inferirse de la descripción del perfil, de las características analíticas (físicas y químicas) de cada uno e los horizontes en que se halle organizado y de las condiciones del medio en que se encuentre (regímenes de humedad y temperatura, posición en el terreno entre otras). Por tal motivo el estudio del perfil es de suma importancia en la clasificación de los suelos (Porta, 1999).

Los primeros intentos para clasificar sistemáticamente a los suelos se hicieron en China durante el reinado de la Dinastía Yao (2357-2261 a. c.), en donde el propósito principal fue el de establecer clases de tierras para pago de impuestos según su productividad. Después siguieron clasificaciones geológicas y petrográficas con otros enfoques, pero todas eran muy locales y por lo tanto poco conocidas. Fue hasta 1882 que aparecieron las clasificaciones basadas en los procesos genéticos. En Rusia, V. Dokuchaev hizo la primera clasificación para los suelos Chernozem, en 1927 Glinka establece el concepto de horizontes diciendo "Cada suelo evolucionado consiste de varios horizontes de un origen común, en la sucesión del perfil".

En los Estados Unidos en 1927, Marbut elaboró la primera clasificación de suelos con bases genéticas. A partir de la década de los años 50, Guy Smith comienza a preparar un nuevo sistema de clasificación de suelos, que se denominó 7ma Aproximación, la cual fue evolucionando hasta convertirse en la clasificación Soil Taxonomy (Boul *et al*, 1988; Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio, 1990).

En México a fines del siglo XIX y principios del siglo XX los agrónomos interesados en la química y en la geología son los precursores de la ciencia del suelo. Con lo que respecta a la clasificación de suelos, fue en 1927 cuando el profesor Shaw introduce las primeras nociones de clasificación de suelo, pero fue hasta 1940 cuando en nuestro país se tuvo un conocimiento completo de la clasificación de suelos, al tener las obras de Glinka traducidas al castellano. En 1960 la clasificación de los suelos dentro de la agrología se basa en la 7ª Aproximación de los EU. En 1968 se crea la Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL) que elabora las cartas edafológicas del país usando la clasificación de suelos propuesto por la FAO/UNESCO (1968), clasificación que aun sigue vigente, porque cuando se desea clasificar un suelo generalmente se toman como referencias las cartas edafológicas (Ortiz y Gutiérrez, 2000). Actualmente los estudios de génesis de los suelos son escasos por tal motivo a los investi-

gadores que llegan a clasificar un suelo les falta información sobre los procesos que ocurren en los mismos.

En la actualidad existen más de 20 sistemas de clasificación de suelos en el mundo, los más utilizados son el sistema de clasificación mundial WRB y el sistema Americano *Soil Taxonomy*.

CLASIFICACIÓN INEGI (FAO/UNESCO, 1968 MODIFICADO POR CETENAL)

En 1968 se crea la CETENAL, la cual elaboró las cartas edafológicas del país usando el sistema de clasificación de los suelos propuesto por la FAO/UNESCO en 1968 por ser de uso muy generalizado entre los especialistas de suelo de México y porque su fundamento práctico y técnico permitió que el usuario lo maneje a modo de referir los elementos del medio físico en la elaboración de programas de acción.

Las modificaciones generales que se hicieron al sistema FAO/UNESCO (1968), fueron las siguientes: a) agregar subunidades de suelos que se han encontrado en el país y que no se consideran en la clave de la FAO, b) castellanizar algunos nombres de unidades y subunidades e c) incluir el sistema climático modificado por Enriqueta García, para la clasificación de las unidades por clima. En el estado de Yucatán se encontraron las siguientes unidades.

Cambisol (B). Son suelos jóvenes y pocos desarrollados pueden presentar ligera acumulación de arcilla, CaCO_3 , Fe, Mn, etc. Estos suelos son altamente susceptibles a la erosión.

Cambisol gléyico (Bg). Presentan alguna capa saturada periódicamente con agua.

Cambisol cálcico (Bk). Se caracterizan por ser calcáreos en todas sus capas, o por tener acumulación de caliche suelto en alguna profundidad, pero con una capa superficial de color claro, o pobre en materia orgánica.

Cambisol crómico (Bc). Tienen color rojizo o pardo oscuro.

Castañozem (K). Presentan una capa superior de color pardo o rojo oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes; y acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo.

Castañozem Haplico (Kh). Se caracterizan por tener acumulación de caliche suelto en pequeñas manchas blancas dispersas o en una capa de color claro de menos de 15 cm de espesor.

Feozem (H). Tiene una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes.

Gleysol (G). Suelos que se inundan en alguna época del año se caracterizan por presentar colores grises, azulosos o verdosos que al secarse y exponerse al aire pueden presentar manchas rojas.



Gleysol mólico (Gm). Tiene una capa superficial oscura, fértil, suave y rica en materia orgánica.

Litosol (L). Suelos con una profundidad menor a los 10 cm.

Luvisol (L). Suelos que tienen un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo, son levementes ácidos y altamente fértiles, son de color rojo o pardo rojizo.

Luvisol crómico (Lc). Presenta colores rojo o amarillento en el subsuelo y son de fertilidad moderada.

Luvisol cálcico (Lc). Son suelos ricos en cal, que pueden presentarse en el subsuelo en forma de polvo o caliche y son de fertilidad moderada a alta.

Nitosol (N). Suelos muy profundos (más de 150 cm), enriquecidos con arcilla y son de color rojo.

Nitoso, éútrico (Ne). Son suelos ligeramente ácidos.

Regosol (R). Suelos que no presentan diferenciación clara entre los horizontes.

Rendzina (E). Suelos someros (menos de 50 cm de profundidad), con una capa superficial abundante en humus y muy fértil (horizonte mólico) que descansa sobre roca caliza o algún material rico en cal (más de 40%) y generalmente son arcillosos.

Solonchak (Z) Suelos que presentan un alto contenido de sales en alguna parte o en todo el perfil.

Vertisol (V). Son suelos que se presentan en climas templados donde hay una marcada época de secas y lluvias.

Este sistema de clasificación tiene dos niveles jerárquicos que son la unidad y la subunidad. La primera se refiere a los grupos principales cuyas características distintivas son las más importantes (clima, desarrollo del suelo, material que lo formó) y se simboliza con una letra mayúscula. La subunidad se refiere a características menos relevantes pero de importancia para el manejo, como son el color

del suelo, presencia o acumulación de algún elemento químico, saturación con agua, endurecimiento, etc. y se simboliza con una letra minúscula (Tabla 1).

Los suelos del estado de Yucatán fueron clasificados por dicha nomenclatura, encontrándose: Cambisoles, Feozems, Fluvisoles, Gleysoles, Histosoles, Litosoles, Luvisoles, Rendzinas, Nitosoles, Castañozems, Regosoles y Solonchaks.

BASE REFERENCIAL MUNDIAL DEL RECURSO SUELO (WRB)

La WRB es sucesora de la Base Internacional para la clasificación del recurso suelo (IRB), la cual fue originalmente iniciada por la FAO, la sociedad internacional de la ciencia del suelo (SICS) y apoyada por las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP) en 1980. Este programa tenía como objetivo el de homogenizar un sistema de clasificación de los suelos para el intercambio de información en un lenguaje científico común, fortalecer la aplicación de la ciencia del suelo y reforzar la comunicación con otras disciplinas.

En 1982 se inició el proyecto para crear la Base Internacional de Referencia para la Clasificación del Recurso, la cual se diseñó para ser utilizada como base para revisar la leyenda del mapa de suelos del mundo de la FAO/UNESCO (1974).

En 1986 se creó un segundo grupo para revisar más detalladamente las definiciones de los grupos de los suelos y sus atributos de diagnóstico; ésto para establecer divisiones de tercer y cuarto nivel además de que se hiciera una correlación con las unidades de suelos existentes en los principales sistemas de clasificación de los suelos.

En 1988 la FAO publicó la Leyenda Revisada del Mapa Mundial de Suelos del Mundo teniendo un total de 28 agrupamientos de suelos y de 153 unidades, y se incluyeron cambios como la asociación de Litosoles, Rendzinas y Rankers en el grupo de Leptosoles; la división de

Tabla 1. Nomenclatura de los sistemas de clasificación.

INEGI	WRB	Soil Taxonomy
Unidad Subunidad	Grupo Unidad 1 ^{er} nivel 2 ^o nivel	Orden Suborden Gran grupo Subgrupo Familia Serie
Ejemplos		
Luvisol (L) crómico (c)	Luvisol (LV) crómico léptico	Alfisol (J) Ustalfs (JC) Haplustalfs (JCH)
Luvisol crómico (Lc)	Luvisol cromi-léptico (LVcr-le)	Typic Haplustalfs (JCHX)



Luvisoles en Luvisoles y Lixisoles; la separación de Acrisoles en Acrisoles y Alisoles, la eliminación de Xerosoles y Yermosoles y la introducción de Antrosoles, Plintosoles, Calcisoles y Gipsisoles. También se incluyeron nuevos criterios para definir los horizontes de diagnóstico.

En 1992 al hacer la revisión de la IRB y la leyenda revisada de la FAO se llega a la conclusión de que como los dos tenían el objetivo de realizar un mapa mundial de suelos 1:5 000 000 se debían de juntar para lograr un mejor impacto y la fusión de los dos esfuerzos adoptó el nombre de Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB). Los objetivos de la WRB son a) proporcionar profundidad y base científica a la Leyenda Revisada de FAO 1988, b) incorporar los últimos conocimientos relacionados con el recurso suelo, c) desarrollar un sistema internacional aceptable para delinear el recurso suelo y que se pueda vincular y relacionar con las clasificaciones nacionales, además de proporcionar una base científica que sirva en distintas áreas como son: la agricultura, la geología, la hidrología y la ecología.

El sistema de clasificación WRB adoptó la estructura básica de la leyenda FAO con sus dos niveles categóricos y directivas para desarrollar clases de un tercer nivel. El nivel categórico superior (grupo) se designa de acuerdo a procesos pedogenéticos primarios que han producido los rasgos característicos del suelo. Cada grupo de suelo está provisto de un listado de calificadores posibles en una secuencia priorizada, a partir de la cual se pueden construir varias unidades de nivel inferior. Los niveles categóricos inferiores (unidad de 1^{er} y 2^o nivel) se diferencian de acuerdo a cualquier proceso secundario formador de suelo predominante que haya afectado significativamente los rasgos principales del suelo.

La nomenclatura usada para distinguir grupos de suelos retiene algunos términos usados tradicionalmente. Estos términos están definidos con precisión para evitar confusión y consiste en dos letras mayúsculas ya establecidas para cada grupo de suelo. En el caso de las unidades de nivel inferior las letras son minúsculas, cuando el perfil tiene más de una unidad de nivel inferior se tiene que seguir el orden de prioridad ya establecido para cada grupo. La forma de usar la nomenclatura se observa en el Tabla 1.

El sistema de clasificación de suelos de la WRB cuenta con 30 grupos de suelos, de acuerdo con la correspondencia con la clasificación FAO, 1968 podemos decir que en el estado de Yucatán encontraremos:

Leptosol (LP). Suelos poco profundos de colores oscuros, están limitados por roca continua o un material con más de 40% de carbonato de calcio dentro de los primeros 25 cm de profundidad y no tienen otro horizonte de diagnóstico que no sea un horizonte mólico, ócrico, úmbrico, yémico o vértico.

Vertisol (VR). Suelos que tienen un horizonte vértico dentro de los primeros 100 cm de profundidad, contienen más del 30% de arcilla en todos sus horizontes, presentan grietas que se abren periódicamente y tienen contacto lítico o paralítico.

Solonchak (SC). Suelos que generalmente están sometidos a inundación alguna parte del año, estos suelos

presentan un horizonte sálico que se encuentra dentro de los primeros 50 cm de profundidad, sus horizontes de diagnóstico solamente pueden ser hístico, mólico, ócrico, takírico, yémico, cámbico, dúrico, gípsico o vértico.

Gleysol (GL). Suelos que tienen propiedades gléicas dentro de los primeros 50 cm de profundidad y no tienen otro horizonte de diagnóstico que no sean un horizonte antrácuico, ándico, cálcico, cámbico, gípsico, plíntico, vítrico, mólico, úmbrico, sálico, takírico, hístico, ócrico o sulfúrico.

Phaeozem (PH). Suelos que presentan un horizonte mólico y tienen saturación de bases mayor de 50%, hasta los 100 cm de profundidad no presentan carbonato de calcio a menos que presente una capa contrastante (contacto lítico o para lítico o un horizonte petrocálcico) entre los 25 y 100 cm sus horizontes de diagnóstico sólo pueden ser: álbico, árgico, cámbico, vértico o petrocálcico.

Calcisol (CL). Suelos que en los primeros 100 cm de profundidad tienen un horizonte cálcico o petrocálcico y no tienen otros horizontes de diagnóstico que no sean un horizonte ócrico o cámbico, un horizonte árgico calcáreo, uno vértico o un horizonte gípsico subyaciendo a un horizonte petrocálcico.

Luvisol (LV). Suelos que tienen un horizonte árgico el cual es resultado de la eluviación de la arcilla de los horizontes superiores, tienen capacidad de intercambio catiónico igual o mayor a 24 cm kg⁻¹ de arcilla en todo su espesor.

Lixisol (LX). son suelos que tienen un horizonte árgico.

Cambisol (CM). Suelos que tienen un horizonte cámbico o un horizonte mólico por encima de un suelo con saturación de bases menor al 50% dentro de los primeros 100 cm de profundidad, o bien, un horizonte ándico, vértico o vítrico dentro de 25 y 100 cm de profundidad ó un horizonte plíntico, petroplíntico o sálico que comienza entre los 40 y 100 cm de profundidad si no tiene textura arenoso franco más gruesa.

Arenosol (AR). Suelos que tienen una textura arenoso franca o más gruesa hasta una profundidad de 100 cm desde la superficie del suelo o hasta un horizonte plíntico, sálico o petroplíntico, en los primeros 100 cm de profundidad menos del 35% de fragmentos de roca u otros fragmentos gruesos. Solamente pueden presentar los siguientes horizontes de diagnóstico: ócrico, yémico, álbico; debajo de los 50 cm de profundidad un horizonte plíntico, petroplíntico o sálico y debajo de 200 cm de profundidad un horizonte árgico o spódico.

El sistema de clasificación de la WRB estableció que los grupos de suelos se definirán de acuerdo a una combinación específica de horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico. En el caso de los horizontes de diagnóstico, éstos deben alcanzar un grado de expresión mínimo que se determina por criterios de apariencia, mensurabilidad, importancia, relevancia y cuantitativos, también requieren de un espesor mínimo relacionado con factores bioclimáticos.

La WRB utiliza como base los horizontes de diagnóstico de la leyenda revisada (FAO, 1988); igualmente usa las



propiedades de diagnóstico relevantes para agrupar a los suelos en las unidades relatadas en el párrafo anterior y que reflejan rasgos específicos del suelo, no se refieren a un horizonte de diagnóstico pero son de importancia para la identificación del nivel categórico superior (grupo) y son características importantes para propósitos de manejo.

Para mantener el sistema simple y fácil de usar, se seleccionaron los criterios para diferenciar unidades y subunidades de suelo estrechamente relacionados con los criterios de diagnóstico definidos en el primer nivel y se relacionan con propiedades de los suelos adicionales que son relevantes, el nivel inferior se designa con base a reglas de prioridad establecidas en cada grupo de suelo; y sólo será posible un número limitado de combinaciones, ya que la mayoría de las definiciones son mutuamente excluyentes.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN *Soil Taxonomy* (ST)

Esta clasificación tiene como objetivo principal establecer jerarquías de clases que permitan el fácil entendimiento entre los suelos y los factores que originan sus características. Un segundo objetivo es establecer un medio de comunicación para las disciplinas de la ciencia del suelo. La clasificación de suelos (ST) agrupa a los suelos de acuerdo a las limitaciones que presentan para un propósito de manejo específico. La ST se basa en la división entre los suelos minerales y los orgánicos. También a diferencia de la base referencial del recurso suelo (WRB) toma como parte importante los regímenes de temperatura y humedad del suelo como factores importantes en el manejo del mismo.

El sistema de clasificación ST establece 7 jerarquías de clasificación, como se aprecia en el Tabla 2.

Los órdenes de suelo que podemos encontrar en el estado, de acuerdo a las características climáticas, de profundidad, pedregosidad, materia orgánica, CIC; son las siguientes:

Vertisol (F). Son suelos que tienen una capa de 25 cm o más de espesor, con un límite superior dentro de los primeros 100 cm de la superficie del suelo mineral, presentan caras de fricción (slikensides) o agregados en forma de cuña, un promedio de 30% más de arcilla y grietas que se abren y cierran periódicamente.

Aridisol (G). Son suelos donde el agua no está disponible para las plantas por periodos largos; el régimen de temperatura del suelo es árido.

Mólisol (I). Los Molisoles son suelos generalmente oscuros, ricos en bases y materia orgánica, que no son masivos ni duros cuando están secos y presentan una estructura granular fuertemente desarrollada. La mayoría de estos suelos presentan un epipedón mólico (no todos los suelos que presentan este tipo de epipedón son molisoles) pero también algunos presentan un horizonte argílico, nátrico o cálcico, pocos tienen un horizonte álbico, algunos tienen duripán o un horizonte petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999).

Alfisol (J). Suelos que tienen un horizonte argílico o kándico.

Inceptisol (K). Suelos con meteorización incipiente, inmaduros que tienen factores más débilmente expresados que los suelos maduros, se encuentran en superficies geomórficas jóvenes y tienen gran parecido al material parental.

Entisol (L). Son los otros suelos que no llenan los requisitos para clasificarlos en algunos de los ordenes anteriormente mencionados.

El sistema ST para hacer el estudio del suelo utiliza un pequeño volumen de suelo (sección transversal de 1 a 10 cm²) como unidad básica denomina pedón, y su magnitud es suficiente para el estudio de horizontes e interrelaciones dentro del perfil. Los epipedones son horizontes de diagnóstico superficiales, en donde la estructura de la roca ha sido destruida, además se presenta acumulación de materia orgánica.

Tabla 2. Jerarquías del sistema *Soil Taxonomy* (Según Soil Survey Staff, 1999)

Categorías	Naturaleza de las características diferenciadoras
Orden	Procesos de formación de suelos, indicados por la presencia o ausencia de horizontes de diagnóstico.
Suborden	Homogeneidad genética. Es una subdivisión del orden de acuerdo con la presencia o ausencia de propiedades asociadas con humedad, regímenes de humedad del suelo, material parental y efectos de la vegetación, Textura extremas.
Gran grupo	Subdivisiones de los subordenes de acuerdo con el grado de similitud en el arreglo y expresión de los horizontes con énfasis en la parte superficial, o también por regímenes de temperatura y humedad del suelo, y por la presencia o ausencia de las características macropedológicas (Plintita, Fragipán, Duripán....).
Subgrupo	Clases que expresan el concepto central del grupo o transiciones a otros grupos, subordenes o degradaciones a "no suelos".
Familia	Propiedades importantes para el crecimiento de las plantas; clases texturales, pH, permeabilidad, espesor de horizontes, consistencia, pendiente, grietas, revestimientos, promedio de todo el perfil; mineralogía dominante y temperatura media anual del suelo a 50 cm de profundidad.
Serie	Clases y arreglo de los horizontes morfológicos (A, B, C, R); color, textura estructura consistencia y reacción de los horizontes: propiedades químicas y mineralógicas de los horizontes.



ÁREA DE ESTUDIO

El estado de Yucatán está ubicado geográficamente en el cinturón intertropical mundial por lo cual está sujeto a las condiciones climáticas propias de esta zona (vientos alisios, nortes, ciclones, etc.). Está localizada entre los paralelos 19° 40' y 21° 37' latitud norte y los meridianos 87° 30' y 90° 26' latitud oeste; sus límites son: al norte con el Golfo de México, al sureste el estado de Campeche y hacia el este y sureste con el estado de Quintana Roo. El área que ocupa el estado de Yucatán es de 3 934 000 ha (Fig. 1) (Duch, 1988, 1991).

CLIMA Y VEGETACIÓN

Según el sistema de Köppen modificado por García (1989), el clima que predomina en el estado de Yucatán es el de tipo Aw que es caliente subhúmedo con lluvias en verano, encontramos los siguientes subtipos: el Aw₀ (el más representativo del estado de Yucatán), llamado cálido subhúmedo con lluvias en verano y marcada sequía en la mitad caliente del año (canícula). Otro subtipo que se encuentra es el clima cálido subhúmedo intermedio (Aw₁), y el subtipo del clima Aw₂, que es el más húmedo de los tres hacia el sur cubriendo el vértice del cono sur del estado de Yucatán.

La vegetación del estado de Yucatán es tropical sin elementos boreales y se caracteriza por tener vegetación de litoral costero, selva baja caducifolia, selva baja caducifolia espinosa, selva baja perennifolia, mediana subcaducifolia y mediana subperennifolia (Flores y Espejel-Carvajal, 1994).

GEOLOGÍA

El estado de Yucatán geológicamente es la parte más joven de la Península de Yucatán, el sustrato geológico encontrado en el estado de Yucatán es relativamente uniforme, y esta compuesto de carbonato de calcio o magnesio en un 90%. Corresponde a una plataforma, o sea, un conjunto de capas de rocas sedimentarias, con un grosor de más de 3500 m que descansan sobre un basamento paleozoico. La base del paquete sedimentario es de rocas jurásicas y por encima de éstas se encuentran rocas del cretácico, mismas que constituyen la mayor parte de la estructura profunda; las rocas paleogénicas se encuentran en todo el subsuelo y consisten principalmente en calizas, areniscas, evaporitas del paleoceno y eoceno (López-Ramos, 1975).

La constitución geológica de la superficie del estado de Yucatán en su totalidad de rocas sedimentarias marinas-calizas y derivadas de éstas. Los estratos más antiguos corresponden a la serie Paleoceno-Eoceno, consistentes en calizas que forman la sierra de Ticul y localidades contiguas. Más joven es la formación Chichén Itzá, del Eoceno. Del Mioceno y Plioceno (Neógeno) son

rocas calizas, con amplia disposición en la porción septentrional.

Las calizas en la superficie se encuentran formando una coraza calcárea o reblandecidas. La coraza calcárea es de extrema dureza y constituye la superficie del relieve en grandes territorios; es conocida con los nombres comunes de *laja* o *chaltún* (Lugo, 1999).

Las calizas blandas tienen el nombre maya de *sahcab* (tierra blanca). De acuerdo con Duch (1991) es un rasgo fisiográfico característico del relieve de toda la península de Yucatán y representa una transición de la evolución de la roca dura original, el reblandecimiento y posteriormente se transforma en la coraza calcárea; además, favorece el desarrollo de las formas cársticas subterráneas. En cuanto a la relación relieve-estructura geológica, se reconoce que en las zonas de relieve más elevado, las capas cretácicas están a menor profundidad, del orden de 500 m, mientras que hacia las tierras bajas del norte los valores aumentan a 1000-1500 m.

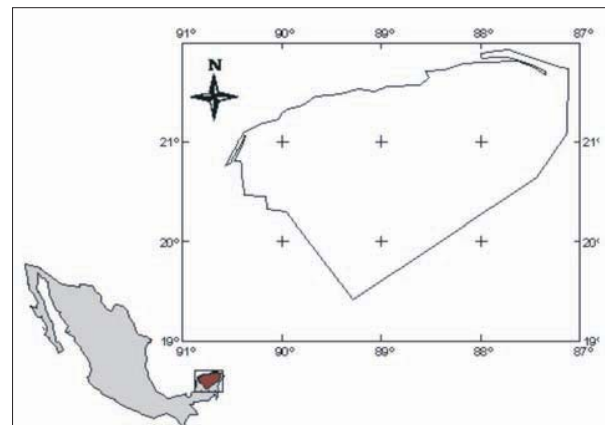


Figura 1. Localización del área de estudio

GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es el estudio de las formas de la superficie terrestre por medio de su génesis y evolución a través del tiempo geológico (Villota, 1991). De los tres grupos mayores del sistema geomorfológico que se encuentran en la Península de Yucatán dos están representados en el estado de Yucatán, cada una difiere en la morfología, la edad, el origen la constitución litológica, la estructura geológica y otros factores (Palacio y Ortiz, 2003; Bautista-Zúñiga *et al*, 2002).

I. Sistema litoral. Se sitúa en el borde extremo continental, es una cuenca marginal entre el océano y el continente y recibe sedimentos de la porción continental y del ambiente marino; los paisajes geomorfológicos que se encuentran en el estado de Yucatán son: planicie de cordones litorales líticos y arenosos, isla barrera, planicie palustre de petenes chicos con forma de gota, planicie palustre costera de inundación marina y bajos intermareales, según se ve en la Figura 3.

II. Sistema carso-tectónico. Este sistema es el más representativo de la península de Yucatán. El relieve es considerado tipo karst de mesa con predominio de estructuras tabulares monoclinales y se organiza en una serie de planicies estructurales a diferentes niveles altitudinales y se divide en sistema carso-tectónico reciente que tiene los el paisajes de planicie estructural baja denudativa y que ocupa cerca del 40% del área del estado de Yucatán, y dolinas agrupadas (inundadas – cenotes). El sistema carso-tectónico joven que en el estado de Yucatán se encuentra representada el paisaje geomorfológico de planicie estructural ondulada con erosión y denudación. El sistema carso tectónico maduro tiene los paisajes: pliegue bloque con cúpulas alineadas, pliegue bloque con cimas en cúpulas y planicie confinada, planicie estructural ondulada denudativa de transición entre lomeríos y planicies y planicie estructural ondulada de transición entre pliegues bloque. El sistema carso-tectónico tardío esta representado en el estado de Yucatán por los paisajes geomorfológicos: lomeríos de elevaciones bajas < 200 msnm y planicies interiores.

La geomorfología de toda la Península de Yucatán se trata ampliamente en el capítulo dos.

USO DE SUELO

Este concepto se refiere al aprovechamiento y ocupación actual que el hombre realiza sobre el terreno con la finalidad de procurarse mediante la explotación de los componentes ambientales, mantener una determinada masa forestal, una rotación de cultivos unos usos paisajís-

ticos, obtener productos que le permitan asegurar su supervivencia (Salas-Vargas, 1999). En el estado de Yucatán se reporta nueve diferentes usos de suelos son: agrícola, ganadero, silvícola, minero, pesquero, turístico, conservacionista, urbano y vial.

Las características en el uso del suelo y el grado de transformación ambiental que muestra la Península de Yucatán, son causadas por las actividades económicas, políticas y socioculturales de gran dinamismo y arraigo que la impactan, mismos que han contribuido a generar los procesos territoriales muy particulares de la región.

En las últimas décadas la agricultura creció un 300%, en especial la henequenera, esto dio lugar a que grandes extensiones de selva bajas caducifolias fueran tumbadas para uso silvícola, además la superficie dedicada a los pastizales aumentó desplazando áreas de selva o bien mezclándose con ellas, el aumento desde 1970 a 1995 fue del 132.2%. La ganadería se expandió, consolidando la producción porcina y avícola, y extendiendo la ganadería vacuna.

La silvicultura industrial disminuyó en importancia debido a la deficiente planeación y a que se baso en el uso casi exclusivo de la caoba y el cedro rojo. La explotación minera aumento un 30% en el estado, se han propiciado el desarrollo de redes viales y de zonas urbanas en su derredor, de tal modo que el pavimento y la contaminación desplazan y alteran de manera cada vez más significativa a la vegetación y los suelos (Salas-Vargas, 1999).

La avicultura ocupa aproximadamente 5000 ha con un promedio de cabezas de 116-3500 por ha. La porcicultura ocupa un promedio de 5000 ha en el estado y con una población de 254 cabezas por ha.

MATERIALES Y MÉTODOS

La actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán se realizó mediante el análisis de la cartografía existente: mapas edafológicos (INEGI, 1984), mapas geomorfológico (Palacio y Ortiz, 2003), mapa de clima (Orellana *et al*, 1999), verificación en campo de algunas de las unidades reportadas. Una vez revisada la cartografía se clasifico según la WRB (1999) y la *Soil Taxonomy* (1999). La figura 2 representa el flujo de actividades realizadas para la actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN PREVIA

El presente trabajo tomó como material de estudio la cartografía de suelo 1:250 000 realizada por INEGI (1984), la cual se encuentra en la categoría de estudios de inventario. Las cartas edafológicas que comprenden dicha cartografía son: F16-7 Tizimin, F15-9-12 Calkiní, F16-10 Mérida, F16-8 Cancún, E16-1 Felipe Carrillo Puerto y F16-11 Cozumel. Los perfiles utilizados en la actualización

fueron los que contaban con datos analíticos y de campo. Esto es, porque esta información es requerida en las claves de clasificación. También se revisaron y analizaron el mapa de climas del estado de Yucatán 1:250 000 (Orellana *et al*, 1999) y el mapa geomorfológico 1:250 000 (Palacio y Ortiz, 2003).

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

El criterio que se siguió para hacer las verificaciones en campo fue al azar. La verificación se llevó a cabo mediante recorridos en donde se hicieron verificaciones mediante barrenaciones en los suelos o aperturas de calicatas. En este último caso se procedió a la descripción completa del perfil.

Al norte del estado en el litoral (Uaymitun) se hizo 1 perfil, al noreste en Dzilam, González se describió 1 perfil, en el centro del estado se realizó 1 barrenación, al oriente del estado (zona ganadera) se describieron 4 perfiles, al



sur del estado se realizaron verificaciones en Maní (2 perfiles) y Tzucacab (5 perfiles).

La actualización de la clasificación de los 142 perfiles de suelo encontrados se realizó de acuerdo a lo establecido en la clasificación WRB (1999) realizada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (SICS) y el Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC). En forma adicional se clasificó según lo estipulado para la clasificación de suelos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) *Soil Taxonomy* (1999).

Los datos de campo y de análisis de laboratorio se ordenaron y caracterizaron para llevarlos a un formato de clasificación, en el cual se hizo una descripción del perfil. Para poder hacer esta descripción se realizó una estimación de datos cualitativos (Carbonatos y profundidad) a datos cuantitativos con base en lo indicado en el manual de descripciones de perfiles (Siebe, 1996), también se realizó una evaluación de color, %MO y pH de acuerdo a lo indicado por Siebe (1996). El formato de clasificación incluye una tabla donde se ingresaron los datos analíticos de cada perfil; la nomenclatura de los horizontes y de textura se actualizaron, el primero de acuerdo a *Soil Classification Staff*, (1996); y el segundo según la clasificación textural del manual de Siebe, (1996); también se actualizaron las unidades de medición al sistema Internacional.

CLASIFICACIÓN WRB

Para la actualización según el sistema WRB, con los datos de campo y laboratorio de los perfiles; y con apoyo del mapa geomorfológico 1:250000 (Palacio y Ortiz, 2003), determinamos el nivel categórico superior (grupo) al que pertenece el perfil, posteriormente se establecieron los niveles categóricos inferiores (unidad de 1^{er} y 2^o nivel) de acuerdo a los procesos formadores secundarios de los suelos, que haya ha fectado significativamente los rasgos primarios del suelo. Cada grupo de suelo de referencia de la WRB está provisto de un listado de calificadores posibles en una secuencia priorizada, a partir de la cual se construyeron las unidades de nivel inferior.

CLASIFICACIÓN *Soil Taxonomy* (ST)

Para la clasificación según *ST* se identificaron los horizontes de diagnóstico (epipedones y/o horizontes subsuperficiales) para determinar el orden (categoría mayor). Después con las características de diagnóstico se estableció la categoría de suborden. La categoría de gran grupo se determinó tomando en cuenta todo el horizonte y su naturaleza, así como los regímenes de humedad y temperatura del suelo. Por último se estableció la categoría de subgrupo; para ésto utilizamos los factores formadores secundarios del suelo ya mencionados.

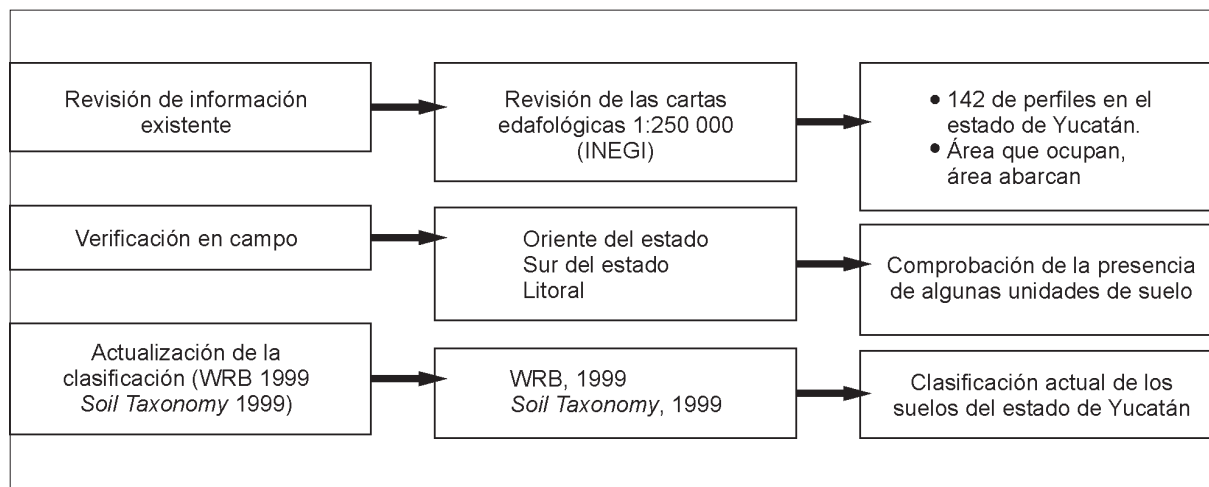


Figura 2. Diagrama de flujo de las actividades.

RESULTADOS

De las seis cartas edafológicas 1:250 000 que se revisaron se obtuvo la siguiente información: Las seis cartas edafológicas que conforman el estado de Yucatán tienen un total de 462 perfiles. De éstos 142 tienen descripción de

campo y análisis de laboratorio como se puede ver en el 3. El número de perfiles por carta edafológica se muestra en el 6. La tasa de observación de perfiles de suelo es de 3×10^{-2} perfiles por km^2 .



La actualización de las cartas edafológicas con la clasificación WRB (1999) y *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1999), dio como resultado el poder diferenciar los suelos en una amplia variedad de unidades de 1^{er} y 2^o nivel (WRB) y subgrupos (*Soil Taxonomy*).

CARTA EDAFOLÓGICA CALKINÍ F15-9-12

La actualización de los suelos de esta carta dio como resultado que los suelos que INEGI (1984c) clasificara como Rendzinas, en el sistema WRB correspondieron a Leptosoles réndzicos, Calcisol epiléptico y Solonchak cálcico, en el sistema *Soil Taxonomy* estos mismos suelos se clasificaron como Lithic Calciustolls, Lithic Haplustolls, Lithic Haplustepts y Typic aquisalids; con la actualización de la clasificación se pudo distinguir propiedades importantes en estos suelos, en ambos sistemas de clasificación como son la profundidad efectiva de los suelos los contenidos altos de carbonatos en algunos; concentraciones altas de sales, etc.

Los suelos clasificados como Regosol calcárico (INEGI, 1984c) la actualización dio como resultado para el sistema WRB; Leptosol calcárico y Cambisol sodi-epiléptico; para el sistema *Soil Taxonomy*, Lithic Ustictorriorthents, Lithic Haplustepts, y Lithic Calciustepts. En los dos sistemas de clasificación se obtuvo mayor claridad en las propiedades de los suelos; sin embargo en este caso el sistema ST proporciona más detalles sobre las particularidades de los suelos con propiedades calcáricas.

Los Luvisoles crómicos (INEGI, 1984c) al actualizarse al sistema WRB se obtuvo Luvisol rodi-léptico, Luvisol rodi-epiléptico y Cambisol rodi-léptico, en el sistema ST tuvimos Typic Rhodustalfs, Lithic Rhodustalfs y Typic Haplustepts. En este caso al actualizar la clasificación de los suelos podemos diferenciar claramente los suelos que tienen horizontes de eluviación de arcilla, que son de colores rojos brillantes y además la profundidad de estos suelos; de los suelos que tienen horizontes argílicos pero que no es debido a eluviación de arcilla; para estos grupos de suelos los dos sistemas de clasificación son ampliamente eficaces.

La unidad de suelo clasificada por el INEGI como Histosol éutrico, no presenta los requerimientos necesarios para ser un Histosol y por que predominan las características gléyicas, al actualizar la clasificación; en el sistema WRB se clasificó como Gleysol calcari-hístico y en el sistema ST como Histic Humaquepts.

La unidad de suelo Cambisol crómico (INEGI, 1984c) en el sistema WRB se actualizó como Calcisol epiléptico y en sistema ST como Lithic Haplustepts, para las particularidades que muestra estos suelos es sistema ST no tiene suficiente especificidad en las descripciones de los subgrupos para poder diferenciar la presencia de carbonatos en el perfil.

CARTA EDAFOLÓGICA CANCÚN F16-8

En esta carta se observó para el sistema WRB cinco grupos de suelos que contienen 5 unidades de primer nivel y 3 unidades de segundo nivel de suelo y para el sistema *Soil Taxonomy* (ST) cuatro ordenes que comprenden cinco subgrupos (Tabla A2)

Al actualizar la clasificación de las Rendzinas (INEGI, 1984d) en el sistema WRB obtuvimos las unidades Leptosol réndzico y Calciso1 epipétrico; en el sistema ST estos correspondieron los primeros al subgrupo Lithic Haplustolls y los segundos al subgrupo Lithic Petrocalcic Calciustolls; con la actualización de la clasificación se pudo distinguir propiedades importantes en estos suelos, en ambos sistemas de clasificación como son la profundidad efectiva de los suelos los contenidos altos de carbonatos en algunos; presencia de horizontes de acumulación de carbonatos de calcio cementados.

La actualización de los suelos clasificados por el INEGI (1984d) como Regosol calcárico dio como resultado para el sistema WRB; Arenosol calcari-álbico; en el sistema ST el subgrupo Typic Ustisamments. En los dos sistemas de clasificación se obtuvo mayor claridad en las propiedades de los suelos; sin embargo en este caso el sistema WRB proporciona más detalles sobre las particularidades de los suelos Arenosoles.

Tabla 3. Número de perfiles por carta edafológica

Cartas	Región	No. de perfiles	
		Campo	Laboratorio
F16-7	Tizimin	74	58
F15-9-12	Calkiní	65	15
F16-8	Cancún	62	13
F16-11	Cozumel	61	7
F16-10	Mérida	100	37
F16-1	Felipe Carrillo Puerto (FCP)	100	12
	Total	462	142



Los Luvisoles crómicos (INEGI, 1984c) al actualizarse al sistema WRB se obtuvo Luvisol cromi-léptico, Luvisol léptico y Cambisol crómico, en el sistema ST tuvimos Typic Haplustalfs y Typic Haplustepts. En este caso al actualizar la clasificación de los suelos podemos diferenciar claramente los suelos que tienen horizontes de eluviación de arcilla, que son de colores rojos brillantes y además la profundidad de estos suelos; de los suelos que tienen horizontes argílicos pero que no es debido a eluviación de arcilla; para estos grupos de suelos los dos sistemas de clasificación son ampliamente eficaces.

Al actualizar la clasificación de la unidad de suelo clasificada por el INEGI como Vertisol pélico, se llegó a la conclusión que por las características que presenta (alta conductividad eléctrica, desarrollo incipiente de los horizontes, falta de presencia de grietas y caras de deslizamiento, cantidades muy pobres de arcilla, entre otras cosas), se trata de un Cambisol sódico para el sistema WRB y Typic Haplustepts para el sistema ST. En este caso el sistema de clasificación ST al nivel de subgrupo no contempla las características sódicas para los inceptisoles; por lo que para suelos con estas características el sistema WRB es el más adecuado.

La clasificación actualizada de la unidad de suelo unidad de suelo Cambisol crómico (INEGI, 1984d) para el sistema WRB es Cambisol rodi-léptico y para el sistema ST Typic Haplustepts.

CARTA EDAFOLÓGICA TIZIMÍN F16-7

La actualización de la carta Tizimín que la actualización de la clasificación de los suelos de la carta Tizimín. En esta carta encontramos nueve unidades de primer nivel y dos unidades de segundo nivel para el sistema de clasificación WRB y 11 subgrupos en la clasificación *Soil Taxonomy* (Tabla A3).

Al actualizar la clasificación de las Rendzinas (INEGI, 1984f) en el sistema WRB obtuvimos las unidades Leptosol réndzico, Calcisol epipéptico y Cambisol epilepti-mólico; en el sistema ST estos correspondieron a los subgrupos Lithic Haplustolls y Lithic Petrocalcic Calciustolls; con la actualización de la clasificación se pudo distinguir propiedades importantes en estos suelos, sin embargo en el sistema ST dos diferentes tipos de suelos se incluyeron en un subgrupo porque no se pudo hacer a nivel de subgrupo una división más precisa. A pesar de esto la actualización de la clasificación de los suelos muestra más detalladamente características propias de los suelos.

La actualización de los suelos clasificados por el INEGI (1984f) como Regosol calcárico dio como resultado para el sistema WRB; Arenosol calcárico y Arenosol prótico; en el sistema ST al subgrupo Typic Ustisamments. En los dos sistemas de clasificación se obtuvo mayor claridad en las propiedades de los suelos; sin embargo en este caso el sistema WRB proporciona más detalles sobre las particularidades de los suelos Arenosos.

Los suelos clasificados por el INEGI (1984f) como Solonchak órtico al actualizar la clasificación con el sistema WRB cambiaron a Solonchak hipersálico, y en el sistema

ST a Typic Halaquepts. Los suelos clasificados por el INEGI (1984f) como Solonchak mólico al actualizar la clasificación con el sistema WRB cambiaron a Gleysol epialcalárico; y en el sistema ST a Typic Halaquepts. Los suelos clasificados por el INEGI (1984f) como Solonchak gléptico al actualizar la clasificación con el sistema WRB cambiaron a Solonchak epigléptico y en el sistema ST a Typic Aquisalids. El sistema de clasificación ST a nivel de subgrupo para los suelos del estado de Yucatán no presenta las suficientes características para hacer una clasificación más concreta.

Los Luvisoles crómicos (INEGI, 1984f) al actualizarse al sistema WRB se obtuvo Cambisol crómico y Cambisol ródico, en el sistema ST el subgrupo Typic Haplustepts. En este caso al actualizar la clasificación de los suelos se observó que los horizontes de estos suelos son cámbicos y que no cumplen con las características para ser horizontes de eluviación de arcilla.

CARTA EDAFOLÓGICA COZUMEL F16-11

Los suelos actualizados en esta carta en el sistema WRB fueron tres unidades de primer nivel y 1 unidad de segundo nivel. Y para el sistema de clasificación *Soil Taxonomy* 4 subgrupos (A4).

Al actualizar la clasificación de las Rendzinas (INEGI, 1984e) en el sistema WRB obtuvimos las unidades Leptosol réndzico y Calcisol epipéptico; en el sistema ST estos correspondieron los primeros al subgrupo Lithic Haplustolls y los segundos al subgrupo Lithic Petrocalcic Calciustolls; con la actualización de la clasificación se pudo distinguir propiedades importantes en estos suelos, en ambos sistemas de clasificación como son la profundidad efectiva de los suelos los contenidos altos de carbonatos en algunos; presencia de horizontes de acumulación de carbonatos de calcio cementados.

La clasificación actualizada de la unidad de suelo unidad de suelo Cambisol crómico (INEGI, 1984e) para el sistema WRB es Calcisol epipéptico y Calcisol endopéptico y para el sistema ST es Lithic petrocalcic Calciustolls y Petrocalcic Calciustepts respectivamente.

CARTA EDAFOLÓGICA FELIPE CARRILLO PUERTO

La actualización de los suelos de esta carta con el sistema de clasificación WRB fue de 4 unidades de primer nivel y 1 unidad de segundo nivel y para el sistema de clasificación ST de cinco subgrupos (Tabla A5).

Al actualizar la clasificación de las Rendzinas (INEGI, 1984b) en el sistema WRB obtuvimos las unidades Leptosol réndzico y Calcisol epipéptico; en el sistema ST estos correspondieron los primeros al subgrupo Lithic Haplustolls y los segundos al subgrupo Lithic Petrocalcic Calciustolls; con la actualización de la clasificación se pudo distinguir propiedades importantes en estos suelos, en ambos sistemas de clasificación como son la profundidad

efectiva de los suelos los contenidos altos de carbonatos en algunos; presencia de horizontes de acumulación de carbonatos de calcio cementados.

La actualización de los suelos clasificados por el INEGI (1984b) como Nitosol éútrico en el sistema WRB se clasificaron como Lixisol róxico; y en el sistema ST en el subgrupo Kanhaplic Rhodustalfs. En los dos sistemas de clasificación se obtuvo mayor claridad en las propiedades de los suelos.

Al actualizar la clasificación de la unidad de suelo clasificada por el INEGI como Vertisol pélico en el sistema WRB tenemos dos unidades de suelos el Vertisol mazi-éútrico y Cambisol vértico; y en el sistema ST los subgrupos Leptic Haplusterts y Vertic Haplusterts respectivamente. En estos casos el sistema de clasificación ST no a nivel de subgrupo no contempla características como dureza del perfil entre las características que maneja.

CARTA EDAFOLÓGICA MÉRIDA F16-10

En la actualización de la carta edafológica Mérida encontramos para el sistema de clasificación *Soil Taxonomy* 11 subgrupos y para el sistema de clasificación WRB 9 unidades de primer nivel y 9 unidades de segundo nivel (Tabla A6).

Al actualizar la clasificación de las Rendzinas (INEGI, 1984a) en el sistema WRB obtuvimos las unidades Leptosol réndzico y Phaeozems epiléptico; en el sistema ST estos correspondieron al subgrupo Lithic Haplustolls; con la actualización de la clasificación se pudo distinguir propiedades importantes en estos suelos, en ambos sistemas de clasificación como son la profundidad efectiva de los suelos los contenidos altos de carbonatos en algunos.

Los Luvisoles crómicos (INEGI, 1984a) al actualizarse al sistema WRB se obtuvo Luvisol rodi-léptico, Luvisol ró-

dico, Calcisol endopétrico, Calcisol epipétrico y Lixisol róxico, en el sistema ST tuvimos Typic Rodustalfs, Lithic Petrocalcic Calciustolls, Petrocalcic Calciustepts y Kanhaplic Rodustalfs. En este caso al actualizar la clasificación de los suelos podemos diferenciar claramente los suelos que tienen horizontes de eluviación de arcilla, que son de colores rojos brillantes y además la profundidad de estos suelos; de los suelos que tienen horizontes argílicos pero que no es debido a eluviación de arcilla; para estos grupos de suelos los dos sistemas de clasificación son ampliamente eficaces.

Los suelos clasificados por el INEGI (1984a) como Cambisol crómico, al actualizar la clasificación con el sistema WRB cambiaron a Cambisol cromi-epiléptico, Luvisol róxico, Calcisol epipétrico, Calcisol petri-lúxico y Cambisol éútrico; y en el sistema ST a Lithic Haplustepts, Typic Rodustalfs, Lithic Petrocalcic Calciustolls, Lithic Rodustalfs y Typic Haplustepts. Los suelos clasificados por el INEGI (1984a) como Cambisol cálcrico, al actualizar la clasificación con el sistema WRB cambiaron a Luvisol calci-epiléptico y Cambisol calcari-léptico; y en el sistema ST a Lithic Haplustalfs, Typic Calciustepts. El sistema de clasificación ST a nivel de subgrupo para los suelos del estado de Yucatán no presenta las suficientes características para hacer una clasificación más concreta.

Al actualizar la clasificación de la unidad de suelo clasificada por el INEGI como Vertisol pélico, se llegó a la conclusión que por las características que presenta (alta conductividad eléctrica, desarrollo incipiente de los horizontes, falta de presencia de grietas y caras de deslizamiento, cantidades muy pobres de arcilla, entre otras cosas), se trata de un Cambisol sódico para el sistema WRB y Typic Haplustepts para el sistema ST. En este caso el sistema de clasificación ST al nivel de subgrupo no contempla las características sódicas para los inceptisoles; por lo que para suelos con estas características el sistema WRB es el más adecuado.

DISCUSIÓN

EL uso de un sistema antiguo de clasificación nos lleva a imprecisiones en el momento de designar nombres a los suelos, esto trae como consecuencia el no saber con exactitud con que recurso se cuenta; la transferencia de tecnología no siempre es exitosa, los usuarios de las tierras no utilizan la información técnica disponible; estos problemas ocasionan otros y todo se refleja en el uso inadecuado de los suelos.

EL actual sistema de clasificación con que cuenta el país tiene impresiones graves sobretudo en suelos que se encuentran en zonas de Karts como es el estado de Yucatán; ejemplo de esto es la unidad Rendzina, la cual engloba entre sus propiedades a todos los suelos menores de 50 cm que se encuentran sobre roca calcárea o que tengan un alto contenido de carbonatos en el perfil, estas características no son suficientes para separar unidades de

suelo sobre todo por que en el estado de Yucatán se suelos que tienen cantidades muy altas de carbonatos, de piedras, de rocas y que tienen horizontes pretrocálcicos, lo que hace que el manejo de los suelos deba de ser diferente.

Estas características son tomadas en cuenta en el sistema de clasificación WRB, el cual maneja un concepto de suelos poco profundos con altos contenidos de CaCO_3 ya sea en el perfil o formando parte del material parental, estos son los Leptosoles; En el sistema ST encontramos un orden similar en cuanto a contenido de materia orgánica, pero que presenta poca precisión en cuanto a profundidad porque la mínima profundidad que toma en cuenta son 50 cm lo cual nos hace que agrupemos una gran cantidad de suelos con características de piedras, rocas y profundidades muy variables.



Una de los aportes más importantes de I sistema de clasificación WRB es la aparición del grupo de suelos Calcisol; es un grupo que tiene acumulación de carbonatos ya sea en forma difusa o cementada y es la primera vez que se reportan estos suelos, en el estado de Yucatán estos suelos son importantes debido a la naturaleza del material parental; el sistema de clasificación INEGI agrupa a los Calcisoles dentro de la unidad rendzina, Cambisoles, Castañosem y Luvisol. El sistema de clasificación *Soil Taxonomy* incluye a estos suelos dentro del orden *Mollisol* en el subgrupo *Lithic Petrocalcic Calciustolls* y en el orden *Inceptisol* en los subgrupos *Petrocalcic Calciustepts*, *Typic Calciustept*.

En el caso del grupo Cambisol la WRB hace una separación muy estricta de suelos con un desarrollo genético y morfológico incipiente, estos suelos son mayores de 30 cm de profundidad; a diferencia del sistema INEGI que considera la mínima profundidad 50 cm; en algunos casos reúne dentro de este mismo grupo a suelos que tienen una acumulación considerable de arcillas, a suelos que tienen un horizonte petrocálcico o suelos genéticamente más desarrollados. El sistema *Soil Taxonomy* pone a los Cambisoles dentro del orden *Inceptisol* en el subgrupo *Typic Haplustepts*, por lo que para este grupo este sistema no es de mucha utilidad.

El grupo Luvisol (WRB) esta ampliamente distribuido por el estado de Yucatán son suelos rojos con acumulación de arcilla iluvial, estos suelos en la clasificación INEGI se encontraban dentro de los Cambisoles, Luvisoles y Nitosoles y no especifica el porcentaje de arcilla mínimo que se requiere para pertenecer a este grupo. En la *Soil Taxonomy* este grupo se encuentra dentro del orden *Alfisols* en los subgrupos *Typic Rhodustalfs*, *Lithic Rhodustalf*, *Typic Haplustalfs*; La formación para estos suelos es igual pero que tienen características particulares diferentes.

Los Arenosoles (WRB) son otro de los grupos que se reportan por primera vez y son suelos con porcentajes altos de arenas anteriormente estos se llamaban Regosoles (INEGI, 1984) los cuales no tenían una característica parti-

cular; en la *Soil Taxonomy* este grupo se encuentra dentro de los suelos de desarrollo incipiente y con poca diferenciación en sus horizontes y se reporta el orden *Entisols* subgrupo *Typic Ustipsamments*; Este subgrupo es suficiente para señalar los Arenosoles del estado. Estos son suelos que encontramos en la parte litoral del estado.

Los suelos que pertenecen al grupo Solonchak (WRB) son suelos salinos, que se encuentran sobre el manto freático; en la clasificación INEGI se incluyeron dentro de este grupo suelos que limitaban con roca (*Leptosol cálcico*); El sistema *Soil Taxonomy* agrupa estos suelos dentro de los ordenes *Aridisols* subgrupo *Typic Aquisalids* y el orden *Entisols* subgrupo *Typic Halaquepts*; por lo que para este grupo este sistema si identifica las características importantes en la diferenciación de los suelos.

El sistema de clasificación INEGI reporta 18 unidades de suelo para el estado de Yucatán, muy por debajo de la WRB que identifica 36 unidades de suelo y con la *Soil Taxonomy* 22 subgrupos de suelo.

La formación de los suelos y los procesos que los originaron se ven reflejados en el perfil, el estudio de los perfiles nos dan un panorama fiel y confiable de la formación de los suelos, esto nos permite conocer y entender las relaciones que existen ente los suelos y el entorno, para poder predecir el comportamiento y evolución de estos, además del manejo y aptitud para mantener determinados cultivos, así como también la capacidad que tienen para soportar infraestructura de cualquier índole; estos conocimientos se pueden deducir en los sistemas de clasificación, siempre y cuando estos sistemas estén a la vanguardia y tengan el suficiente detalle en la separación de las características principales de los suelos.

Cada taxa de un sistema de clasificación refleja características importantes, tanto de evolución como de manejo, es por eso que con un sistema de clasificación bien estructurado y con el suficiente detalle se puede inferir la calidad y aptitud del suelo, logrando un mejor manejo, con decisiones confiables y de valor científico.

CONCLUSIONES

Los datos de suelos del INEGI pueden clasificarse con el sistema WRB (1999); sin embargo, en la actualización del grupo Calcisol se presentan problemas debido a que no se reporta la presencia del horizonte petrocálcico en la nomenclatura utilizada por el INEGI. Por esto, los grupos Calcisol y Cambisol no son del todo confiables, requieren trabajo de campo para identificar la presencia o ausencia del horizonte petrocálcico.

Los Leptosoles no pueden ser clasificados con precisión debido a que las descripciones del INEGI no incluyen la pedregosidad. El grupo Leptosol es el que predomina en el estado. De acá que se sustituye un mapa y análisis de datos exterior del porcentaje del estado de Yucatán.

Los Nitosoles reportados por el INEGI no pueden ser clasificados como Nitosoles debido a que la estructura nunciforme no existe. Por ello estos suelos fueron clasificados como Lixisoles.

Algunos Vertisoles reportados por el INEGI, cuentan con características que no permiten clasificarlos como tales, por ejemplo, colores rojos, baja CIC, bajos porcentajes de arcilla, lo cual contrasta con la presencia de grietas y la ausencia de caras de deslizamiento. Estos suelos del sur de Yucatán requieren ser revisados en campo.

Los suelos reportados como Regosoles en el litoral pertenecen al grupo Arenosol (WRB) y al orden *Entisol* (ST).



Por la profundidad, todos los Litosoles pertenecen a la unidad Leptosol lítico; sin embargo las Rendzinas reportadas por el INEGI pertenecen a los grupos Leptosol, Cambisol, Calcisol y Solonchak.

El sistema de clasificación WRB es el que ofrece una mejor opción para la diferenciación de las características de los suelos del estado de Yucatán ya que al hacer la actualización encontramos 36 unidades de suelo y en el sistema *Soil Taxonomy* encontramos 22 subórdenes.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT (Proyecto “Bases de datos de suelos de la península de Yucatán, incluyendo la nomenclatura maya y FAO”. Clave R31624-B), a la Universidad Autónoma de Yucatán en el “Programa de Impulso y Orientación a la Investigación” (PRIORI) por el apoyo financiero al proyecto y por las becas para el primer autor. Al Dr. Armando Escamilla Bencomo por la revisión del manuscrito.

REFERENCIAS

- Bautista, F., H. Estrada-Medina, 1998.** Conservación y manejo del suelo. En: Ciencia 50:50-55.
- Buckman, H., N. Brady, 1991.** Naturaleza y propiedades de los suelos. LIMUSA. México.
- Boul, S., F. Hole y R. McCracken, 1980.** Soil Genesis and Classification. 2a Ed. The Iowa State University Press. EU.
- Duch, J., 1988.** La conformación territorial del estado de Yucatán: los componentes del medio físico Universidad Autónoma de Chapingo Centro Regional de la Península de Yucatán. México.
- Duch, J., 1991.** Fisiografía Del estado de Yucatán: su relación con la agricultura Universidad Autónoma de Chapingo México.
- FAO, SICS, ISRIC, 1999.** Base referencial mundial del recurso suelo (WRB) Informes sobre recursos mundiales de suelos No. 84. Ed. FAO. Roma.
- Flores, J.S., I. Espejel-Carvajal, 1994.** Etnoflora yucatanense: Tipos de vegetación de la península de Yucatán. Fascículo 3. Ed. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- García, Enriqueta, 1989.** Apuntes de climatología. 6ª. Edi. Ed. Offset Larios, S.A. México.
- Hernández-Jiménez y M. Ascanio-García, 2001.** Desarrollo y estado actual de la clasificación de suelos en el mundo y en Cuba. En .Congreso latino americano de la ciencia del suelo.
- Honorato, R., 2000.** Manual de edafología. 4ª Ed. Alfaomega. Chile.
- INEGI, 1984a.** Mapa edafológico 1:250000 Mérida F16-10 INEGI México.
- INEGI, 1984b.** Mapa edafológico 1:250000 Felipe Carrillo Puerto FCP E16-1 INEGI México.
- INEGI, 1984c.** Mapa edafológico 1:250000 : Calkini f15-9-12 INEGI. México.
- INEGI, 1984d.** Mapa edafológico 1:250000 Cancún F16-8 INEGI. México.
- INEGI, 1984e.** Mapa edafológico 1:250000 Cozumel F16-11 INEGI. México.
- INEGI, 1984f.** Mapa edafológico 1:250000 Tizimín F16-7 INEGI. México.
- INEGI, 1984g.** Guía para la interpretación de las cartas edafológicas. INEGI. México.
- INEGI, 2001.** Anuario estadístico del estado de Yucatán México.
- Orellana Lanza, R., 1999.** La conservación y el aprovechamiento del patrimonio natural. En: Universidad Autónoma de Yucatán Ed. Atlas de procesos Territoriales de Yucatán. UADY. México: PROEESA.
- Ortiz, C. y M. Gutiérrez, 2000.** Situación actual y perspectivas de la clasificación de los suelos en México. En: La edafología y sus Perspectivas al siglo XXI. Tomo I. Ed. UNAM. México.
- Ortiz-Villanueva, B., C. Ortiz-Solorio, 1990.** Edafología. 7ª Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Palacio, G. y M. Ortiz, 2003.** Geomorfología de la Península de Yucatán. Investigaciones geográficas. En revisión
- Porta, J., M. López-Acevedo, C. Roquero, 1999.** Edafología: para la agricultura y el medio ambiente 2ª ed. Ed. Ediciones Mundi-prensa. España.
- Siebe, C., J. Reinhold, K. Stahr, 1996.** Manual para la descripción y evaluación de suelos en el campo. Sociedad Mexicana para la Ciencia del Suelo, A.C. México.
- Soil Survey Staff, 1975.** Soil Taxonomy Handbook 436.USDA.EU.
- Soil Survey Staff, 1995.** Claves para la taxonomía de suelos: traducción al español de la sexta edición versión 1994. Sociedad de la Ciencia del Suelo. México.
- Soil Survey Staff, 1996.** Key to *Soil Taxonomy*. Natural Resources Conservation Service. USDA. USA.
- Soil Survey Staff, 1999.** Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agriculture Handbook No. 436. 2a Ed. United States Department of Agriculture Natural Resource Conservation Service. USA.



APÉNDICE

Tabla A1. Clasificación de los suelos de la carta edafológica Calkiní F15-9-12

Perfil	Clasificación INEGI	Clasificación WRB	Soil Taxonomy
1	Histosol eutríco (Oe)	Gleysol calcárico-hístico (GLca-hi)	Histic Humaquepts (KAGB)
2	Regosol calcárico (Rc)	Leptosol calcárico (LPca)	Lithic Ustictorriorthents (LEBA)
3	Rendzina (E)	Solonchak cálcico (SCcc)	Typic Aquisalids (GBAC)
4	Rendzina (E)	Calcisol epiléptico (CLlep)	Lithic Haplustepts (KDDb)
5	Litosol (I)	Leptosol lítico (LPli)	Lithic ustorthents (LEDB)
17	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Calcistolls (IFCC)
19	Cambisol crómico (Bc)	Calcisol epiléptico (CLlep)	Lithic Haplustepts (KDDb)
20	Luvisol crómico (Lc)	Luvisol ródi-léptico (LVro-le)	Typic Rhodustalfs (JCGD)
21	Luvisol crómico (Lc)	Cambisol rodi-léptico (CMro-le)	Typic Haplustepts (KDDW)
22	Regosol calcárico (Rc)	Cambisol sodi-epiléptico (CMso-lep)	Lithic Haplustepts (KDDb)
24	Regosol calcárico (Rc)	Leptosol calcárico (LPca)	Lithic Calcisteps (KDBB)
26	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
27	Luvisol crómico (Lc)	Cambisol rodi-léptico (CMro-le)	Typic Haplustepts (KDDW)
39	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
41	Luvisol crómico (Lc)	Luvisol ródi-epiléptico (LVro-lep)	Lithic Rhodustalfs (JCGA)
n	6	11	11

n = Número de unidades o subgrupos por carta.

Tabla A2. Clasificación de suelos de la carta edafológica Cancún F16-8

Perfil	Clasificación INEGI	Clasificación WRB	Soil Taxonomy
1	Regosol calcárico (Rc)	Arenosol calcárico-álbico (ARca-ab)	Typic Ustipsamments (LCDG)
4	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
6	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
11	Vertisol pélico (Vp)	Cambisol sódico (CMso)	Typic Haplustepts (KDDW)
12	Cambisol crómico (Bc)	Cambisol rodi-léptico (CMro-le)	Typic Haplustepts (KDDW)
13	Luvisol crómico (Lc)	Luvisol léptico (LVle)	Typic Haplustalfs (JCHX)
20	Luvisol crómico (Lc)	Cambisol crómico (CMcr)	Typic Haplustepts (KDDW)
21	Rendzina (E)	Calcisol epipéptico (CLtp)	Lithic Petrocalcic Calcistolls (IFCB)
29	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
33	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
41	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
44	Luvisol crómico (Lc)	Luvisol cromi-léptico (LVcr-le)	Typic Haplustalfs (JCHX)
55	Rendzina (E)	Calcisol epipéptico (CLtp)	Lithic Petrocalcic Calcistolls (IFCB)
n	5	8	5

n = Número de unidades o subgrupos por carta.



Tabla A3. Clasificación de suelos de la carta edafológica Tizimín F16-7

Perfil	Clasificación INEGI	Clasificación WRB	Soil Taxonomy
1	Regosol calcárico (Rc)	Arenosol calcárico (ARca)	Typic Ustipsamments (LCDG)
2	Solonchak ortico (Zo)	Solonchak hipersálico (SCszh)	Typic Halaquepts (KACE)
3	Solonchak mólico (Zm)	Gleysol episáli-calcárico (GLszp-ca)	Typic Halaquepts (KACE)
5	Litosol (I)	Leptosol lítico (LPII)	Lithic Ustorthents (LEDB)
7	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
8	Litosol (I)	Leptosol lítico (LPII)	Lithic Ustorthents (LEDB)
9	Litosol (I)	Leptosol lítico (LPII)	Lithic Ustorthents (LEDB)
10	Rendzina (E)	Calcisol epipétrico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
11	Rendzina (E)	Calcisol epipétrico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
12	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
13	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
14	Rendzina (E)	Calcisol epipétrico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
15	Litosol (I)	Leptosol lítico (LPII)	Lithic Ustorthents (LEDB)
16	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
17	Regosol calcárico (Rc)	Arenosol prótico (ARpr)	Typic Ustipsamments (LCDG)
18	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
19	Litosol (I)	Leptosol lítico (LPII)	Lithic Ustorthents (LEDB)
20	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
21	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
22	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
23	Solonchak gléyico (ñg)	Solonchak epigléyico (SCglp)	Typic Aquisalids (GBAC)
24	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
25	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
26	Rendzina (E)	Calcisol epipétrico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
28	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
30	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
31	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
32	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
34	Luvisol crómico (Lc)	Cambisol ródico (CMro)	Typic Haplustepts (KDDW)
37	Litosol (I)	Leptosol lítico (LPII)	Typic Haplosalids (GBBE)
38	Solonchak ortico (Zo)	Solonchak hipersálico (SCszh)	Typic Halaquepts (KACE)
39	Cambisol crómico (Bc)	Calcisol epipétrico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustepts (KDBA)
40	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
41	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
42	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
44	Rendzina (E)	Calcisol epipétrico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
45	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
46	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
47	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
49	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
51	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
52	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
54	Solonchak ortico (Zo)	Solonchak hipersálico (SCszh)	Typic Haplosalids (GBBE)
55	Rendzina (E)	Calcisol epipétrico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
56	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
57	Rendzina (E)	Cambisol epilepti-mólico (CMlep-mo)	Lithic Haplustolls (IFGC)



Tabla A3. Clasificación de suelos de la carta edafológica Tizimín F16-7 (continuación)

59	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
60	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
61	Luvisol crómico (Lc)	Cambisol ródico (CMro)	Typic Haplustepts (KDDW)
62	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
65	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
66	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
67	Luvisol crómico (Lc)	Cambisol ródico (CMro)	Typic Haplustepts (KDDW)
68	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
69	Luvisol crómico (Lc)	Cambisol crómico (Cmcr)	Typic Haplustepts (KDDW)
71	Rendzina (E)	Cambisol epilepti-mólico (CMlep-mo)	Lithic Haplustolls (IFGC)
73	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
74	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
n	8	11	11

n = Número de unidades o subgrupos por carta.

Tabla A4. Carta edafológica Cozumel F16-11

Perfil	Clasificación INEGI	Clasificación WRB	Soil Taxonomy
1	Feozem haplico (Hh)	Luvisol cromi-léptico (LVcr-le)	Typic Haplustalfs (JCHX)
3	Rendzina (E)	Calcisol epipéptico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
18	Cambisol crómico (Bc)	Calcisol endopéptico (CLptn)	Petrocalcic Calciustepts (KDBE)
22	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
23	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
32	Cambisol crómico (Bc)	Calcisol epipéptico (CLptp)	Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
34	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
n	3	4	4

n = Número de unidades o subgrupos por carta.

Tabla A5. Clasificación de la carta edafológica Felipe Carrillo Puerto F16-1

Perfil	Clasificación INEGI	Clasificación WRB	Soil Taxonomy
8	Rendzina (E)	Calcisol epipéptico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
14	Vertisol pélico (Vp)	Vertisol mazi-éutrico (VRmz-eu)	Leptic Haplusterts (FEEM)
20	Rendzina (E)	Calcisol epipéptico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
23	Vertisol pélico (Vp)	Cambisol vértico (CMvr)	Vertic Haplustepts (KDDE)
33	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
34	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
41	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
50	Nitosol eutrico (Ne)	Lixisol ródico (LXro)	Kanhaplic Rhodustalfs (JCGB)
52	Nitosol eutrico (Ne)	Lixisol ródico (LXro)	Kanhaplic Rhodustalfs (JCGB)
59	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
63	Vertisol pélico (Vp)	Vertisol mazi-éutrico (VRmz-eu)	Leptic Haplusterts (FEEM)
77	Nitosol eutrico (Ne)	Lixisol ródico (LXro)	Kanhaplic Rhodustalfs (JCGB)
n	3	5	5

n = Número de unidades o subgrupos por carta.



Tabla A6. Clasificación de la carta edafológica Mérida F16-10

Perfil	Clasificación INEGI	Clasificación WRB	Soil Taxonomy
3	Cambisol crómico (Bc)	Cambisol cromi-epiléptico (CMcr-lep)	Lithic Haplustepts (KDDb)
6	Castañozem háplico (Kh)	Cambisol calcari-léptico (CMca-le)	Typic Haplustepts (KDDW)
7	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
8	Cambisol cácarico (Bk)	Luvisol cálcio-epiléptico (LVcc-lep)	Lithic Haplustalfs (JCHA)
9	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
10	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
12	Cambisol crómico(Bc)	Luvisol ródico (LVro)	Typic Rhodustalfs (JCGD)
20	Rendzina (E)	Phaeozems epiléptico (PHlep)	Lithic Haplustolls (IFGC)
21	Nitosol eutríco (Ne)	Luvisol ródico (LVro)	Typic Rhodustalf (JCGD)
22	Luvisol crómico (Lc)	Luvisol rodi-léptico (LVro-le)	Typic Rhodustalf (JCGD)
27	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
28	Cambisol crómico (Bc)	Luvisol ródico (LVro)	Typic Rhodustalfs (JCGD)
35	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
36	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
38	Cambisol crómico (Bc)	Calcisol epipéptico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
40	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
41	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
49	Luvisol crómico (Lc)	Calcisol epipéptico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
52	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
55	Cambisol calcárico(Bk)	Cambisol calcari-léptico (CMca-le)	Typic Calciustepts (KDBJ)
56	Cambisol crómico (Bc)	Calcisol pétri-lúvico (CLpt-lv)	Lithic Rhodustalfs (JCGA)
60	Nitosol eutríco (Ne)	Cambisol ródico (CMro)	Typic Haplustepts (KDDW)
61	Cambisol crómico (Bc)	Cambisol éutríco (CMeu)	Typic Haplustepts (KDDW)
63	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
64	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
69	Regosol eutríco (Re)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
70	Luvisol crómico (Lc)	Calcisol endopéptico (CLptn)	Petrocalcic Calciustepts (KDBE)
73	Rendzina (E)	Leptosol réndzico (LPrz)	Lithic Haplustolls (IFGC)
75	Nitosol eutríco (Ne)	Lixisol ródico (LXro)	Kanhaplic Rhodustalfs (JCGB)
77	Luvisol crómico (Lc)	Luvisol ródico (LVro)	Typic Rhodustalfs (JCGD)
78	Lítisol (I)	Leptosol lítico (LPlí)	Lithic Ustorthents (LEDB)
81	Luvisol crómico (Lc)	Lixisol ródico (LXro)	Kanhaplic Rhodustalfs (JCGB)
82	Feozem haplico (Hh)	Calcisol epipéptico (CLptp)	Lithic Petrocalcic Calciustolls (IFCB)
83	Feozem calcárico (Hc)	Cambisol rodi-epiléptico (CMro-lep)	Lithic Haplustepts (KDDb)
93	Vertisol crómico (Vc)	Cambisol eutri-léptico (CMeu-le)	Lithic Haplustepts (KDDb)
97	Cambisol ferralico (Bf)	Lixisol rodi-léptico (LXro-le)	Kanhaplic Rhodustalfs (JCGB)
100	Luvisol crómico (Lc)	Lixisol ródico (LXro)	Kanhaplic Rhodustalfs (JCGB)
n	12	18	11

n = Número de unidades o subgrupos por carta.



MICRORELIEVE Y COLOR DEL SUELO COMO PROPIEDADES DE DIAGNÓSTICO EN ZONAS DE KARST RECIENTE

**Francisco Bautista¹, Jorge Navarro-Alberto¹,
Andrew Manu² y Rufino Lozano³**

¹Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán

²Texas A & M. University

³Instituto de Geología, UNAM

RESUMEN

Se describe el patrón altitudinal de los suelos de acuerdo con el microrelieve y se evalúa la importancia del color del suelo como propiedad distintiva y su relación con las propiedades químicas en Leptosoles de la Zona Henequenera de Yucatán, México. Se realizaron dos transectos a lo largo del microrelieve, las muestras fueron tomadas a intervalos de 1.5 m a dos profundidades 0 a 5 cm y 5 a 10 cm. Se encontraron tres suelos de acuerdo con la nomenclatura maya: rojo (R) tipo *Haylu'um*, café rojizo (CR) *Chaclu'um* y negro (NE) *Boxlu'um*. La materia orgánica (MO), Ca y P fueron las propiedades químicas relacionadas con el gradiente altitudinal y con el color del suelo. Los suelos R presentaron los valores menores de MO, Ca y P, seguidos de los CR y los NE que presentaron los valores más altos. Los suelos R contienen una mayor cantidad de minerales de tamaño menor a los 2 μ , como cuarzo, hematita y halloysita que los NE, siendo los CR un intergrado. El contenido de óxidos totales también sigue la secuencia R>CR>NE. La posición microtopográfica y el color de suelo pueden ser utilizados como propiedades distintivas relacionadas con las propiedades químicas y mineralógicas.

ABSTRACT

A study describing the altitudinal distribution pattern and importance of soil color as a distinctive property and its relation to chemical properties in Leptosols in the Henequen zone soils of Yucatán México was carried out. Two altitudinal transects across the microtopographic gradient were carried out, with samples taken at 1.5 m intervals. Soils were sampled at a depth of 0-5 cm and 5-10 cm. Three soil types were found covering three Mayan classes: red (R) *Haylu'um*; reddish brown (CR) *Chaclu'um*; y black (NE) *Boxlu'um*. Organic matter, Ca and P were chemical properties related to the soil color and altitudinal pattern gradient. The R soil had low organic matter, Ca and P, intermediate values in CR and NE showed higher values. The R soil content more amounts of particle of 2 μ of diameter or less, with minerals such as hematite and halloysite in than NE, and the CR is a intermediate. The content of total oxides also follows the sequence

R > CR > NE. The soil position on microtopographic and soil color can be used as distinguishing properties related to the chemical and mineralogical properties.

INTRODUCCIÓN

Los Leptosoles se encuentran distribuidos ampliamente a escala mundial, ocupando una superficie de 1655 millones de hectáreas (Spaargaren, 1994). En México, ocupan alrededor de 467978 km² equivalentes al 23.96% de la superficie del país (INEGI, 1997). En el estado de Yucatán más de 80% de los suelos corresponden a la unidad Leptosol (Peniche, 1994).

Un rasgo distintivo de la fisiografía de la Península de Yucatán, es su extrema variación microtopográfica. Por la fisiografía, la zona de estudio se encuentra dentro de la planicie cárstica de Mérida, caracterizada por la presencia de un relieve plano a ligeramente ondulado. Se presentan dolinas, valles ciegos y secos, montículos de uno a 2 m de altura y afloramientos rocosos. El material parental es una capa de roca calcárea muy dura de 1.5 m de espesor denominada localmente “Laja”, sobre un banco de caliza no litificado de 15 m de espesor.

El escaso entendimiento de la heterogeneidad espacial en los Leptosoles en Yucatán, producto del microrelieve de las zonas cársticas, dificulta el establecimiento exitoso de prácticas agrícolas, forestales y pecuarias.

En la práctica cotidiana la nomenclatura maya es la más utilizada por campesinos y técnicos, debido a que se aplica a pequeñas áreas, por lo que sirve para entender y

manejar la heterogeneidad espacial, sin embargo, son escasos los reportes que describan con detalle las propiedades distintivas de los suelos, así como sus propiedades químicas relacionadas con su fertilidad. Al respecto, Duch (1992) menciona que: “a pesar del uso generalizado de la nomenclatura maya, no existe suficiente evidencia respecto al conjunto de términos mayas que son utilizados para identificar distintos tipos de suelo, se encuentran organizados en un sistema de clasificación o si solo conforman un sistema de nomenclatura de carácter no jerárquico”. Es posible que la falta de información escrita sobre los suelos se deba, precisamente a la gran heterogeneidad que se presenta, como lo mencionan Pool y Hernández (1987).

Los objetivos del presente trabajo fueron: describir el patrón de distribución de los suelos someros en el microrelieve, identificar a las propiedades químicas distintivas de los suelos y explorar la importancia del color del suelo como propiedad distintiva, ya que es utilizada en la nomenclatura Maya.

El entendimiento de la heterogeneidad del suelo (HES) ayudará a comprender muchos de los procesos ecológicos (Dutilleul, 1993; Casper y Cahill, 1996) y en consecuencia se podrían diseñar, con mayores probabilidades de éxito, opciones de manejo agrícola, forestal y pecuario.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se encuentra en la localidad denominada Xmatkuil, perteneciente al municipio de Mérida, en el Estado de Yucatán, México. Se localiza a los 20° 52' 3.86" N y 89° 37' 20.05" O, a una altitud de 10 msnm (Fig. 1). El clima de la zona de estudio corresponde al tipo Aw0(i')g el más seco de los cálidos subhúmedos con lluvias en verano según Koeppen. La vegetación es de selva baja caducifolia.

El estudio se dividió en dos partes, la primera para estudiar las propiedades químicas del suelo a lo largo de dos transectos y la segunda en la caracterización química y mineral de los suelos agrupados por el color.

TRANSECTOS

Se realizaron diversos recorridos de campo en el municipio de Mérida en los que se observó la llanura ondulada y el patrón de cambio de los suelos en el microrelieve. Se

seleccionó un sitio en el que se realizaron dos transectos de 27 m de largo cubriendo la parte superior del microrelieve, el piedemonte y la parte baja. El montículo presentaba una altura de 1.5 m con respecto a la parte baja (Fig. 2). Cada 1.5 m se tomaron las muestras de suelo, a una profundidad de 0 a 5 cm y de 5 a 10 cm. Antes de la toma de muestra la vegetación fue quemada, para cultivar maíz. Los parámetros medidos fueron: pH (Lean, 1982), materia orgánica con dicromato de potasio (Nelson y Sommers, 1982), cationes intercambiables Ca, Mg, Na y K con acetato de amonio (Okalebo *et al.* 1993); fósforo (Olsen y Tamu) (Okalebo *et al.* 1993); azufre (Tabatabai, 1982); nitratos (Keeney y Nelson, 1982); micronutrientes como Fe, Mn, Cu y Zn extraíbles con DPTA (Lindsay y Norvelly, 1978). Los análisis se realizaron en el “Departamento de suelos y ciencias agrícolas” de la Universidad de Texas A & M, en EUA.

En cada transecto, con las propiedades químicas de los suelos, se realizó un análisis discriminante lineal con base en el conocimiento previo del color del suelo. El propósito de estos análisis fue conocer el porcentaje de sue-



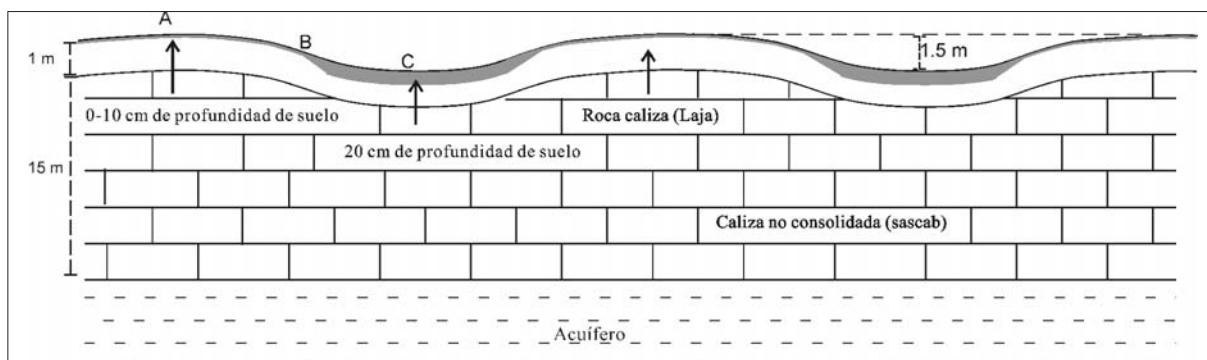


Figura 1. Localización de los suelos en el microrelieve. A=Boxlu'um (Negro); B=Chaclu'um (Café-rojizo); C=Haylu'um (Rojo).

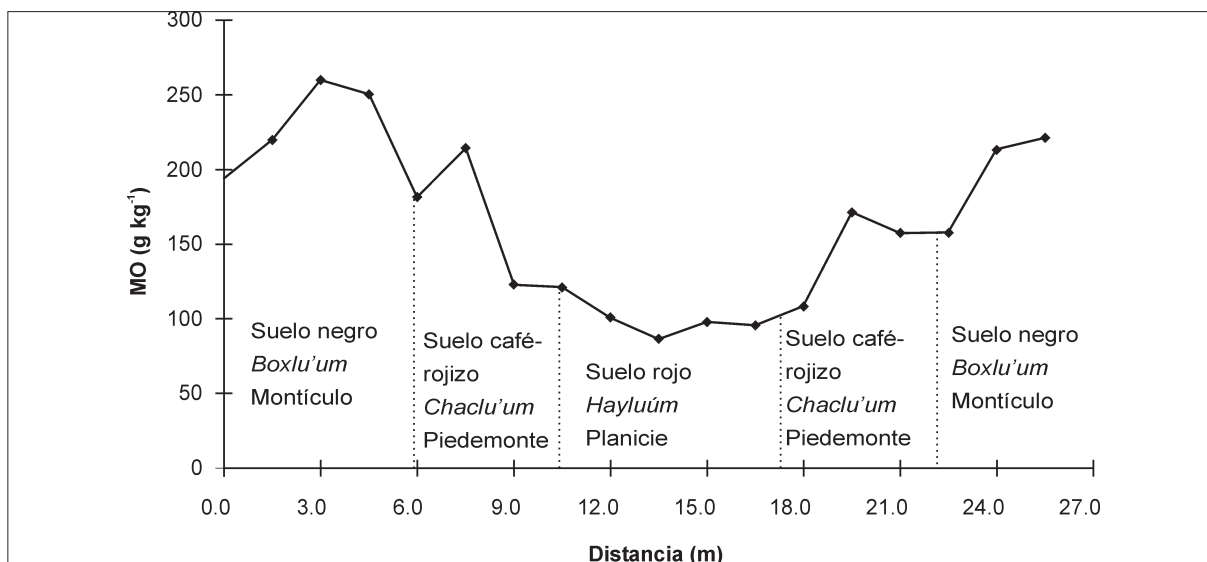


Figura 2. Materia orgánica en la superficie de Leptosoles a lo largo del transecto.

los que fueron correctamente asignados por color. Para ello, se utilizó el método de validación cruzada (Johnson y Wichern, 1991).

También se realizó un análisis discriminante canónico para identificar las propiedades químicas distintivas, es decir, las que permiten la formación de grupos de suelos por color. El análisis discriminante lineal del transecto 2 a la profundidad de 5 a 10 cm de profundidad no se realizó debido a que el número de unidades muestrales en ese transecto era igual al número de propiedades medidas, lo cual no permitía la estimación correcta de la función discriminante.

CONTENIDO TOTAL DE ELEMENTOS Y MINERALES POR COLOR DE SUELO

En muestras seleccionadas por color de suelo, se midió el contenido total de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , CaO , MgO , K_2O , Na_2O y P_2O_5 por espectroscopía de fluorescencia de

rayos X (FRX) con un espectrómetro secuencial Siemens SRS 3000 automatizado, con el fin de determinar e identificar los elementos que pudieran ser considerados como distintivos de cada suelo, así como para mostrar las diferencias entre los suelos minerales y orgánicos.

Se identificaron los minerales de las partículas menores a 2μ mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) con un difractómetro Philips PW-1050, con el objeto de comparar entre los suelos de diferente color e identificar a los minerales predominantes. La variación en la medición de la posición angular fue de 0.005 nm. Se aplicó una modificación del método desarrollado por Biscaye (1965), se midió el área bajo la curva para el pico más intenso de la señal de cada mineral, con el fin de obtener una estimación de la cantidad relativa por muestra, para comparar entre suelos. Los análisis de FRX y de DRX se realizaron en el Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM, México.

Los suelos se clasificaron según la base de referencia mundial del recurso suelo (BRMRS) (Spaargaren, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ELEMENTOS Y SU RELACIÓN CON EL MICRORELIEVE

En los montículos los suelos se presentan los valores mayores de pH, MO, NO_3^- , K, S, Ca, Mg y Fe.

La MO presenta un patrón regular de distribución, los valores mayores se encuentran en las partes altas que se corresponden con los suelos negros, disminuyen en el piedemonte en los suelos cafés y alcanzan las concentraciones menores en las partes correspondientes a suelos rojos (Fig. 3).

El contenido de azufre, en la superficie, muestra un patrón de distribución parecido al de la materia orgánica ($r^2=0.52$) que se mejora considerablemente a mayor profundidad ($r^2=0.84$).

En la superficie, el calcio disminuye con la altitud microtopográfica, pero las muestras de mayor profundidad no presentan dicho patrón de distribución (Fig. 4). La concentración de calcio, a nivel superficial, sigue el patrón de distribución de la MO ($r^2=0.79$), pero disminuye considerablemente a una profundidad de 5 a 10 cm ($r^2=0.43$).

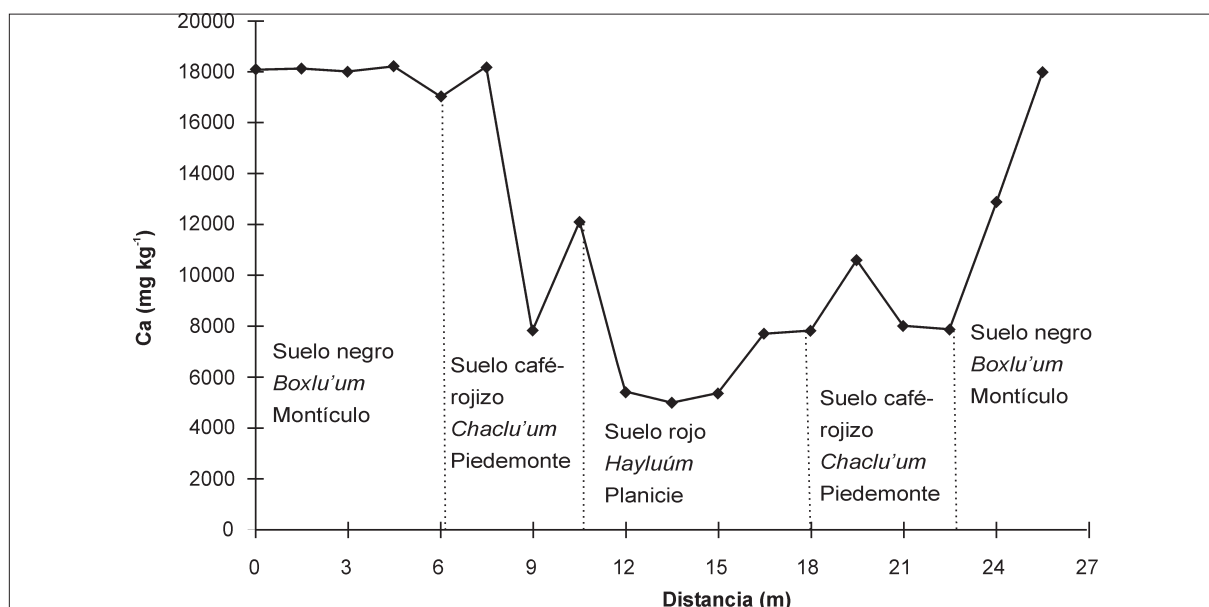


Figura 3. Calcio intercambiable en la superficie de Leptosoles a lo largo del transecto.

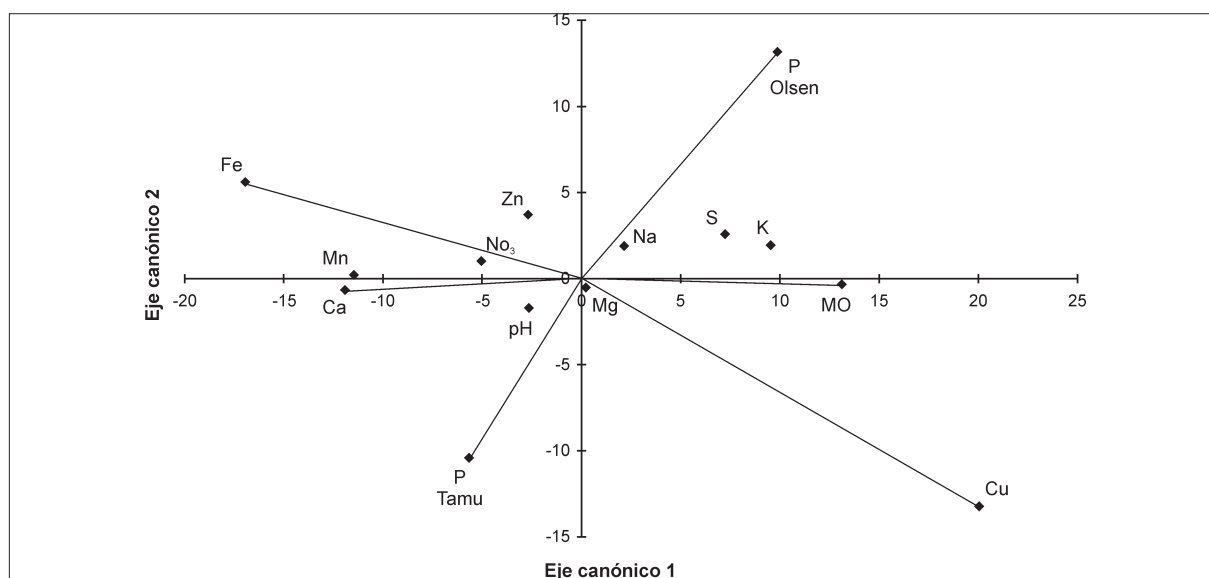


Figura 4. Coeficientes estandarizados de las propiedades químicas del suelo (Transecto 1: 0 a 5 cm).



El magnesio no presenta cambios aparentes a lo largo del transecto, pero las muestras de mayor profundidad se mantienen por debajo de las concentraciones superficiales (Tabla 1).

Las diferencia entre el contenido de fósforo a diferentes profundidades solo son relevantes en los extremos del transecto, en las partes bajas del microrelieve la diferencia es mínima. Los contenidos de hierro muestran un patrón de distribución parecido al del P ($r^2=0.84$).

El potasio presenta mayores diferencias entre profundidad en las partes bajas. En la profundidad de 5 a 10 cm se presenta el patrón de distribución esperado, disminución de la concentración en las partes bajas y aumento en las altas (Tabla 1).

El zinc presenta concentraciones menores en las muestras de mayor profundidad (Tabla 1).

La MO y el hierro tienen relación entre sus dos niveles de profundidad, presentado valores de r^2 de 0.72 y 0.68, respectivamente. Los elementos constituyentes de la MO presentan un claro patrón de distribución, alcanzando los máximos valores en las partes altas del microrelieve y los menores valores en las partes bajas. Al igual que en este trabajo, pero para otra región, Pool y Hernández (1987) identificaron que en las partes altas se encuentran contenidos mayores de MO.

Roglic (1955, 1957) citado por Trudgil, (1985) menciona que el microrelieve de planicie ondulada se genera por la erosión fluvial del karst en primer término, seguida por la corrosión o carstificación y que las diferencias en el microrelieve se deben a la composición química, mineral y de la textura de la roca. En este estudio se confirma la existencia de las diferencias en los contenidos químicos a nivel de

suelo; sin embargo, no se encuentran evidencias de la erosión fluvial y es poco probable que, por el intemperismo del karst, se formen las grandes cantidades de suelo rojo.

También existe la teoría de la depositación de sedimentos no consolidados sobre la roca calcárea antes de la emersión, debido a la actividad volcánica de las zonas cercanas (Guatemala, centro de México y Cuba) (FAO, 1970). Esta teoría explica las diferencias mineralógicas entre la roca calcárea y los suelos rojos (Leptosol mólico); sin embargo, no explica la formación del microrelieve

En la zona de estudio existen lugares en los que se ha extraído el suelo y la roca caliza (laja), quedando expuesto el banco de calizas no consolidado, allí se observan pequeñas elevaciones "a manera de surcos" en los cuales se ha realizado una separación mineral de manera natural debido a la solubilidad y movilidad del carbonato de calcio, quedando el carbonato de calcio en el montículo pequeño y las impurezas de la roca en la parte baja. El fenómeno es muy evidente debido al color blanco de la caliza y al rojo los óxidos de hierro. Este fenómeno explica la formación del microrelieve y las diferencias en las propiedades químicas y mineralógicas de los suelos; sin embargo no explica la formación de la roca.

EL COLOR COMO PROPIEDAD DISTINTIVA

El resultado del análisis discriminante indica que a nivel superficial los suelos negros fueron asignados correctamente del 80% al 83.3% con base en sus propiedades químicas. Los suelos café-rojizos lograron un nivel de asignación del 71.4% al 85.7% y los rojos del 80 al 100% (Tablas 2, a y c).

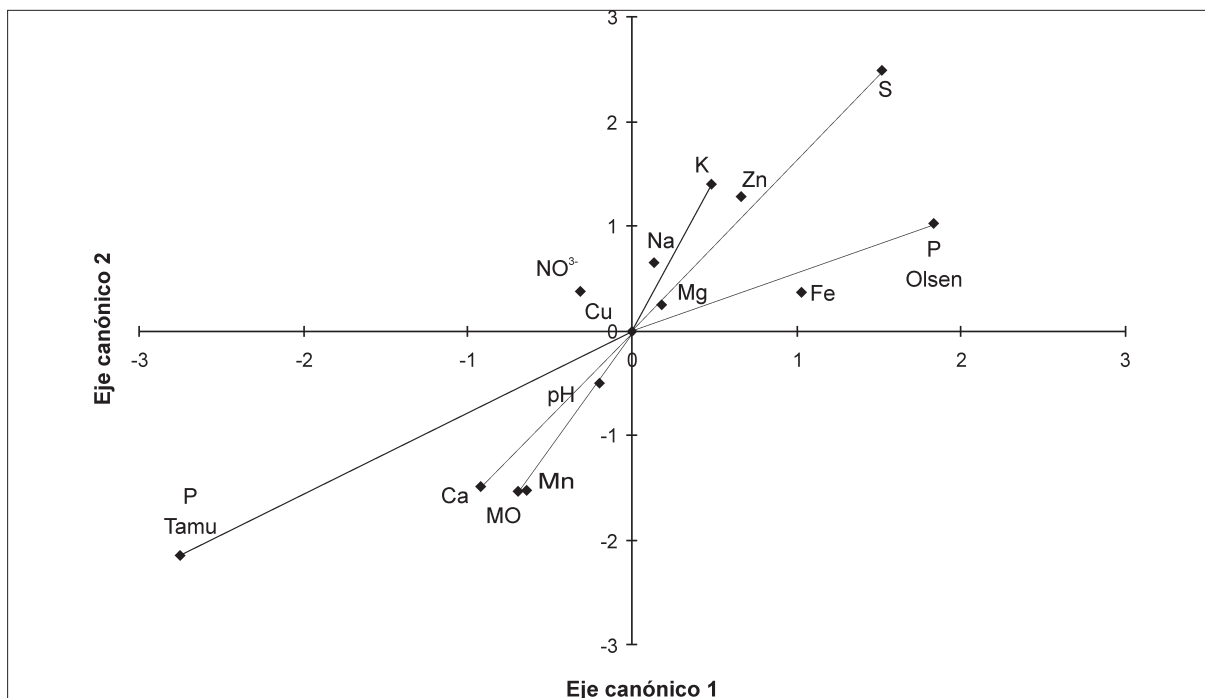


Figura 5. Coeficientes estandarizados de las propiedades químicas del suelo (Transecto 1: 5 a 10 cm).



Tabla 1. Propiedades químicas por color de suelo con quemas recientes.

		PH	MO	NO ₃ ⁻	P*	P**	S	K	Na	Ca	Mg	ññ	Fe	Mn	Cu
			g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				Cationes intercambiables mg kg ⁻¹				Extraíbles con DPTA mg kg ⁻¹			
a) Transecto 1 profundidad de 0 a 5 cm															
Negro	X	7.8	226.0	57.5	45.8	99.5	271.2	497.7	33.0	17196.0	623.0	4.0	32.0	8.8	0.6
Boxlu'um	s	0.2	25.0	18.9	48.3	84.2	121.9	153.6	9.1	2122.2	253.9	2.0	35.6	2.3	0.3
Café-rojizo	X	7.4	159.0	61.3	21.9	36.3	106.8	619.9	28.3	11035.1	521.0	3.3	26.1	11.9	0.5
Chaclu'um	s	0.4	36.0	15.1	29.6	49.4	58.3	145.6	11.0	4598.4	51.8	3.0	36.9	3.5	0.3
Rojo	X	7.6	100.0	37.0	2.8	4.2	58.1	424.2	29.8	7106.6	438.8	1.6	3.9	11.5	0.3
Haylu'um	s	0.2	13.0	6.6	0.6	1.8	26.7	43.7	10.3	2974.6	166.0	1.0	0.4	1.6	0.0
b) Transecto 1 profundidad de 5 a 10 cm															
Negro	X	7.5	169.0	48.7	22.4	23.7	157.4	474.0	33.0	12156.0	459.0	1.6	51.2	12.0	0.8
Boxlu'um	s	0.4	49.0	9.5	15.0	19.1	116.9	77.3	9.5	5366.0	93.6	1.1	38.2	5.1	0.3
Café-rojizo	X	7.8	111.0	30.2	4.5	9.0	82.1	406.3	41.0	8011.2	384.7	1.0	12.5	8.9	0.4
Chaclu'um	s	0.1	26.0	7.4	5.7	12.3	30.5	143.0	10.1	4665.5	169.6	1.0	19.7	1.7	0.1
Rojo	X	7.6	80.0	25.4	1.5	2.2	43.7	226.6	39.8	5627.2	379.2	0.3	3.6	10.0	0.3
Haylu'um	s	0.2	6.0	5.0	0.3	0.4	7.9	20.0	7.0	947.6	48.3	0.3	0.4	2.2	0.03
c) Transecto 2 profundidad de 0 a 5 cm															
Negro	X	7.82	242.0	62.6	9.1	35.0	243.6	535.6	46.8	17701.4	627.8	1.9	9.3	12.6	0.5
Boxlu'um	s	0.08	32.0	38.9	7.6	21.3	123.7	242.6	12.8	960.9	60.7	0.7	3.0	3.9	0.1
Café-rojizo	X	7.73	129.0	43.6	5.2	10.6	83.3	583.0	43.6	9011.7	636.6	2.9	5.1	13.2	0.4
Chaclu'um	s	0.22	13.0	10.8	2.2	6.2	21.4	165.2	15.6	2153.5	70.0	0.9	0.7	1.8	0.1
Rojo	X	7.78	99.0	28.6	2.4	4.6	69.5	497.4	81.0	7825.2	651.2	7.3	4.0	10.9	0.4
Haylu'um	s	0.13	16.0	4.4	0.9	1.9	14.1	100.4	24.7	1198.9	104.1	10.0	0.4	2.3	0.1
d) Transecto 2 profundidad de 5 a 10 cm															
Negro Boxlu'um	X	7.7	127.0	43.0	4.8	6.0	99.7	612.0	51.0	10632	536.0	1.0	5.0	9.9	0.4
Café-rojizo	X	7.8	100.0	29.8	2.4	3.3	73.0	320.8	103.7	8014	488.2	0.7	4.2	9.6	0.4
Chaclu'um	s	0.1	15.0	6.7	0.6	1.6	13.4	145.1	49.2	1567	74.6	0.6	0.3	1.4	0.0
Rojo	X	7.7	76.0	16.0	1.6	1.6	51.0	243.8	73.2	6306	543.6	1.1	3.7	10.3	0.4
Haylu'um	s	0.2	15.0	2.7	0.9	0.9	15.3	100.8	26.8	1207	95.4	0.8	0.4	2.0	0.1

*Olsen, **Tamú; X= promedio; s= desviación estándar

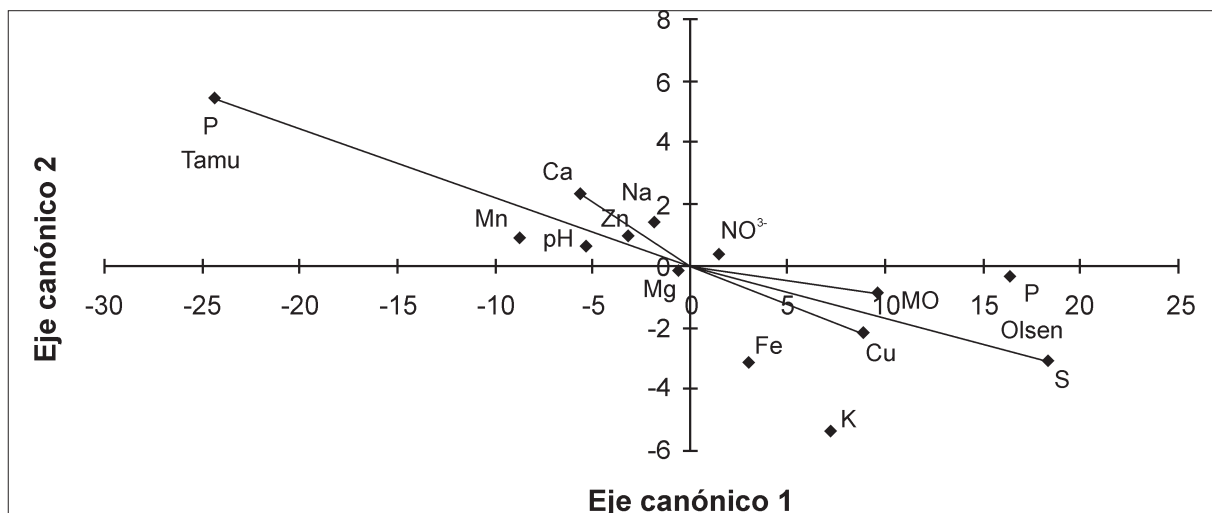


Figura 6. Coeficientes estandarizados de las prioridades químicas del suelo (Transecto 2: 0 a 5 cm).



A nivel subsuperficial (5 a 10 cm), los suelos rojos y café-rojizos lograron un 100% de asignación, los negros no estuvieron bien representados a esta profundidad ya que solo se contó con tres muestras (Tabla 2, b y d).

Estos resultados aportan evidencias que fortalecen la hipótesis de la validez de la utilización campesina (nomenclatura Maya) del color como propiedad distintiva en los Leptosoles de la zona Henequenera de Yucatán, siendo de mayor validez en el caso de los suelos rojos.

Los suelos rojos son los que presentan menor variabilidad espacial, los negros son intermedios y los café rojizo son los que más variación presentan. Esto refleja su carácter de intergrado.

Los suelos negros contienen cantidades mayores de todos los nutrimentos medidos en comparación con los suelos rojos; sin embargo, presentan menor cantidad de tierra fina. Los suelos café rojizo se encuentran en una posición intermedia.

Considerando la importancia relativa para la formación de los grupos de suelo por color, de las seis variables más importantes analizadas por transecto y profundidad, se obtienen las siete propiedades distintivas más importantes, que son: P (Tamu y Olsen) y MO en primer término, seguidas de Cu, Ca, S y K. La longitud de los vectores (o la distancia del origen al punto) indica la importancia relativa de cada variable en la formación de los grupos por color, como se muestra en las Figuras 5 y 6.

Aún agrupados los suelos por color, el coeficiente de variación de la MO es mayor al 10% a nivel superficial y arriba del 7.6% a nivel de 5 a 10 cm de profundidad (Tabla 1).

Estos resultados sugieren una fuerte influencia de la vegetación en las propiedades del suelo. Las plantas arbóreas crecen mas en los suelos pedregosos de las partes altas del microrelieve, mantienen su follaje por mayor tiempo durante la época de sequía y producen una mayor can-

tidad de hojarasca en comparación con las plantas que crecen en suelos rojos (Illsley y Hernández, 1980). Además, es posible que en los suelos rojos la descomposición de la hojarasca y de la materia orgánica sea más rápida debido a la actividad catalítica de los óxidos de hierro, manganeso (Larson y Hufnagel, 1980; Oades, 1989; McBride, 1989) y aluminio (McBride, 1979). Por el contrario, en los suelos calcáreos se encuentra ampliamente reportado el fenómeno de acumulación de materia orgánica, que puede estar ocurriendo en las partes altas de los montículos.

CARACTERIZACIÓN DETALLADA DE LOS SUELOS POR COLOR

Los suelos rojos localizados en la parte baja del microrelieve, presentan cantidades mayores de suelo por ser más profundos y cantidades mayores de minerales en comparación con los demás suelos, lo cual se corrobora con los contenidos de Fe_2O_3 , K_2O , BaO y SiO_2 (Tabla 3) y por la cantidad relativa de halloysita, boehmita y hematita (Tabla 4). Estos suelos pueden ser clasificados como Leptosol mólico (LPmo) por la BRMSR (Spaargaren, 1994) y como *Haylu'um* por la nomenclatura maya, son los que predominan en las partes bajas del microrelieve en la zona de estudio; sin embargo, en algunas zonas pueden ser más profundos y clasificarse como Cambisoles o inclusive como Luvisoles (*Kancab* por los mayas) según el grado de desarrollo alcanzado.

Los suelos predominantes de las partes altas del microrelieve (negros) pueden ser clasificados como Leptosols líticos (LPli) o *Boxlu'um* según los mayas. Las principales características de estos suelos son los contenidos mayores de MO, calcio intercambiable, fósforo, CaO y calcita, así como las concentraciones menores de Al_2O_3 , halloysita y cuarzo (Tabla 4). En menor proporción, también pueden presentarse otras variantes en la región, como son el *Chochol* (con predominancia de pedregosi-

Tabla 2. Clasificación de suelos por color con base en sus características químicas

	Negro	Café-rojizo	Rojo	Total
a) Transecto 1 profundidad 0 a 5 cm				
Negro	5 (83.3 %)	1 (16.7 %)	0 (0 %)	6 (100 %)
Café-rojizo	0 (0 %)	6 (85.7 %)	1 (14.3 %)	7 (100 %)
Rojo	0 (0 %)	0 (0 %)	5 (100 %)	5 (100 %)
b) Transecto 1 profundidad 5 a 10 cm				
Negro	2 (66.67 %)	0 (0 %)	1 (33.33 %)	3 (100 %)
Café-rojizo	0 (0 %)	6 (100 %)	0 (0 %)	6 (100 %)
Rojo				
Negro	4 (80 %)	1 (20 %)	0 (0 %)	5 (100 %)
Café-rojizo	1 (14.3 %)	5 (71.4 %)	1 (14.3 %)	7 (100 %)
Rojo	0 (0 %)	1 (20 %)	4 (80 %)	5 (100 %)
d) Transecto 2 profundidad 5 a 10 cm				
Café-rojizo		6 (100 %)	0	6 (100 %)
Rojo		0	5 (100 %)	5 (100 %)



Tabla 3. Contenido total de óxidos en Leptosoles.

Elementos	Rojo	Café-rojizo	Negro
	Haylu'um	Chaclu'um	Boxlu'um
	%	%	%
SiO ₂	32.69	28.80	28.78
TiO ₂	1.77	1.48	1.32
Al ₂ O ₃	27.39	21.98	20.45
Fe ₂ O ₃ total	11.88	9.72	10.55
MnO	0.16	0.29	0.10
MgO	1.53	1.63	1.51
CaO	3.76	8.11	12.25
Na ₂ O	0.52	0.53	0.55
K ₂ O	1.61	1.87	1.25
P ₂ O ₅	0.32	0.64	2.27
PXC	20.30	26.50	23.10

PXC=Pérdida de peso por calcinación.

Tabla 4. Minerales menores de 2 U en Leptosoles.

Mineral (Posición angular de la familia de planos en nm)	Rojo Haylu'um	Café-rojizo Chaclu'um	Negro Boxlu'um
	(mm ²)	(mm ²)	(mm ²)
Halloysita (0.443)	562.5	382.5	315.0
Boehmita (0.610)	75.0	36.0	38.0
Cuarzo (0.333)	117.5	108.0	72.0
Hematita (0.267)	64.0	24.0	25.0
Calcita (0.303)	presencia	102.0	182.0
Illita (1.027)	presencia	presencia	no detectado

dad superficial) que correspondería a un LP esquelético; *Puslu'um* caracterizado por la ausencia de piedras, gran cantidad de materia orgánica, mayor contenido de tierra fina sobre la roca, sin grava y de un color negro más intenso (LPli o LPre); *Chichu'um* con predominancia de grava (LPli); y *Tzekel* en el que predominan la rocosidad superficial (LPli).

El suelo café-rojizo es un intergrado entre el rojo y el negro, presentando cantidades intermedias de minerales como el cuarzo, la calcita y halloysita, así como de los contenidos totales de Al₂O₃ y P₂O₅ (Tablas 3 y 4).

En estudios de diagnóstico y caracterización se recomienda poner especial atención a los contenidos de materia orgánica, carbonatos, calcio extraíble con acetato de amonio y fósforo extraíble con bicarbonato.

Es ampliamente conocido que la materia orgánica humificada oscurece el color del suelo (Ibarra-F *et al.*, 1995), tal y como ocurre en este estudio. Asimismo, se ha probado que, en el suelo, el color rojo se debe a los contenidos altos de hematita (Torrent *et al.*, 1983; Torrent y Cabedo, 1986; Schwertmann, 1993), como también ocurre en este estudio; pero además, en este caso, otros minerales como la halloysita, boehmita y calcita coincidentemente son de utilidad en la caracterización de los suelos por color.

En la región, el color del suelo puede utilizarse como propiedad distintiva y ser utilizada con éxito en diagnósticos rápidos, tal y como lo hacen los campesinos de origen maya.

La nomenclatura maya considera otras propiedades de la superficie del suelo como la presencia de piedras, grava, afloramientos rocosos y profundidad del suelo que deben ser estudiadas para una mejor comprensión de la heterogeneidad espacial.

CONCLUSIONES

Existe una diferencia clara en MO, Ca y P en los suelos a lo largo del microrelieve, presentándose los valores más altos en el montículo en comparación con las planicies.

Los suelos rojos se localizan en la parte baja del microrelieve, los café-rojizos en el piedemonte y los negros en el montículo. El color del suelo puede ser utilizado, en primer instancia, para distinguir entre suelos diferentes ya que di-

cha propiedad tiene soporte analítico, sin embargo, para aumentar la precisión se hace necesario analizar las propiedades químicas, principalmente P y MO, así como Mn, Ca, Cu, S y K. Adicionalmente, el contenido total de óxidos de Si, Al, Fe y los minerales como la hematita, calcita y boehmita varían con el color del suelo, constituyéndose en propiedades distintivas.



AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT (proyecto 0308P-B9506 y R31624-B) y a la Fundación Rockefeller por el apoyo económico.

REFERENCIAS

- Biscaye, P. I., 1965.** Mineralogy and sedimentation on recent deep sea clay in the Atlantic ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.* 76: 803-832.
- Casper, B. B. y J. F. Cahill, 1996.** Limited effects of soil nutrients heterogeneity on populations of *Abutilon theophrasti* (Malvaceae). *American Journal of Botany* 83(3): 333-341.
- Duch, J., 1992.** Condicionamiento ambiental y modernización de la milpa en el Estado de Yucatán. En: D. ñizumbo, Ch. Rasmussen, L. Arias y S. Teran (Eds). *La modernización de la milpa en Yucatán; utopía o realidad II. Ambiente y recursos genéticos.* CICY, DANIDA. Mérida Yucatán, México.
- Dutilleul, P., 1993.** Spatial heterogeneity and design of ecological experiments. *Ecology* 74(6):1646-1658.
- FAO, 1970.** El reconocimiento de los suelos en la Península de Yucatán. Informe técnico 1 ESR:SF/MEX G. Organización de las naciones unidas. 51 pp.
- Ibarra-F., F. A., J.R. Cox, M.H. Martín-R., T.A. Crowl, D.F. Post, R.W. Miller y G.A. Rasmussen, 1995.** Relationship between Buffelgrass survival, organic carbon and soil color in México. *Soil. Sci. Am. J.* 59: 1120-1125.
- Ilsley, G. C. y E. Hernández X., 1980.** La vegetación en relación a la producción en el ejido de Yaxcabá, Yucatán. En: Hernández y Padilla (Eds). *Seminario sobre producción agrícola en Yucatán.* Mérida, Yucatán, México.
- INEGI, 1997.** Estadísticas del medio ambiente. México. INEGI. Aguascalientes, México.
- Johnson, R. A. y D. W. Wichern, 1991.** *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Third Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs EUA.
- Keeney, D. R. y D. W. Nelson, 1982.** Nitrogen-Inorganic forms. En: Page, A. L., R.H. Miller and D. R. Keeney. (Ed). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Wisconsin, EUA.
- Larson R. y J. Hufnal, 1980.** Oxidative polymerization of dissolved phenols by soluble and insoluble inorganic species. *Limnology and Oceanography*, 25(3):505-512.
- Lean, E. O., 1982.** Soil pH and lime requirement. En: Page, A. L., R.H. Miller and D. R. Keeney. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Wisconsin, EUA.
- Lindsay, W. L. y W. A. Norvelly, 1978.** Development of a DPTA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42:421-428.
- McBride, M. B., 1979.** Reactivity of adsorbed and structural iron in hectorita as indicated by oxidation of benzidine. *Clays and Clay Minerals*, 27:224-230.
- McBride, M. B., 1989.** Surface chemistry of soil minerals. En *Minerals in soil environment.* Soil Science Society of America, Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Nelson, D. W. y L. E. Sommers, 1982.** Total carbon, organic carbon and organic matter. En: Page, A.L., R.H. Miller and D. R. Keeney. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Wisconsin, EEUUA.
- Oades, M. J., 1989.** An introduction to organic matter in mineral soils. En *Minerals in soil environments.* Eds. Dixon y Weed. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, Estados Unidos de América.
- Okalebo, J. R., K. W. Gathua y P. L. Woomer, 1993.** Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual. *Tropical Soil Biology and Fertility Program (TSBF).* Nairobi, Kenya.
- Peniche, N. (Ed), 1994.** Riesgos y oportunidades para el campo yucateco. Mérida Yucatán, México.
- Pool, L. y E. Hernández, 1987.** Los contenidos de materia orgánica de suelos en áreas bajo el sistema agrícola de roza tumba y quema: importancia del muestreo. *Terra* 5(1): 81-92.
- SAS, 1992.** SAS System for Windows 3.95, Release 6.08, Cary, NC, EUA.
- Schwertmann, U., 1993.** Relationships between iron oxides, soil color, and soil formation. En: Bigham J. M. y E.J. Ciolkosz (Eds). *Soil color. Publicación especial 31 de la SSSA.* Madison, EUA.
- Spaargaren, O. C., 1994.** World reference base for soil resources. ISSS-ISSRIC-FAO. Roma, Italia.
- Tabatabai, M. A., 1982.** Sulfur. En: Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Keeney. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties.* American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Wisconsin, EUA.
- Torrent, J., U. Schwertman, H. Fechter y F. Alférez, 1983.** Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Science*, 136:354-358.
- Torrent, J. y A. Cabedo, 1986.** Sources of iron oxides in reddish brown soil profiles from calcarenites in southern Spain. *Geoderma*, 37:57-66.
- Trudgill, S., 1985.** *Limstone geomorphology.* Geomorphology texts. Longman, New York, EUA.





RELACIÓN ENTRE RELIEVE Y SUELOS EN LA ZONA EXHENEQUENERA DE YUCATÁN

Francisco Bautista¹, Héctor Estrada-Medina²,

¹Departamento de Ecología, FMVZ. Universidad Autónoma de Yucatán.

²Maestría "Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales", FMVZ, UADY

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue el estudio de la relación entre los patrones de relieve y las unidades de suelo según la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WBRSR) para explorar la posibilidad de utilizar el patrón de relieve en la elaboración de mapas de suelo 1:20000 en zonas de karst, así como la identificación de las propiedades distintivas de los suelos, con el fin de disminuir el costo de los levantamientos. La zona de estudio se divide en dos subzonas, una con calizas del Plioceno-Mioceno (PM) y otra con calizas del Eoceno (E). Se caracterizaron los patrones de relieve y las rocas superficiales. En cada patrón de relieve, se realizaron calicatas en los montículos y planicies. Se identificaron los estadios y el grado de evolución del paisaje geopedológico. En las dos zonas geológicas y su frontera se reconocieron nueve patrones de relieve. Se encontraron tres tipos de roca y un fragmento de roca (piedra), con base en su densidad y reacción al HCl. No existen diferencias de consideración en el tipo y composición relativa de los minerales presentes en las rocas. Las propiedades de los suelos de planicie utilizadas para su clasificación son: a) Profundidad menor de 10 cm en Leptosol lítico (LPli); b) Presencia de horizonte cámbico (Bw) y evidencia de intemperismo en la roca (canales de disolución) en los Cambisoles (CM); c) En Calcisoles (CL) la evidencia de acumulación de carbonato de calcio (horizonte petrocálcico) en la parte baja del perfil y su profundidad; y d) Acumulación de arcilla (Bt) y profundidad mayor de un metro en Luvisoles (LV). En los suelos de montículo las propiedades distintivas son: 1) Profundidad menor a los 10 cm en LPli; 2) Cantidad de tierra fina < 10% y 90% o más de piedras en Leptosol hiperesquelético (LPhk); 3) Carbonatos secundarios y la profundidad del horizonte petrocálcico en CL, así como la presencia y cantidad de fragmentos de roca. Se identificaron cinco grados de evolución, I y II en la zona PM, III en PM y en la frontera geológica (FG) y IV y V en E. En la zona PM se presentaron los menores grados de evolución, tal y como se esperaba. Los suelos de acuerdo con los grados de evolución del karst presentan las siguientes catenas: Leptosol-Leptosol, Leptosol-Cambisol, Leptosol-Calcisol, Calcisol-Calcisol, Leptosol-Luvisol. La utilización de los patrones de relieve en el estudio de los suelos facilita la comprensión de su distribución, lográndose una caracterización más útil y práctica para la toma de decisiones relacionadas con el uso del recurso suelo.

ABSTRACT

The aim of this work was to study the relationships between the relief pattern and the soil unit using the World Reference Base for Soil Resources (WRBSR) in order to explore the purpose of relief patterns to make soil mapping of karstic zones on a 1:20000 scale, as well as to identifying distinctive soil properties that help decrease soil surveying costs. The study zone comprises two distinctive subzones with rocky limestone substrates dating from the Pliocene–Miocene (PM) and the Eocene (E). Relief patterns and superficial rocks were both characterized; the calcatas were carried out on small hills and plains. The evolution of the geopedological landscape was then identified. Results showed nine relief patterns in the two areas and their boundary, as well as three types of rocks and one fragment of rock (stone) according to their density and reactivity to HCl. Rocks did not show important differences of mineral types and their relative amounts. Soil properties used to classify soils in plains were: a) Soil depth < 10 cm in LPl_i; b) Presence of the Bw horizon and weathering evidence of rocks (dissolution canals) in CM; c) Carbonate calcium accumulation and depth of the petrocalcic horizon in CL; and (d) Clay accumulation [Bt] and depth > 1 m in LV. Distinctive properties for soil classification on hills were: 1) Depth < 10 cm in LPl_i; 2) Amount of fine material < 10% and a proportion of stones > 90% in LPhsk; 3) Carbonate calcium accumulation and identification of a petrocalcic horizon and soil depth, as well as the amount and depth of rock fragments. Five degrees of evolution were identified: I and II for PM, III for PM and the geological frontier, and IV and V in E. The zone PM had the lowest evolution degree. Soils showed the following catenas according to the degrees of evolution: Leptosol–Leptosol, Leptosol–Cambisol, Leptosol–Calcisol, Calcisol–Calcisol, and Leptosol–Luvisol. The use of relief patterns for the study of soils facilitates the understanding of present soil distribution and makes characterizations more useful and practical for decision-making related to soil management.

INTRODUCCIÓN

En México desde la década de los 90's se ha promovido la elaboración de planes de ordenamiento ecológico del territorio (POET), para lo cual se recomienda, en primer término, la realización de un diagnóstico ambiental con cartografía temática a escala 1:20,000 (suelos, geomorfología, uso de suelo y vegetación, entre otros).

En la metodología para el levantamiento de suelos, ha sido bien establecida la influencia de los procesos geomorfológicos sobre sus propiedades y evolución (Nash, 1980; y Gerrard, 1992). Esta influencia resulta particularmente notable en zonas montañosas, con relieves abruptos, donde los procesos geomorfológicos son activos y las variaciones de los tipos edáficos resultan dependientes de la litología y de la geomorfología (Fernández *et al.*, 1998). En estos casos los sensores remotos (imágenes de satélite y fotografías aéreas) son de gran utilidad en la realización de inventarios de suelos. Por esto, la norma oficial mexicana (NOM-023-RECNAT-2,000) para la elaboración de cartografía de suelos 1:20,000 indica que las unidades de fotointerpretación se trazan sobre fotografía aérea de escala mayor al mapa de publicación, como 1:10,000. Todos los linderos se verifican en toda su extensión mediante barreraciones sistemáticas (SEMARNAP, 2000).

Sin embargo, en las zonas cársticas como en el centro de Yucatán, se presentan planicies onduladas con montículos de 1 a 10 m de altura y con cobertura vegetal, con lo que se dificulta la utilización de la fotografía aérea 1:20,000 en la realización de levantamientos de suelo. Además se sabe de la gran heterogeneidad espacial, en la que se encuentran diferentes unidades de suelo a unos cuantos metros de distancia (Duch, 1988; Duch, 1991;

Pope *et al.*, 1996; Bautista *et al.*, 2000; Bautista *et al.*, 2003).

Por otro lado, el costo elevado de los levantamientos de suelo (Zinck, 1990; Ortiz, 1990) ha ocasionado que las prácticas de manejo agrícola del suelo se realicen sin el conocimiento de sus propiedades químicas, físicas y biológicas, así como de los procesos que operan, lo cual origina: la presencia de problemas de degradación edáfica; sobre uso de insumos agrícolas y deficiente disposición de desechos.

Ante este panorama de costos altos de levantamientos de suelo en planicies onduladas, manejo inadecuado del suelo y generación de problemas de degradación del suelo, se hace necesaria la elaboración de métodos de levantamiento de suelos a escala 1:20,000 que disminuyan los costos del estudio del suelo y que contemplen las formas de microrelieve (menor de 1 m de altura de montículos en escala 1:1,000) y mesorelieve (mayor de 1 m y menor de 10 m de altura de montículos en escala 1:10,000 a 50,000).

El objetivo de este trabajo fue el estudio de la relación entre los patrones de relieve y las unidades de suelo según la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRBSR) (FAO, 1999) con la finalidad de explorar la posibilidad de utilizar el patrón de relieve en la elaboración de mapas de suelo 1:20,000 en zonas de karst, así como la identificación de las propiedades distintivas de los suelos, con el fin de disminuir el costo de los levantamientos en zonas de karst.



MATERIALES Y MÉTODOS

ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Hocabá se encuentra en la región central del estado de Yucatán a los 20° 49' de latitud norte y 89° 15' de longitud oeste al interior del pasiaje geomorfológico definido por Lugo y colaboradores (1999) como planicie estructural casi horizontal marginal a la costa de hasta 10 m de altitud (Fig. 1). El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano AW₁(i')g (Orellana *et al.*, 1999). El tipo de vegetación corresponde a selva baja caducifolia (Flores y Espejel, 1994) y los principales usos del suelo son la producción de henequén y la agricultura de roza-tumba-que-ma. Por la geología, la zona de estudio se puede dividir en dos zonas, sureste con calizas del Plioceno y Mioceno (13 a 25 millones de años antes del presente) de color crema y pardo, microcristalinas y con gran cantidad de fósiles y, en el resto de la zona, se tienen calizas del Eoceno (58 millones de años antes del presente) de grano fino silicatadas y con escasa presencia de fósiles.

PATRONES DE RELIEVE

Para la identificación, caracterización y localización geográfica de los patrones de relieve, se analizaron 45 sitios de muestreo fotográfico sobre fotografías aéreas 1:20,000 en escala de grises. Los sitios seleccionados fueron aquellos lugares que no presentaban cobertura vegetal y que permitían la observación de las formas del relieve. Cada sitio de muestreo fue de una extensión de 40,000 m² (200 X 200 m). En cada sitio se contaron los montículos y se midió la superficie y diámetro de las planicies con el módulo AREA del programa *Idrisi* (Eastman, 1997).

En campo se revisaron 74 sitios de muestreo, en ellos se tomó nota del tipo de patrón de relieve de acuerdo con el tamaño de los montículos (altura y diámetro) y la extensión de las planicies, se tomaron muestras de rocas y sus fragmentos.

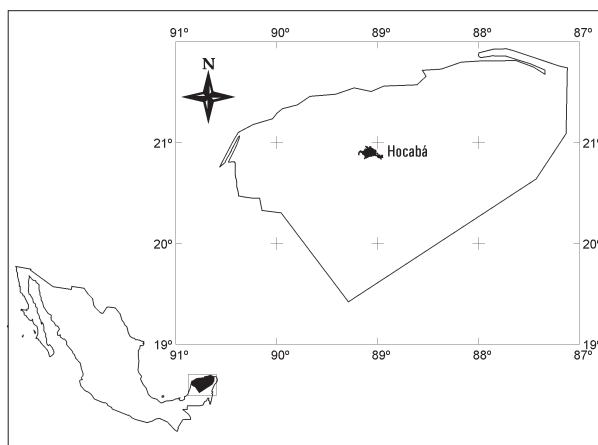


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

Los análisis realizados a las rocas fueron: densidad real (peso en seco y volumen de agua desplazado) y carbonatos por la reacción al HCl al 10%. Los minerales que componen las rocas fueron identificados mediante el análisis de difracción de rayos X (DRX) con un difractómetro *Philips PW-1050*. El contenido total de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, CaO, MgO, K₂O, Na₂O y P₂O₅ se midió por espectroscopía de fluorescencia de rayos X con un espectrómetro secuencial *Siemens SRS 3000* automatizado. Los análisis se realizaron por duplicado.

SUELOS

Una vez seleccionados los patrones de relieve se realizaron las calicatas en las catenas que presentaron los perfiles típicos. Los perfiles de suelo fueron descritos de acuerdo con Siebe *et al* (1996), considerando las principales formas de relieve: planicies y montículos.

Las muestras de suelo fueron tomadas por horizonte para la realización de los análisis físicos y químicos. Los análisis de las muestras de suelo fueron: color por comparación con las tablas *Munsell*; separación y medición de la tierra fina y grava; textura por el método del densímetro de Bouyocus (Okalebo, 1993); pH por el método potenciométrico relación suelo:agua 1:2.5 (Lean, 1982); carbonato de calcio equivalente por el método del calcímetro (USDA *et al.*, 1996); carbono orgánico con dicromato de potasio y aplicación de calor externo (Nelson y Sommers, 1982). Los suelos se clasificaron de acuerdo con la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo (FAO, 1999) y se identificaron las propiedades que permiten formar las unidades de suelo.

RELACIÓN ENTRE EL RELIEVE Y LOS SUELOS

Se identificaron los estadios y el grado de evolución del paisaje geopedológico del municipio de Hocabá, Yucatán con base en el desarrollo de los suelos de la microcatena, que varía de 25 a 50 m de longitud, es decir, considerando al mismo tiempo el suelo de la planicie y del montículo.

Por la geología de la zona de estudio, fue posible diferenciar tres zonas, que corresponden a la época del Plioceno-Mioceno, la época del Eoceno y la frontera entre ambas (INEGI, 1983).

Se exploraron diversas relaciones matemáticas entre las características del patrón de relieve, como número, altura y diámetro de montículos y diámetro de planicies y las características de los suelos, como por ejemplo, la profundidad y el contenido de carbono en la superficie.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

PATRONES DE RELIEVE

En las dos zonas geológicas y su frontera se reconocieron nueve patrones del relieve considerando el número y tamaño (diámetro y altura) de montículos, extensión de la planicie y el tipo de fragmento o de roca superficial (Tabla 1). Los patrones de relieve 3, 5, 7 incluyen dos tipos de montículos siendo, por lo mismo, los de mayor heterogeneidad espacial, dos sitios se localizan en la zona correspondiente al Eoceno y una en la frontera geológica. Las planicies de menor tamaño corresponden a las zonas de mayor grado de evolución (IV y V), tal y como lo sugiere la teoría de evolución del karst en su etapas recientes o tempranas (Cvijic, 1918; Mateo, 1981).

En la zona de estudio se encontraron tres tipos de roca y un fragmento de roca (piedra), nombradas con base en sus características físicas y químicas, como la densidad real, siendo pesadas y ligeras, así como por su reacción al ácido clorhídrico, las rocas son: 1) Ligera y muy carbonatada (LMCar); 2) Pesada y poco carbonatada (PPCar); y 3) Pesada y muy poco carbonatada (PMPCar). El fragmento de roca es ligero y carbonatado (LCar) (Tabla 2).

La roca denominada LMCar es de color blanco a crema, presenta alta porosidad, es la roca de menor consolidación. La LMCar es la roca que presenta mayor cantidad de SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Mn y P_2O_5 (Tabla 3). Casi siempre se encuentra debajo de cualquiera de las otras rocas y es muy semejante al banco de caliza no consolidado.

La roca más abundante en la superficie es la PPCar, se presentan grandes masas de este tipo de roca, tiene microcristales de carbonato de calcio, presenta canales de disolución, se encuentra también en la parte baja de los suelos someros de las planicies. En ella se forman colonias de algas que van solubilizando la roca hasta formar

hoyos, localmente llamados "sartenejas", en donde el suelo y la materia orgánica se acumulan.

La roca PMPCar es de color blanco y presenta cristales de carbonato de calcio grandes, se encuentra en la superficie, se rompe con el calor de la quema agrícola para formar piedras de diámetro entre 15-25 cm, es la roca de menor contenido de SiO_2 y MgO .

El fragmento de roca LCar al romperse por efecto del intemperismo o de la quema agrícola forma gravas (diámetro de 0.2 a 2 cm), presenta granos medianos y es porosa.

No existen diferencias de consideración en el tipo y composición relativa de los minerales presentes en las rocas, únicamente se identifica una mayor cantidad de SiO_2 en LCar, tal como se muestra en los resultados de FRX y DRX (Fig. 2 y Tabla 3).

El origen y evolución de las formas cársticas en la Península de Yucatán no están bien entendidos, las hipótesis con las que se pudiera dar una explicación, son: a) La actividad tectónica por el movimiento de las placas, como por ejemplo, en la sierra de Ticul o la formación de las Islas en Quintana Roo (Lugo, 1992); b) El tiempo de emersión de la roca y su intemperismo debido a la disolución de la caliza (Cvijic, 1918); y c) Las diferencias litológicas por el tipo y tamaño de los minerales. En el caso de la zona de estudio, se esperaba un contraste claro entre las zonas de diferente edad geológica (Plioceno-Mioceno y Eoceno) debido a sus diferencias litológicas; sin embargo, los resultados solo revelan que el relieve muestra una tendencia a presentar planicies de menor tamaño y una mayor variabilidad en el diámetro de los montículos en las zonas del Eoceno. El número de montículos por unidad de área y la altura de los montículos no muestran tendencia alguna.

Tabla 1. Grado de evolución de los sistemas geopedológicos de acuerdo con el relieve y los suelos.

Grado de evolución	Geología	Rocas	Suelos M-P (Profundidad en cm)	DP (m)	DM (m)	AM (m)	NM	PR
I	PM	PMPCar PPCar	LPli-rz (10) y LPli-ro (10)	36.2 ± 19.1	30 ± 5	3.5 ± 0.5	17 ± 4	8
II	PM	PMPCar	LPsk (80) y CMskn-ro (100)	52.2 ± 2.8	25 ± 5	2.5 ± 0.5	10 ± 2	9
III	PM	PMPCar	LPsk (23) y CLptn-ro (75)	36.5 ± 10.3	30 ± 10	4.0 ± 0.5	16 ± 1	4
III	FG	PMPCar	LPrz-sk (18) y CLptn-ro (62)	33.0 ± 3.5	25 ± 5	4.0 ± 0.5	17 ± 2	6
III	FG	PPCar	LPrz-sk (25) y CLptn-ro (63)	40.8 ± 27.9	15 ± 5 23 ± 3	2.0 ± 0.5 4.5 ± 0.5	11 ± 4	7
IV	E	PMPCar LCar	CLtp-sk (35) y CMlep-ro (38)	28.0 ± 8.8	25 ± 5	4.0 ± 0.5	18 ± 9	2
IV	E	PMPCar	CLtp-sk (40) y CLptn-ro (50)	25.4 ± 17.0	15 ± 5 25 ± 5	1.5 ± 0.5 2.5 ± 0.5	9 ± 4	5
IV	E	PMPCar	CLsk (40) y CLptn-lu (80)	30.3 ± 4.8	15 ± 5 30 ± 10	< 1 3.5 ± 0.5	17 ± 6	3
V	E	PMPCar	LPsk (15) y LVro (150)	32.1 ± 2.4	25 ± 5	3.0 ± 0.5	12 ± 1	1

PM= Plioceno-mioceno; FG= Frontera geológica; E= Eoceno; PMPCar= Pesada y muy poco carbonatada; PPCar= Pesada y poco carbonatada; LCar= Ligera y carbonatada; LMCar= Ligera y muy carbonatada; M-P= Montículo-Planicie; DP= Diámetro de planicies; DM= Diámetro de montículos; AM= Altura de montículos; NM= Número de montículos; y PR= Patrón de relieve.



Es posible que esta situación de escaso contraste en el relieve, tal y como lo menciona Lugo y col (1992), se deba a la escasa precipitación (990 mm por año). Además, es posible que las diferencias litológicas sean un factor determinante en la formación del relieve, ya que se podría suponer que las rocas del Eoceno se intemperizaron con mayor

rapidez por ser de grano fino en comparación con las rocas del Plioceno-Mioceno que son microcristalinas (INEGI, 1984), lo cual se fundamenta por la presencia de suelos de mayor desarrollo en la zona del Eoceno, es decir, patrones de relieve con mayor grado de evolución (Tabla 1, Fig. 4).

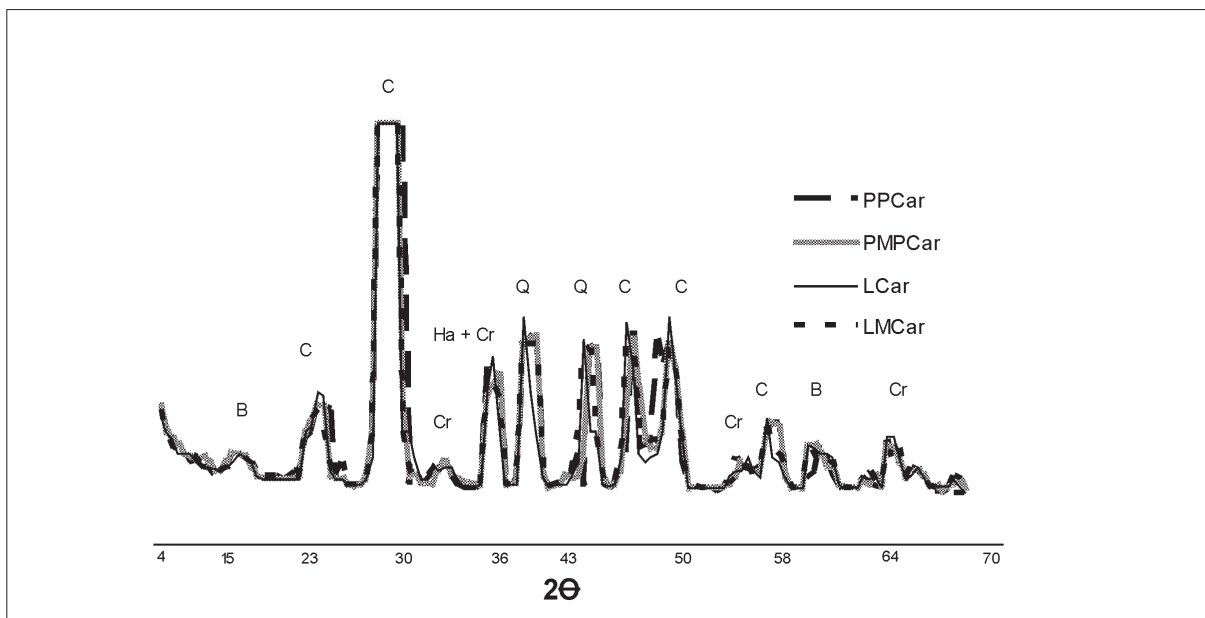


Figura 2. Identificación de los minerales presentes en las rocas. B= Bohemita, C= Calcita, Q= Cuarzo, Cr= Cristobalita, Ha= Halloisita. LCar= Ligera y carbonatada; LMCa= Ligera y muy carbonatada; PPCar= Pesada y poco carbonatada; y

Tabla 2. Propiedades de los fragmentos de roca.

Caliza	Densidad (g cm-3)	Reacción al HCl	Grado de Consolidación	Localización
LCar	1.76	Fuerte	Bajo	Superficie y parte baja del perfil
LMCar	1.98	Muy fuerte	Muy bajo	Parte baja del perfil
PPCar	2.32	Débil	Alto	Superficie y en el perfil
PMPCar	2.48	Muy débil	Alto	Superficie

LCar= Ligera y carbonatada; LMCa= Ligera y muy carbonatada; PPCar= Pesada y poco carbonatada; PMPCar= Pesada y muy poco carbonatada.

Tabla 3. Composición de los fragmentos de roca.

Caliza		SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ t (%)	MnO (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)
LMCar	X	0.58	0.007	0.49	<0.006	0.005	0.59	54.91	<0.03	<0.02	0.024
	±	0.11	0.004	0.05		0.001	0.08	0.05			0.000
LCar	X	1.61	0.019	1.03	0.028	0.008	0.71	52.78	<0.03	<0.02	0.035
	±	0.10	0.004	0.07		0.001	0.02	0.34			0.008
PMPCar	X	0.59	0.007	0.49	<0.006	0.003	0.70	54.57	<0.03	<0.02	0.015
	±	0.26	0.005	0.11		0.001	0.07	0.47			0.001
PPCar	X	0.19	0.006	0.48	<0.006	0.005	0.35	55.13	<0.03	<0.02	0.019
	±	0.01	0.000	0.05		0.001	0.001	0.27			0.003

LCar= Ligera y carbonatada; LMCa= Ligera y muy carbonatada; PPCar= Pesada y poco carbonatada; y PMPCar= Pesada y muy poco carbonatada.

La identificación de los fragmentos de roca permitió el reconocimiento de la relación entre el diámetro de los montículos y su altura, de tal manera que a mayor diámetro de los montículo mayor era su altura (Fig. 3), esta relación existe solo en ausencia de las rocas LCar y PPCar (Patrones de relieve 2 y 6).

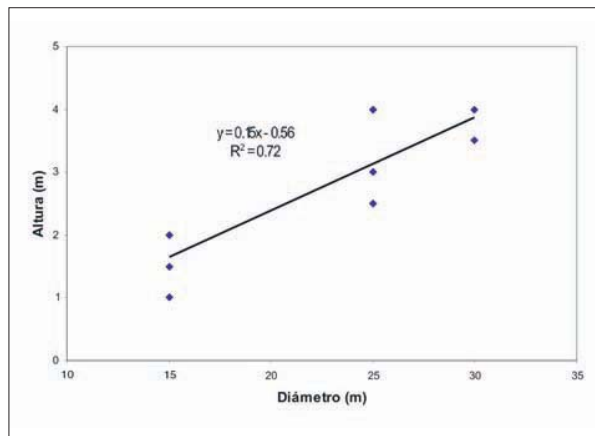


Figura 3. Relación entre el diámetro y la altura de los montículos en los patrones de relieve

La presencia de diversos patrones de relieve puede estar asociada a la composición mineralógica, porosidad y estructura del banco de caliza, características que en su conjunto le otorgan una particular sensibilidad a la disolución, que es el principal procesos en la formación del relieve cárstico. En este sentido, en la zona de Plioceno-Mioceno se encontraron rocas PPCar y en la zona del Eoceno PMPCar principalmente, lo cual apoya la teoría de la influencia de la roca en la presencia de patrones de relieve y suelos entre zonas.

En la Península de Yucatán, la composición química del banco de caliza no es homogénea, se han encontrado cantidades diversas de calcita, dolomita y yeso, así como por cantidades menores de cuarzo, óxidos de hierro, *smectita*, *illita* y *halloisita* (Aguilera, 1958; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2002).

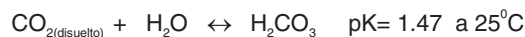
En el karst tropical se ha identificado la existencia de un proceso de separación natural de los componentes de la caliza no consolidada y porosa debido a que después de una precipitación pluvial y durante la desecación se acumulan el CaCO_3 en la superficie formando un relieve ondulado con una costra dura de CaCO_3 sobre los pequeños montículos de tan solo unos 10 a 20 cm de altura (Mateo, 1981; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2002).

Es posible que en la formación del mesorelieve (Porta *et al.*, 1999), los montículos se formen por la acción de dos procesos:

El intemperismo de la caliza debido al lavado del carbonato de calcio (Trudgill, 1985). Primero, la disolución del carbonato de calcio en agua pura se representa con la siguiente reacción:



Al mismo tiempo, la disolución del carbonato de calcio se incrementa por la acidez generada con la disolución de CO_2 .



b) Por la separación de los minerales (calcita y sus impurezas) a nivel superficial, producto de la disolución y posterior precipitación del carbonato de calcio. De acuerdo con el curso del agua de lluvia, en los suelos de planicie se formó un horizonte petrocálcico producto de la translocación del carbonato de calcio a los horizontes subsuperficiales. Estos horizontes se localizan principalmente en los suelos de planicie debido a que es en esta forma del relieve en la que se acumula el agua y por ende en la que se translocan los carbonatos de calcio. Las reacciones netas en la precipitación son:



c) Otro fenómeno que tal vez se presentó en los inicios de la formación del microrelieve fue la precipitación del CaCO_3 en la superficie, producto del ascenso del Ca^{2+} en el agua del manto freático a través del banco de calizas y posterior precipitación como CaCO_3 como producto de la evaporación del agua (Mateo, 1998). Este fenómeno se observa en las minas abandonadas de calcita porosa no consolidada.

Por otro lado, en la identificación de los patrones de relieve, la utilización de las fotografías aéreas 1:20000 son de escasa utilidad cuando los montículos son menores a 3 m de altura o cuando los montículos se encuentran muy cerca uno de otro, ya que pueden confundirse con un montículo de gran tamaño. Otra limitante para la identificación de los patrones de relieve es la cobertura vegetal abundante que no permite la observación de los montículos. Se sugiere que en zonas con dichas características, la exploración de la utilidad de fotografía aérea digital a color escala 1:5000 realizando vuelos en avioneta.

Una ventaja del uso de los patrones de relieve es la extensa red de carreteras y caminos con la que cuenta el estado de Yucatán. Se sugiere la elaboración de mapas topográficos levantados con teodolito en algunas zonas representativas de cada patrón de relieve y/o con mapas a nivel parcela con base en pedregosidad, rocosidad y color de suelo, propiedades de diagnóstico de la nomenclatura maya (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003).

UNIDADES DE SUELO

Los suelos localizados en las planicies presentan mayor cantidad de tierra fina (partículas menores de 2 mm), menor contenido de carbono orgánico y valores de pH cercanos a la neutralidad (Tabla 4).

En cuanto a la clasificación del suelo, en las planicies del paisaje cárstico del municipio de Hocabá, se encuentran las siguientes unidades: 1) Luvisol ródico (LVro) por la presencia de un horizonte Bt, profundidad mayor a los 100 cm y color 2.5YR2.5/4 en húmedo y con predominancia de 2.5YR3/6 en seco; 2) Leptosol lítico ródico (LPli-ro) debido al afloramiento de la roca o por la profundidad del suelo



Tabla 4. Propiedades de los suelos localizados en las planicies.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color en seco	Estructura	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase textural	pH	CaCO3 %	C g kg ⁻¹
Luvisol ródico (PR= 1)										
A1	0-6	5YR2.5/3	G	47.1	25.5	27.5	Migajón	7.4	0.11	6.62
A2	6-20	5YR3/3	BSA	48.0	26.0	26.0	Migajón	6.6	0.08	4.72
Bt1	20-45	2.5YR3/6	BA	40.2	37.7	22.1	MA	6.7	0.08	2.23
Bt2d	45-85	2.5YR3/6	BA	30.4	47.7	22.5	Arcilloso	7.0	0.08	1.83
C1d	85-109	2.5YR4/6	BA	36.8	39.2	24.0	MA	7.1	0.08	1.92
C2d	109-150	2.5YR4/6	MAS	34.3	37.3	28.4	MA	7.2	0.09	1.57
Cambisol epiléptico ródico (PR= 2)										
A	0-11	5YR3/3	BSA	48.8	20.6	31.4	Migajón	7.6	0.06	9.18
Bw1	11-23	5YR3/3	BSA	48.0	19.6	32.4	Migajón	7.6	0.07	8.02
Bw2d	23-38	5YR3/2	BA	46.1	24.5	29.4	Migajón	7.5	0.09	6.78
R										
Calcisol endopéptico lúvico (PR=3)										
A	0-14	5YR4/4	BSA	47.0	20.6	32.4	Migajón	7.9	0.41	7.18
Bt1	14-34	5YR4/5	BSA	39.2	30.4	30.4	MA	6.8	0.07	2.99
Bt2	34-50	5YR4/5	BA	42.2	32.3	25.5	MA	6.8	0.07	2.47
Bt3d	50-80	5YR4/3	BA	37.3	37.2	25.5	MA	6.9	0.06	2.09
Ckm	80-								<40.00	
Calcisol endopéptico ródico (PR= 4)										
A1	0-4	5YR4/3	G	45.1	21.6	33.3	Migajón	7.4	0.52	10.91
A2	4-22	5YR4/4	BSA	49.0	19.6	31.4	Migajón	7.3	0.13	7.14
Bw1	22-33	5YR3/6	BA	54.9	15.7	25.5	MA _n	7.3	0.13	4.70
Bw2d	33-55	5YR4/3	BA	61.8	16.5	22.5	MA _n	7.5	0.39	5.29
BW3d	55-75	5YR4/3	BA	51.0	17.5	32.5	Migajón	7.5	1.53	3.17
Ckm	75-								<40.00	
Calcisol endopéptico ródico (PR= 5)										
A1	0-5	5YR4/4	BSA	47.0	19.0	34.0	Migajón	7.1	0.14	8.98
A2	5-19	5YR3/3	BSA	51.0	21.6	28.0	MAA	6.8	0.11	6.38
Bwd	19-54	5YR3/6	BA	57.0	18.0	25.0	MA _n	7.4	0.08	4.57
Ckm	54								<40.00	
Calcisol endopéptico ródico (PR=6)										
A1	0-4	7.5YR3/3	G	58.0	18.0	24.0	MA _n	7.0	0.40	8.58
A2	4-15	7.5YR3/4	BSA	51.0	18.0	31.0	MA _n	6.4	0.08	6.76
Bw1	15-30	5YR4/4	BA	53.0	18.0	29.0	MA _n	6.3	0.08	4.50
Bw2d	30-42	5YR4/4	BA	52.0	20.0	28.0	MA _n	6.4	0.08	5.55
Bw3d	42-62	5YR4/4	BA	48.0	20.0	32.0	Migajón	6.7	0.09	6.31
Ckm	62								<40.00	
LPli-ro (PR= 8)										
A1	0-9	5YR 4/4	BSA	43.0	19.0	38.0	Migajón	7.4	0.37	8.14
A/R	9-	5YR 4/6	BA	55.0	12.0	32.0	MA _n	6.8	0.08	5.61
Cambisol endoesquelético ródico (PR= 9)										
A1	0-9	5YR3/3	BSA	42.0	26.0	32.0	Migajón	7.2	0.10	9.98
A2	9-17	5YR4/4	BSA	50.0	22.0	28.0	Migajón	7.0	0.09	6.38
Bw1d	17-39	5YR4/6	BA	51.0	21.0	28.0	Migajón	6.9	0.06	5.80
Bw2d	39-56	5YR4/6	BA	58.0	16.0	26.0	MA _n	7.0	0.08	4.01
C1d	56-100	5YR4/6	BA	47.0	19.0	33.0	Migajón	7.2	0.09	4.21
R	100-									

G= Granular; BSA= Bloques subangulares; BA= Bloques angulares; MAS= Masiva; MA= Migajón arcilloso; MA_n= Migajón arenoso; MAA= Migajón arcillo arenoso.



Tabla 5. Propiedades de los suelos localizados en los montículos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Color en Seco	Estructura	Arena %	Arcilla %	Limo %	Clase textural	pH	CaCO ₃ - %	C g kg ⁻¹
Calcisol epipétrico esquelético (PR= 2)										
Ak	0-4	10YR3/3	G	49.0	19.6	31.4	Migajón	8.0	29.62	12.36
Bk	4-20	10YR4/3	BSA	53.9	31.4	14.7	MAA	8.2	35.33	6.56
Bk	20-35	10YR4/1	BA	52.9	21.6	25.6	MAA	8.3	36.40	7.52
Ckm	35-40								<40.00	
A	40-60	10YR5/1		59.8	19.6	20.6	MA _n	8.6	37.30	6.15
R	60-									
Calcisol esquelético (PR= 3)										
Ak	0-1	7.5YR2.5/1	G	70.6	15.7	13.7	MA _n	8.0	12.43	26.17
Ak/C	1-45	7.5YR3/1	BSA	58.8	17.6	23.5	MA _n	8.0	4.00	21.19
R										
Leptosol hiperesquelético (PR= 4)										
A	0-7	5YR2.5/1	G	63.7	15.7	20.6	MA _n	7.8	31.46	20.08
A/C	7-23	5YR2.5/1	BSA	71.6	13.7	14.7	MA _n	7.7	43.00	16.61
R	23-									
Calcisol epiléptico esquelético (PR= 5)										
Ak	0-1	7.5YR2.5/1	G	55.0	20.0	25.0	MAA	8.0	41.42	17.80
Ak/Ck	1-15	7.5YR4/3	BSA	62.7	13.7	23.5	MA _n	8.1	33.87	11.27
Ck/Ak	15-50	7.5YR4/3	BSA	62.7	15.7	21.6	MA _n	8.0	42.20	11.34
R	50-									
Leptosol réndzico esquelético (PR=6)										
Ahk	0-3	7.5YR3/1	G	65.0	26.0	9.0	MAA	7.3	32.77	18.03
Ahk	3-18	7.5YR3/1	BSA	58.0	18.0	24.0	MA _n	7.5	28.28	14.24
R	18-									
Leptosol lítico réndzico (PR= 8)										
Ah	0-10	7.5YR3/1	G	61.0	14.0	25.0	MA _n	7.7	45.98	13.65
R	10-									
Leptosol hiperesquelético (PR= 9)										
Ak	0-2	7.5YR2.5/1	G	69.0	11.0	20.0	MA _n	7.5	36.47	29.02
A/C	2-22	7.5YR3.5/1	BSA	67.0	13.0	20.0	MA _n	7.7	43.64	24.75
C/A	22-80	7.5YR4/1	BSA	71.0	12.0	17.0	MA _n	7.8	46.38	10.48
R	80-									

G= Granular; BSA= Bloques subangulares; BA= Bloques angulares; MA_n= Migajón arenoso; MAA= Migajón arcillo arenoso.

menor a 10 cm, se utiliza el término ródico para diferenciar estos suelos de los LPl_i encontrados en los montículos, con ello, se denota el color rojizo de tierra fina que generalmente se encuentra en mayor cantidad; 3) Calcisoles epipétricos (CLptp) por la profundidad del horizonte petrocálcico; y 4) Cambisoles ródicos o lépticos, se identifican porque la roca se encuentra en proceso de intemperismo debido a la presencia de canales de soliflucción, también por la profundidad mayor de 100 cm, lo cual los excluye de pertenecer a la unidad Calcisol, y por el escaso desarrollo del perfil, lo cual da origen al horizonte B cámbico.

La formación del horizonte petrocálcico, teóricamente se explica por la translocación del carbonato de calcio de

la superficie hacia los horizontes de mayor profundidad y su posterior litificación. Este proceso se encuentra documentado con amplitud (FAO, 1999) y en la zona existen evidencias de su formación, como son: 1) La ausencia de carbonatos en la tierra fina de los suelos de las planicies; 2) La presencia de estructuras que denotan la acumulación del carbonato de calcio en la roca; 3) La presencia de suelos con fragmentos de caliza en la parte baja del perfil y que se encuentran rodeados de tierra fina que no tiene carbonato de calcio y que constituyen un paso intermedio entre Cambisoles y Calcisoles.

Los suelos de las planicies presentan el mismo color del suelo en la superficie en diversos patrones de mesore-

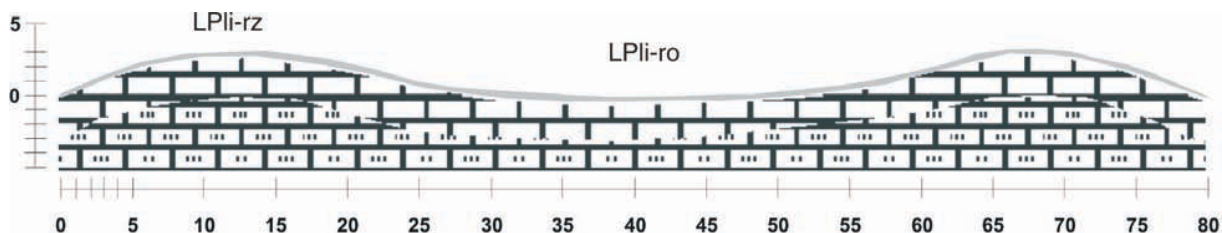


lieve lo cual haría suponer escasa variabilidad; sin embargo, se encontraron LP, CM, CL y LV.

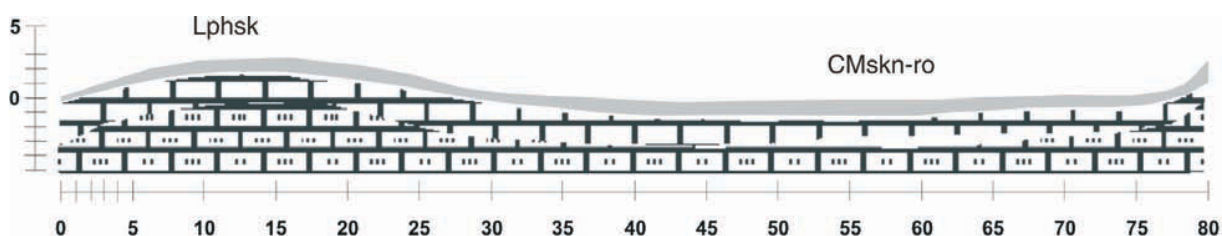
En los montículos se encuentran LP y CL, ambos presentan altos contenidos de materia orgánica, escasa cantidad de tierra fina, fases pedregosas, valores de pH alcalinos, colores oscuros (pardo a negro) (Tabla 5). Los LP pueden ser: 1) Leptosol réndzico esquelético (LPrz-sk); 2) Leptosol hiperesquelético (LPhsk); 3) LPLi; 4) Calcisol epipétrico esquelético (CLptp sk); y 5) Calcisol esquelético (CLsk). Los CL encontrados en los montículos se localizan en la zona E. De manera general, en los montículos se tie-

nen principalmente suelos de escasa profundidad, y por lo tanto con problemas de profundidad efectiva. En estos suelos se dificulta la utilización de maquinaria agrícola.

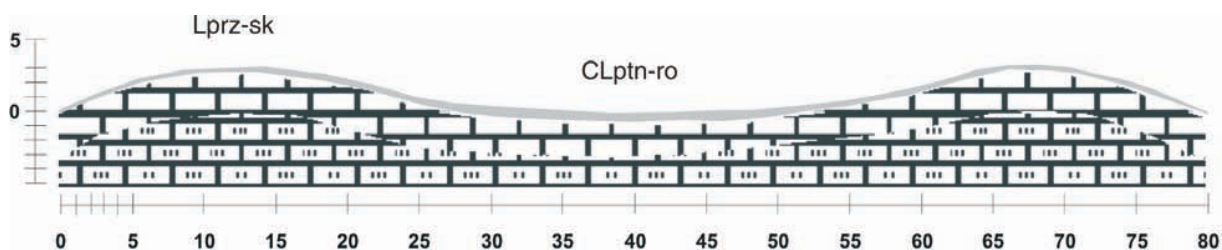
Las propiedades de los suelos que permiten su clasificación de manera sencilla y práctica son: posición en el relieve, color, profundidad, pedregosidad y/o rocosidad y la cantidad de CaCO_3 . Las fases y la posición en el relieve pueden ser utilizadas como criterio de mecanización potencial; la profundidad, como criterio de extensión radical potencial o profundidad efectiva y el color por la fertilidad (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003).



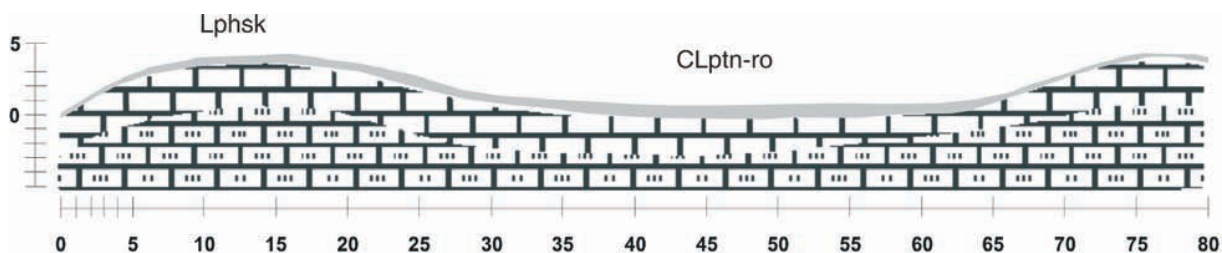
Grado de evolución I. Patrón de relieve 8 con LPLi-rz y LPLi-ro



Grado de evolución II. Patrón de relieve 9 con LPhsk y CMskn-ro



Grado de evolución III. F. Patrón de relieve 6 con LPrz-sk y CLptn-ro



Grado de evolución III. Patrón de relieve 4 con CLptn-ro y LPre-sk

Figura 4a. Grados de evolución de los geosistemas cársticos con base en los patrones de relieve y suelos.

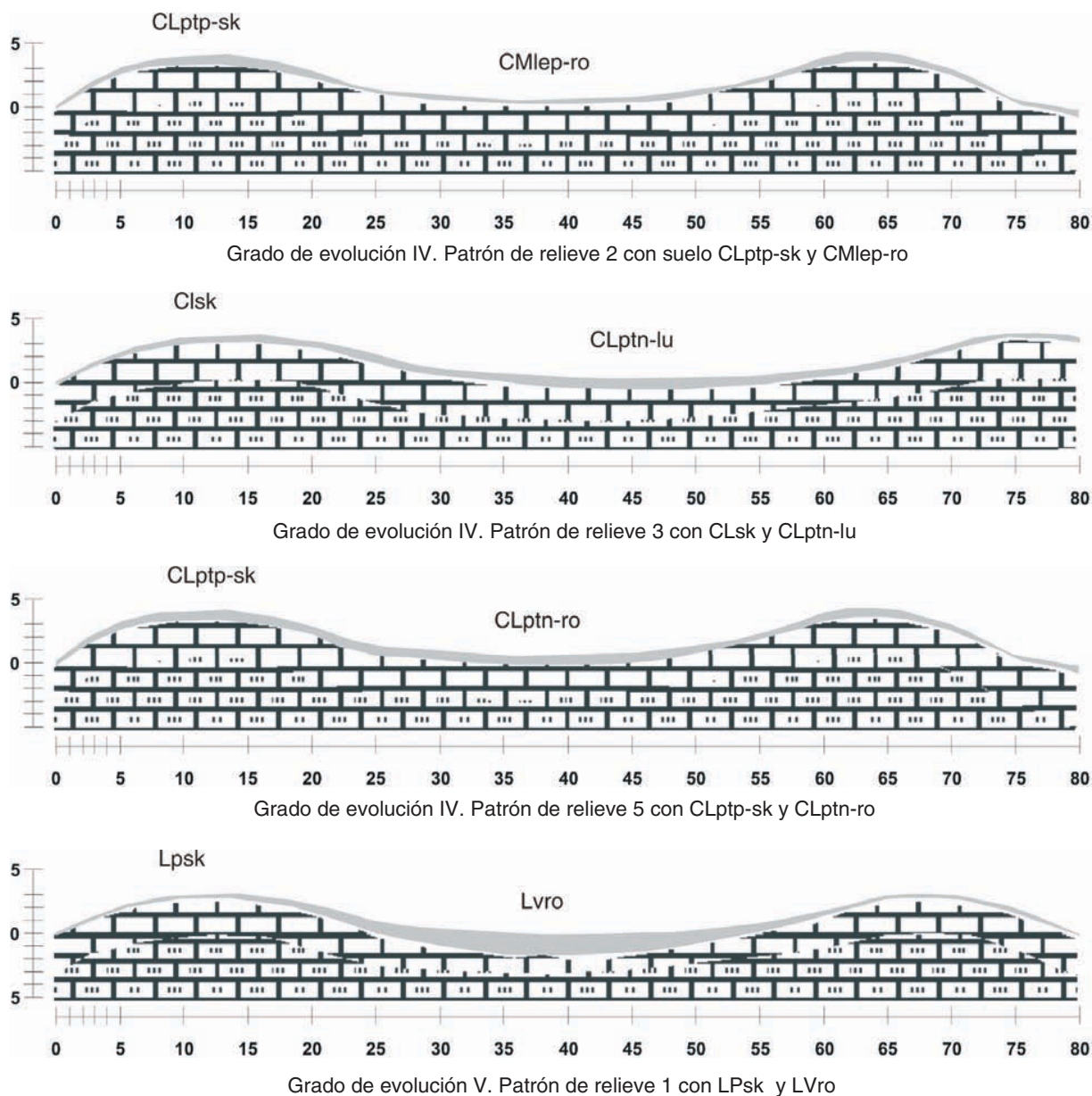


Figura 4b. Grados de evolución de los geosistemas cársticos con base en los patrones de relieve y suelos.

RELACIÓN RELIEVE SUELOS

De acuerdo con las características del mesorelieve y el desarrollo de los suelos, se identificaron cinco grados de evolución, tres en la zona Plioceno-Mioceno compartiendo el tercer grado de evolución con la frontera geológica y dos en la zona del Eoceno (Tabla 1). Las zonas de menor tiempo geológico de formación y con rocas microcristalinas presentaron los menores grados de evolución, tal y como se ha encontrado en otros trabajos realizados en la misma zona de estudio (Pope, 1996).

La altura y el diámetro de los montículos no tiene relación con el grado y evolución, solo el diámetro de la planicie indica que a mayor grado de evolución del karst, menor tamaño de planicie (25 a 32 m), lo cual parecería una contradicción con la teoría del karst en ambientes tropicales, en los cuales dominan las formas positivas del relieve y a mayor grado de evolución presentan mayor altura de las formas de relieve (Mateo, 1981; Trudgill, 1985). Sin embargo, como el karst de la zona de estudio se encuentra en sus etapas recientes de formación, las formas positivas del relieve (montículos), comienzan a formarse, motivo por el cual la expresión altitudinal es escasa y los piedemon-



título son extensos, lo cual reduce el tamaño de las planicies en los mayores grados de evolución. En las regiones de mayor precipitación pluvial (1047 mm), como en el sur de la península de Yucatán, la altura de los montículos aumenta, los piedemontículos disminuyen y las planicies son de mayor tamaño, todo esto hace que el relieve y los suelos muestren un mayor grado de evolución.

La relación relieve y suelos en zonas de karst ha sido escasamente estudiada (Pope *et al.*, 1996; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2002). En este caso, los suelos de las planicies de menor tamaño y de los mayor tiempo de formación presentan suelos de mayor desarrollo pedogénico. Los suelos de acuerdo con los grados de evolución del karst presentan las siguientes catenas: LP-LP, LP-CM, LP-CL, CL-CL y LP-LV (Tabla 1).

CONCLUSIONES

La utilización de los patrones de relieve en el estudio de los suelos facilita la comprensión de su distribución, lográndose una caracterización más útil y práctica para la toma de decisiones relacionadas con el uso del recurso suelo; sin embargo, la fotografía aérea 1:20,000 es de escasa utilidad en la elaboración de mapas de suelos a la misma escala.

Las propiedades de los suelos de planicie utilizadas para su clasificación son: a) Profundidad menor de 10 cm en LPli; b) Presencia de un horizonte cámbico, evidencia de intemperismo en la roca (canales de disolución) y au-

sencia de horizonte petrocálcico en los CM; c) En CL evidencia de acumulación de carbonato de calcio (horizonte petrocálcico) en la parte baja del perfil y su profundidad; y d) Acumulación de arcilla (Bt) y profundidad mayor de un metro o ausencia de horizonte petrocálcico en LV. En los suelos de montículo las propiedades distintivas son: 1) Profundidad menor a los 10 cm en LPli; 2) Cantidad de tierra fina < 10% y 90% o más de piedras en LPshk; 3) En CL la cantidad de carbonatos de calcio en la tierra fina o la identificación del horizonte petrocálcico, así como la presencia y profundidad de fragmentos de roca.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de maestría del segundo autor. Al CONACYT (Clave R31624-B) y al *American Institute for Global Change Research* por el financiamiento. Al Dr. A. J. Zinck por la revisión del manuscrito.

REFERENCIAS

- Aguilera H., N., 1958.** Suelos. En: Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento, 2ª Parte. Tomo II. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables. México D.F., México.
- Bautista-Zúñiga, F., H. Estrada-Medina, C. Delgado-Carranza y M. Sosa-Padilla, 2000.** Propuesta metodológica para el levantamiento de terrenos en zonas cársticas de la Península de Yucatán. Jaina 10(1): 7-9.
- Bautista-Zúñiga, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro-Alberto, A. Manu y R. Lozano, 2003.** Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. Terra 21:1-11.
- Cvijic, J., 1918.** "Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst", Rev. Trab. Inst. Geog. Alpine, 6(4): 375-426.
- Duch, J., 1988.** La conformación territorial del estado de Yucatán -Los componentes del medio físico-. Centro Regional de la Península de Yucatán (CRUPY), Universidad Autónoma de Chapingo. Edo de México, México.
- Duch, J., 1991.** Fisiografía del estado de Yucatán - su relación con la agricultura-. Centro Regional de la Península de Yucatán (CRUPY), Universidad Autónoma de Chapingo. Edo de México, México.
- Eastman, R. J., 1997.** Idrisi para windows 2.0 Clark University Graduate School of Geography. Worcester, MA, USA.
- FAO, 1999.** Base referencial mundial del recurso suelo. World Soil Resources Reports 84. ISSS-ISSRIC-FAO. Roma, Italia.
- Fernández, S., J. Marquínez y R. Menéndez, 1998.** Una aproximación a la cartografía de suelos en un área de montaña templada: Valle de Perlunes (Cordillera cantábrica, NO España. In: CD. *Symposium 17*, Congres Mondial de Science du Sol. Montpellier, Francia.
- Flores, S., e I. Espejel, 1994.** Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora yucatanense, Fascículo 3. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida Yucatán, México.
- Gerrard, J., 1992.** *Soil Geomorphology: An integration of pedology and geomorphology*. Chapman y Hall. London, UK.
- Houba, J., J.J. van der Lee, I. Novozamsky y I. Walinga, 1988.** *Soil and plants analysis, Part 5. Soil Analysis Procedures*. Wageningen University, Wageningen., The Netherlands.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1983.** Carta geológica 1:250000. Secretaría de Programación y Presupuestos. México D.F.



Lean, E.O., 1982. Soil pH and lime requirement. pp 199-224. *In:* Page, A. L., R.H. Miller and D. R. Keeney (eds). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison WI.

Lugo, J., J. F. Aceves-Quezada y R. Espinosa-Pereña, 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista 10(2): 143-150.

Lugo, J., 1999. Geomorfología. En: Atlas de procesos territoriales de Yucatán. Chico P P (Ed). Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, México.

Mateo, J., 1981. Morfología cárstica. Ministerio de educación superior. La Habana, Cuba.

Nash, D., 1980. Forms of bluffs degraded for different lengths of time in Emmet County. Earth Surface Processes, 5: 331-383.

Nelson, D.W. y L. E. Sommers, 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp 535-577. *In:* Page, A.L., R.H. Miller and D. R. Keeney. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI.

Okalebo, R., K.W. Gathua y P.L. Woomer, 1993. Laboratory methods of soil and plant analysis: A working manual. Tropical Soil Biology and Fertility Program TSBF, Kenya.

Orellana, L.R. (Ed), 1999. Evaluación climática. *In:* Chico P. P. (Ed). Atlas de procesos territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, México.

Ortiz, C., D. Pájaro y V. Ordaz, 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México, México.

Pope, O., A. Ocampo, G.L. Kinsland y R. Smith, 1996. Surface expression of the Chicxulub crater. Geology. 24(6): 527-530.

SEMARNAP, 2000. Proyecto de norma oficial mexicana PROY-NOM-023-RECNAT-2000, que establece las especificaciones técnicas que deberá contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelo. SEMARNAP. México, D.F., México.

Siebe, C., R. Janh y K. Stahr, 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Publicación especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Edo. de México, México.

United State Department of Agriculture, 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigations report No. 42 version 3.0. United State Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center. Washington D.C.

Trudgill, S., 1985. Limestone geomorphology. Geomorphology texts. Longman, New York.

Zinck, J.A., 1990. Soil survey epistemology of a vital discipline. International Institute for aerospace survey and earth science (ITC). Enchede, The Netherland.



MAPAS PARCELARIOS DE SUELOS EN MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO

**Soledad Díaz-Garrido¹, Francisco Bautista²,
Carmen Delgado² y Miguel Castillo-González^{1,2}**

¹*Facultad de Estudios Superiores-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México*

²*Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán*

RESUMEN

El presente estudio se realizó en la localidad de Xmatkuil, al Sur de Mérida, Yucatán, antigua zona henequenera; su geomorfología es una planicie cárstica; plana a ligeramente ondulada, con dolinas, valles ciegos y secos, montículos hasta dos metros de altura y abundantes afloramientos rocosos. Se analizó la textura, color, densidad aparente y real, contenido de carbono orgánico, capacidad de campo y profundidad de 54 subparcelas, agrupadas en función de su grado de similitud para elaborar mapas parcelarios. El análisis de componentes revela que los dos primeros ejes explican el 57% de la variación esperada. Las propiedades distintivas son porcentaje de limos, contenido de carbono orgánico, densidad aparente y densidad real, en ese orden al realizar el análisis de conglomerados, se obtuvieron seis grupos. Se identificaron tres colores de suelo: rojo (5 YR), café-rojizo (7.5 YR) y negro (10 YR). En las partes bajas del microrelieve se encuentra suelo rojo, sin rocas, ni piedras; al pie de los montículos suelos café rojizo asociado a piedras y rocas; en la parte alta, afloramientos rocosos y escaso suelo negro.

ABSTRACT

This study was done at Xmatkuil locality, in South side of Merida, Yucatan, in the olden sisal zone; its geomorphology is a karstic plain; flat to wavy softly, with hallow, blind valley and dry, hills until two meter height and abundant rocky bloom. It was analyzed texture, color, apparent and real density, organic carbon content, field capability and depth from 54 subplots, they were grouped according to its similarity degree to make parcelary map. The component analysis demonstrates that the two first axes explain the 57% expected variation. The distinctive properties are loam percentages, organic carbon content, apparent and real density, this was the order to develop the conglomerate analysis, it was obtained six groups. It was identified three soil colors: red (5 YR), reddish brown (7.5 YR) and dark (10 YR). In the lower areas of the microrelief is present the red soil without rock neither stones; in the side down of the hill the reddish brown soil were associated with stone and rock, in the side up were found superficial rock and scarce dark soil.

INTRODUCCIÓN

Los Leptosoles son los suelos más ampliamente distribuidos a nivel mundial, cubriendo una superficie de alrededor de 16,655 millones de hectáreas (FAO/UNESCO, 1999). En México, ocupan alrededor del 23.96% de la superficie del país y en el estado de Yucatán más del 80% de su superficie. Las zonas cársticas son planicies onduladas en las que predominan suelos someros con alta heterogeneidad, que dificulta la realización de inventarios de suelos y la experimentación agrícola debido, entre otras cosas, a la alta heterogeneidad del terreno, a la escasa expresión del relieve y al costo elevado de los levantamientos.

La falta del conocimiento íntegro sobre aspectos pedológicos y ambientales, es la principal limitante para generar propuestas y estrategias de planeación que mejoren las actividades agrícolas y de conservación del suelo. La difusión de prácticas agrícolas exitosas se dificulta cuando no se considera que a cortas distancias se pueden encontrar diferentes tipos de suelo. Es necesario proponer programas agrícolas, forestales y pecuarios en función de dicha heterogeneidad edáfica, con el fin de mejorar el uso de la tierra; en otras palabras la diversidad edáfica requiere diversidad de cultivos (Bautista *et al.*, 2003).

La heterogeneidad espacial del suelo (HES) se refiere a las medidas de variación de las diferentes unidades de suelo en un área determinada; su entendimiento comprende patrones de distribución en forma de parches, así como la identificación de las propiedades distintivas de cada uno. Lo anterior ayuda a comprender muchos de los procesos ecológicos como son la diversidad genética, dinámica de poblaciones, competencia, depredación, reparto de hábitat, disponibilidad de alimento, estructura de las comunidades vegetales y pequeños animales. La consideración de la HES permitirá el diseño y sugerencias de opciones, con mayores probabilidades de éxito, para el manejo de los recursos naturales que dependen del suelo (Legendre y Legendre, 1983).

En la búsqueda de propiedades edáficas claves para distinguir un suelo de otro, el análisis multivariado y espacial permiten realizar interpretaciones que no se alcanzan con métodos estadísticos univariados. También es posible establecer grupos similares para estudios descriptivos y detectar relaciones entre una asociación de suelos con base en los valores de sus propiedades edáficas y en su localización en el espacio.

Con los estudios de distribución espacial, se conocen las correlaciones espaciales de variables físico-naturales de los recursos naturales, como el suelo. Los avances realizados por la ciencia del suelo consideran la importancia de este recurso en temas ambientales, contaminación, organización territorial, desarrollo económico sustentable, producción de alimentos y productos industriales, fijación de carbono, entre otros (Dutilleul, 1993).

En una selva subtropical en Brasil, Sparovek y Camargo (1990) encontraron que la geoestadística, es la técnica que mejor determinó la variabilidad de parámetros con el fin de evaluar los ciclos de nutrientes: Representó mejor a la naturaleza del suelo y proporcionó información sobre los puntos del terreno que no fueron considerados en el muestreo.

La información edáfica puede ser representada espacialmente en forma de mapas mostrando las áreas donde se puede llevar al cabo la agricultura en función de las propiedades que afectan directa e indirectamente a los cultivos y al suelo. Estos mapas permiten la evaluación preliminar de una localidad con respecto a su mayor o menor adaptabilidad para determinados cultivos y ayudan a deducir los lineamientos generales concernientes a la clase de manejo que pueda requerir una parcela de suelo (Córdova, 2001). Igualmente sirven para distinguir la distribución de diferentes unidades edáficas y por lo tanto, proponer diferentes tratamientos y manejo (Teuscher *et al.*, 1985). La correcta interpretación de los mapas de suelos requiere un conocimiento especializado.

Otro estudio donde la geoestadística sirvió para determinar el grado de afectación del suelo por el depósito a través del viento de metales traza (As, Pb y Cd) se realizó en terrenos aledaños a una presa minera en los límites del Desierto Chihuahuense. Se elaboraron mapas que mostraron el patrón de comportamiento, la ruta de dispersión y distribución espacial de dichos metales. Esta información permitió diseñar la remediación del sitio (Sommer *et al.*, 2000).

Tapia *et al.*, (1995) realizaron un estudio de correlación de variables edáficas y desarrollo de cucurbitáceas a partir de las propiedades edáficas como la pendiente, profundidad del suelo y conductividad eléctrica, que resultaron ser menos limitativas para el desarrollo de las plantas. En este sentido, se destaca la aplicación de los métodos modernos para la obtención de áreas potenciales de alta productividad, dependiendo de factores ambientales que interactúan con los probables cultivos.

En la zona cañera de Córdoba, Veracruz, Bautista *et al.*, (1998) realizaron una clasificación numérica y la elaboración de mapas a partir de la selección de propiedades consideradas distintivas para la elaboración de mapas que fueran rápidos y baratos; dentro de ellas se encuentran el pH, DR y textura. Con estas propiedades se podría estimar la capacidad de intercambio catiónico con DR, el drenaje interno con textura, la fijación de fósforo con pH, las reservas minerales con textura; riesgo de erosión con textura, entre otras.

Si se identifica la distribución espacial de los atributos del suelo (Piedras, Rocas, Carbón Orgánico, Densidad aparente, Densidad real, Arcilla, Limo, Arena, Profundidad y Capacidad de Campo) y se establecen sus correlaciones, entonces, sobre una base analítica, se podrá proponer y aplicar un método de levantamiento de suelos en zonas cársticas del estado de Yucatán, que sea rápido y económico.

El objetivo de este trabajo fue el diseño de un método de levantamiento de suelo a nivel parcela en zonas cársticas, basado en la identificación y estimación de propiedades edáficas de bajo costo, mediante: a) La identificación de propiedades físicas y químicas de bajo costo, que tengan un soporte analítico, para la formulación del método de levantamiento de suelos a nivel parcela; b) La exploración de la importancia del color del suelo como propiedad distintiva y conocer su soporte químico; c) La evaluación



de la posibilidad de utilizar la pedregosidad y rocosidad superficial como propiedades distintivas; y d) La elaboración de un mapa parcelario del área estudiada que sirva de fundamento para el diseño del método de levantamiento de suelos.

Bautista *et al.*, (2003), encontraron que el color del suelo como propiedad distintiva permite inferir estimacio-

nes acerca del contenido de materia orgánica, Ca y P Olsen, así como el contenido total de óxidos de Si, Al y Fe. Las propiedades mineralógicas distintivas de los suelos por color son: hematita, calcita y bohemitita. El color puede ser utilizado en primer instancia para distinguir los diferentes tipos de suelo, sin embargo, para aumentar la precisión es necesario analizar las propiedades químicas y mineralógicas mencionadas.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Los estudios de agricultura y manejo de recursos naturales se han enfocado a desarrollar, buscar, interpretar y aplicar métodos de análisis de suelo, planta y agua, para obtener sistemas agrícolas sustentables, manejar eficientemente los recursos naturales y conservar el ambiente. La química analítica de las propiedades de los suelos se enfrenta a la variabilidad extrema de los nutrientes en suelos cultivados. Para dar respuesta y solución a esta deficiencia se ha desarrollado la agricultura de precisión (Arnold *et al.*, 1990).

La agricultura de precisión se refiere al monitoreo y control electrónico aplicado a la recolección de información y su procesamiento como soporte de decisión para la ubicación espacial y temporal de insumos en la producción de cultivos. Está basada en tecnologías como los sistemas de información geográfica y sistemas de posición geográfica. Su rentabilidad depende en mayor medida del aumento del rendimiento más que del ahorro en insumos. A este método de selección y planificación de suelo se le conoce también como agricultura de sitio específico. Consiste en identificar y localizar los diferentes tipos de suelo con el fin de: a) Planificar el uso de compuestos químicos, como fertilizantes y pesticidas; b) Implementar técnicas de manejo de suelo y sistemas de cultivo; y c) Monitorear y registrar la producción de cultivos en un intervalo de tiempo determinado.

Para obtener la información y los conocimientos necesarios sobre el tipo de suelo se elaboran mapas y se usan sensores. La elaboración de mapas requiere de un muestreo del sitio, descripción de las variables ambientales, formas de gestión del recurso, análisis de laboratorio de propiedades claves. Ésto permite monitorear y designar el área de suelo que sea adecuada para el cultivo que se pretende manejar. Con el uso de sensores se miden las propiedades del suelo, posteriormente se realiza una respuesta a la señal obtenida, por ejemplo, la aplicación de un tipo de fertilizante.

TIPOS DE MAPAS

Los mapas tipo Vectorial y Raster pueden utilizarse para representar la información edáfica. El mapa Vectorial, es la forma más común para representar los datos espacia-

les, emplea segmentos de líneas o puntos para identificar sitios o atributos cartografiados (carretera, corrientes, límites, etc.). La localización se describe por pares de coordenadas a partir de los cuales se construyen los elementos espaciales (puntos, líneas y áreas). Los objetos vectoriales no necesariamente llenan el espacio, no todos los sitios en el espacio tienen que ser referenciados en el modelo. Las capacidades del modelo vectorial radican en que la mayoría de las operaciones, tiene que ver con objetos, las medidas del área se calculan a partir de las coordenadas en vez de conteo de celdas, algunas operaciones más precisas (superficie, perímetro), utilizan puntos y polígonos, lo que permite desplegar los objetos almacenados y los atributos así como las distintas entidades pueden ser mostradas en colores, patrones de líneas y símbolos.

Con los mapas tipo Raster, se muestra de la manera más simple una estructura de datos. Implica el manejo de áreas referida a una matriz de puntos (malla de celdas) comúnmente cuadrada o rectangular. De modo general, el área de estudio es dividida por una cuadrícula regular de celdas en una secuencia específica, convencionalmente línea por línea desde la esquina superior izquierda, partiendo de que cada celda tiene un valor único para cada atributo. De este modo, cada sitio en el área de estudio corresponde a una celda en una cuadrícula y un conjunto de celdas y su valor correspondiente constituyen una capa de información. Dentro de las capacidades del modelo raster se pueden destacar el despliegue de capas en colores (cada valor representando un color), en tonos de gris, en perspectiva, así como con leyenda; se realizan operaciones locales (producen una nueva capa de información a partir de una o más capas; recodificación; operaciones aritméticas (media, escalamiento, máximos y mínimos) y lógicas; operaciones en los vecinos locales (filtrado, pendientes y aspecto); operaciones en la vecindad local (distancia, zonas de amortiguamiento, zonas de visibilidad); y operaciones en zonas (identificación, área y perímetro, distancia a los límites o fronteras y forma de la zona) (Espadas, 2004).

La utilidad de los mapas de suelo, se debe a que presentan las áreas donde se puede llevar al cabo la agricultura en función de las propiedades que afectan directa e indirectamente a los cultivos y al suelo. La correcta interpretación de los mapas de suelos indudablemente requiere un conocimiento especializado. Permiten la evaluación preliminar de una localidad con respecto a su mayor o menor adaptabilidad para determinados cultivos y a deducir los lineamientos generales concernientes a la clase de manejo que pueda requerir una parcela de suelo. Los ma-

pas de suelo sirven igualmente para distinguir la distribución de diferentes unidades edáficas y por lo tanto proponer diferentes tratamientos y manejo.

ANÁLISIS MULTIVARIADO

El análisis multivariado provee métodos estadísticos para el estudio de las relaciones entre variables y establece jerarquías en esta variabilidad. La clasificación multivariada se emplea como herramienta analítica y es capaz de extraer información de datos diversos. Además, pueden usarse para evaluar diferentes características del objeto de estudio a lo largo de gradientes espaciales y temporales (Jackson, 1993).

En el análisis de clasificación, las observaciones (objeto de estudio) son ubicadas en grupos, primero por las medidas de similitud y posteriormente por algoritmos. La reducción en datos es derivada de la formación de grupos, posteriormente se calcula el grado de similitud. Los resultados son expresados en un dendrograma de dos dimensiones que representan las relaciones entre los objetos formando grupos.

El análisis de ordenación reduce las dimensiones a un solo grupo para producir un número pequeño de variables resumidas que son de combinaciones lineales de las variables originales. Frecuentemente, la mayoría de las variaciones puede resumirse con pocos componentes, la matriz de datos puede mostrar gráficas de dos o tres dimensiones que usan los componentes en los ejes, la ordenación consiste en la ubicación de "n" puntos (observaciones) en un espacio en la dimensión "p" (número de variables) de tal manera que el factor más importante es el diseño en la dimensión "p", que sirve para calcular la variación total (Pla, 1986). Esto permite diseñar la distribución multidimensional y determinar la variación de los demás componentes en cada grupo de datos. El análisis multivariado es apropiado cuando los niveles de variación son bajos y cuando los cambios entre las muestras son graduales.

El análisis de componentes es un método estándar de análisis multivariado cuyo objetivo es encontrar combinaciones lineales de variables (p.e. la abundancia de especies) en donde la primera combinación tiene la máxima varianza dado que no está correlacionada con la segunda combinación lineal para la muestra de los casos (por ejemplo, sitios); la tercera combinación lineal tiene la máxima varianza, dado que no está correlacionada con las dos primeras combinaciones, y así sucesivamente. La solución involucra encontrar los valores propios de la matriz de covarianza de las variables de abundancia de especies, usualmente después de que estas variables han sido estandarizadas (Navarro, 1998). Todos los análisis de componentes principales derivan de una matriz de correlación (Herrera, 1994).

La similitud de objetos (muestras) o descriptores (especies) se inicia condensando la matriz básica de datos de Parámetros vs Sitios, en la forma de una matriz cuadrada de asociación entre muestras o entre especies. En la mayoría de los casos, esta matriz de asociación es simétrica y es factible hacerle ordenaciones o conglomerados de los objetos muestras. Así, la estructura revelada por el análisis

numérico es la matriz de asociación y no necesariamente toda la información de la matriz de datos básica (Webster y Oliver, 1990).

El análisis de conglomerados proporciona información sobre la concurrencia de observaciones en un sitio (estructura interna); establece tipos de comunidad para estudios descriptivos (sin taxonomía y mapeo); y detecta relaciones entre comunidades y el ambiente por medio de la revisión de los grupos formados por el análisis de conglomerados con respecto a las variables ambientales (análisis externo). Con este análisis se clasifican sitios, especies o variables. Es una clasificación intrínseca de observaciones o fenómenos, los compara con otras observaciones previas y luego le asigna un número o nombre. Por tanto, es uno de los principales métodos usados en estudios de ecología, dado que genera un rearrreglo de tablas de datos de especies en sitios, seguido por la definición de tipos de comunidad, cada uno caracterizado por la combinación de especies distintivas (Arkley, 1991). Es una forma explícita de identificar grupos en los datos en bruto y ayuda a encontrar estructura en los datos. Sin embargo, aun si hay una estructura continua en los datos, el análisis de conglomerados puede imponer una estructura de grupo.

GEOESTADÍSTICA

La importancia de los estudios de distribución espacial, hace palpable la necesidad de aplicar instrumentos útiles para adquirir conocimientos sobre las distribuciones y correlaciones espaciales de variables físico-naturales. La geoestadística es un instrumento estadístico adecuado y potente basado en las teorías de procesos estocásticos o de variables regionalizadas para la estimación de los fenómenos naturales. Permite una cartografía automática de los parámetros estudiados, a partir del análisis de los resultados del muestreo y de la distribución del recurso natural estudiado (determinación del variograma), además provee otras ventajas tales como proponer esquemas de muestreo propicios según los objetivos de estudio (Porta *et al.*, 1999).

La geoestadística tiene las siguientes características:

- Las estimaciones están basadas en pocas observaciones y espaciadas.
- Los datos siguen una distribución normal-logarítmica.
- Permite la evaluación de la dispersión de valores.
- El semivariograma da un conocimiento cuantitativo de variación y se obtiene una estructura de variación del área de influencia.
- Los métodos de muestreo son más eficientes para la cuantificación de las propiedades del suelo y el rendimiento de cultivos, la aplicación de variables regionalizadas, que son variables distribuidas continuamente con una variación geográfica (Ovalles, 1998).

La información que se desprende de un análisis geostatístico permite estimar valores de propiedades en luga-



res no muestreados, proporciona un comportamiento cerca del origen, estableciendo una zonificación (Journel y Rossi, 1992).

La geoestadística permite modelar esta estructura de dependencia espacial, en caso de no ser detectada, mediante el uso de variogramas, con el objeto de estimar a través del "Kriging", valores en posiciones no muestreadas ("Kriging" puntual); promedios espaciales relativos a una longitud; área o volumen definido ("Kriging" de bloques); y estimación de la proporción de una región donde los niveles de concentración sobrepasan un valor límite.

El "Kriging" es un modelo de regresión usado con datos espaciados irregularmente en coordenadas de una, dos o tres dimensiones. De acuerdo con Myers (1991), la aplicación de las técnicas de "Kriging", tiene los siguientes pasos: a) Análisis exploratorio estadístico de los datos; b) Estimación y modelado de la función cualitativa de la correlación espacial; c) Uso de la función de correlación espacial para determinar una serie de ecuaciones lineales que determinan los pesos del estimador "Kriging"; y d) Generación de valores estimados y las estimaciones de desviaciones estándar (minimizadas) asociadas (Rangel y Enriquez, 1997).

Los resultados se utilizan como entradas para un paquete de contornos, de manera que se pueden obtener mapas con isolíneas, tanto para la variable de interés como para la desviación estándar del "kriging" (Myers, 1991).

La semivarianza muestral es un algoritmo matemático que relaciona el valor de las variables en el lugar cero y el valor de la misma variable en otro punto del muestreo, realizando comparaciones en distancia. La gráfica de la semivarianza muestral y la distancia entre puntos de muestreo da origen al semivariograma muestral, el cual se obtiene a partir de una variable regionalizada que depende de la distancia (Fernández y Rodríguez, 1994).

ELECCIÓN DE PROPIEDADES PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS

La variabilidad del suelo es un factor limitante para predecir con exactitud el comportamiento de los suelos en cualquier posición del paisaje. Es recomendable considerar las variables que sean permanentes (morfológicas, físicas) y menos cambiantes que las consideradas dinámicas (químicas) (Ovalles, 1998).

Para cuestiones agrícolas la caracterización física es adecuada por ser de baja tasa de cambio rápida y económica (p.e. la pedregosidad, rocosidad, profundidad, textura y densidad real), que permiten estimar el drenaje, el desarrollo radical y el soporte de especies de plantas. Las propiedades químicas del suelo responden al ambiente circundante, siguen ciclos y se modifican con respecto al clima y organismos presentes. La elección de propiedades clave que permitan estimar la fertilidad son de suma importancia por su costo económico y en tiempo.

Las propiedades del suelo que fueron consideradas en este estudio son las siguientes:

Color: Refleja las propiedades biofísicoquímicas de relación suelo-planta; indica las proporciones y clases de minerales, la condición de drenaje, aireación y porosidad (Aguilera, 1989). El color puede ser heredado de la roca madre o el resultado de cambios en el clima y contenido de materia orgánica. La coloración depende principalmente de la presencia de coloides orgánicos e inorgánicos y textura. Los procesos de coloración son: melanización, rubefacción, pardificación, lutefacción e inclusive decoloración o leuconización.

Pedregosidad: Se refiere a la cobertura completa o parcial de fragmentos gruesos (mayores de 0.2 cm) (FAO/UNESCO, 1999). Las piedras incorporadas al suelo hacen un efecto de cubierta superficial para almacenar calor y conservar la humedad, que es aprovechado por los cultivos (Teuscher *et al.*, 1985).

Rocidad: Es la proporción relativa de exposición de la roca firme en un área determinada, ya sea en afloramientos rocosos o manchas de suelos muy delgados, sobre lecho rocoso. El término rocoso se usa arbitrariamente para suelos que tienen rocas fijas (roca firme) (Aguilera, 1989).

Textura: Es la propiedad que determina la cantidad de área superficial para que se lleven a cabo reacciones químicas y procesos físicos importantes. Está determinada por la proporción relativa de arena (diámetro de 0.20 a 2.00 mm), limo (de 0.02 a 0.002 mm) y arcilla (menor a 2 μ) que con su carga eléctrica negativa atraen cationes y se realiza el intercambio catiónico. Una textura adecuada contiene cantidades iguales de partículas (Dijkerman, 1981; Ortiz y Ortiz, 1990; Flamand, 1995). Cuando el contenido de arenas es mayor, hay erosión eólica, disminuye la disponibilidad de agua y de la Capacidad de Intercambio Cationico (CIC), y hay poca retención de nutrimentos; si dominan los limos es inestable la estructura y cuando las arcillas predominan se dificulta el manejo del suelo.

Capacidad de campo: Es la cantidad de agua que puede retener un suelo por capilaridad. Oscila desde el 5% para los suelos muy arenosos hasta casi un 35% en suelos de textura migajón arcilloso. Se determina fácilmente en un suelo de buen drenaje después de la lluvia o riego pesado: se cubre la superficie del suelo para reducir las pérdidas por evaporación y se dejan dos o tres días para permitir un drenaje libre, después de este tiempo la humedad en la superficie del suelo está a capacidad de campo (Teuscher, 1985).

Profundidad del suelo: Es el espesor de material edáfico favorable para la penetración de las raíces de las plantas, disponibilidad de agua y nutrimentos. Puede medirse directamente en el perfil o a través de barrenaciones (Ortiz y Ortiz, 1990). Los suelos profundos con buen drenaje, textura y estructuras deseables son adecuados para la producción de cultivos.

Densidad real: Comprende la cantidad de partículas sólidas por unidad de volumen del suelo. Es una propiedad de los minerales, que puede ser utilizada como propiedad distintiva en Leptosoles. En la mayoría de los suelos minerales, su valor no excede de 2.2 - 2.5 g cc⁻¹, lo cual se debe



a que el cuarzo, feldespatos y silicatos, principales constituyentes, presentan densidades comprendidas dentro de ese valor. Estos valores son similares cuando existe la presencia de grandes cantidades de minerales pesados como magnetita, epidota, circón, turmalina y hornblenda, entre otros. La materia orgánica repercute en los valores de la densidad, originando valores bajos de densidad real (1.2 a 1.5 g cc^{-1}).

Densidad aparente: Comprende tanto las partículas como el espacio poroso del suelo. Es una propiedad que permite la valoración agronómica del suelo, debido a que de ella dependen principalmente la percolación, infiltración y aireación (León, 1984). Se utiliza en diferentes cálculos y en la caracterización de los horizontes de suelos; por ejemplo: 1) La presencia de capas endurecidas (2.0 g cc^{-1}) provoca problemas en el desarrollo de las raíces de las

plantas; 2) Presencia de amorfos ($< 0.85 \text{ g cc}^{-1}$) como el Alófono en Andisoles; 3) Grado de intemperización, comparando las densidades de los horizontes superficiales con la del horizonte C; 4) Cálculo del peso de una capa de suelo que es un dato indispensable para expresar analitos en kg ha^{-1} .

La materia orgánica del suelo (MOS): Son compuestos bioquímicos de diferente peso molecular como los azúcares, almidones, celulosa, hemicelulosa, ligninas, taninos, grasas, aceites, ceras, resinas, proteínas, (Teuscher *et al.*, 1985) de origen animal, vegetal y microbiano. Puede ser estimada por el contenido de carbono orgánico, dado que está compuesta de carbono entre un 40 y 60%.

MATERIALES Y MÉTODOS

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El estudio se realizó en una parcela de $1,350 \text{ m}^2$, ubicada en Xmatkuil del municipio de Mérida, Yucatán (Fig. 1) en el paralelo $20^\circ 51' 57.36'' \text{ N}$ y el meridiano $89^\circ 37' 23.04'' \text{ W}$. El área pertenece a una planicie cárstica caracterizada por la presencia de un relieve ligeramente ondulado, que presenta dolinas, valles ciegos y secos, con montículos de uno a dos metros de altura y numerosos afloramientos rocosos. El material parental es una capa de roca calcárea de 1.5 m de espesor, localmente conocido como *laja*.

El clima se clasifica como tropical cálido subhúmedo con lluvias en verano en casi toda su extensión (García, 1973).

La vegetación está conformada de selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia (Flores y Espejel, 1994).

Los suelos de la Península de Yucatán reciben diferentes denominaciones, debido a la influencia cultural de los habitantes de la zona, a pesar de que no contar con información escrita, la nomenclatura o clasificación maya de los suelos, está basada en el microrelieve y utiliza propiedades distintivas tales como: pedregosidad, rocosidad, color, posición topográfica y profundidad, así como en el cultivo y vegetación establecida.



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.



Descripción de los suelos del sitio. El suelo corresponde al grupo Leptosol con profundidad de 0 a 25 cm, pedregosidad y rocosidad variables y colores rojos, cafés y negros, sobre roca calcárea (Bautista *et al.*, 2003).

ESTRATEGIA DE ESTUDIO

La parcela se dividió en 54 s de 5 x 5 m (Fig. 2) consideradas como unidades experimentales. Se tomó una muestra de suelo con profundidad 0 a 10 cm al centro de cada unidad experimental. Se midieron los siguientes parámetros: pedregosidad y rocosidad superficial expresada como porcentaje de cobertura (Siebe *et al.*, 1996), color (Munsell, 1990), densidad real (método de la probeta, Gando, 1991), densidad aparente (Anderson e Ingram, 1993), carbono orgánico por el método colorimétrico TSBF (Anderson e Ingram, 1993), profundidad, capacidad de campo y textura.

- Para la identificación de las propiedades distintivas se realizó un análisis de componentes principales;
- Para la agrupación de sitios se realizó el índice de similitud (índice de Gower > 0.625) y posteriormente un análisis de clasificación jerárquica por conglomerados (cluster).

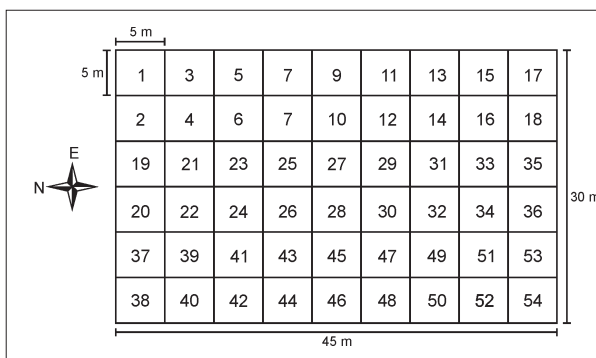


Figura 2. Distribución de subparcelas.

IDENTIFICACIÓN DE PROPIEDADES DISTINTIVAS

Para encontrar el patrón de relaciones entre el total de unidades experimentales, se creó una matriz de datos de nueve filas (propiedades del suelo) por 54 columnas (unidades experimentales). Se realizó el análisis de componentes principales (ACP) que permite reducir la

dimensionalidad del estudio a unas cuantas variables no relacionadas. Cada una de éstas contiene una parte de la variabilidad total (Afifi y Clark, 1988).

El cálculo de los valores propios se trabajó con una matriz de correlación y como criterio de selección de los componentes se utilizó el modelo de barra quebrada (*broken stick*) propuesto por Frontier (Legendre y Legendre, 1983; Jackson, 1993). Para calcular la correlación entre las variables originales y los componentes principales generados, se utilizó la siguiente expresión:

$$r(jk)=x(jk) [\lambda(k)]^{1/2}$$

Donde $r(jk)$ es la correlación entre la variable original $x(j)$ y el k -ésimo componente principal; $x(jk)$ es el valor de cada uno de los vectores propios y $\lambda(k)$ es la magnitud de cada uno de los valores propios. El cuadrado de $r(jk)$ proporciona la variación explicada por el componente principal para cada variable (Pla, 1986).

AGRUPACIÓN DE SITIOS

El análisis de similitud entre las unidades experimentales se realizó para la agrupación de los sitios (como medida de asociación se utilizó el índice de Gower). A la matriz de similitud generada se le realizó un análisis de clasificación jerárquica por conglomerados (cluster), mediante el método de ligamiento promedio no ponderado (UPGMA) como medida de agrupación. Los resultados se mostraron en forma de dendrograma. Todos los cálculos multivariados se realizaron con el paquete MVSP (Kovach, 1995).

ELABORACIÓN DE MAPAS

Con los nueve parámetros obtenidos de la identificación de las propiedades distintivas de la agrupación de sitios se realizaron mapas vectoriales con el programa SURFER "Kriging".

Los datos se mostraron en forma de mapas vectoriales; mismos que proporcionaron la base para formular el método de levantamiento de suelos en zonas cársticas de Yucatán. Finalmente, se realizó la comparación entre parches o grupos con los mapas de las propiedades distintivas.

El mapa raster de color se realizó con el programa Corel Draw 9.

RESULTADOS

El análisis de componentes principales mostró que los dos primeros componentes explican más del 57% de la varia-

ción. El primero se encuentra definido por el contenido de carbono, densidad aparente y densidad real, mientras que

el contenido de limo, arcilla y rocosidad definen el segundo componente.

El contenido de limo, contenido de carbono, densidad aparente y densidad real son las características edáficas que mejor explican la variación que se presenta entre las diferentes unidades. En la Tabla 1 se observa que estos cuatro parámetros tienen mayor valor en la variación explicada.

De acuerdo con el análisis de componentes principales (ACP), las relaciones más evidentes se presentaron entre el contenido de carbono y capacidad de campo, contenido de carbono y densidad aparente, la densidad aparente y densidad real, así como la densidad real y contenido de limo. Se tomaron los valores de la correlación mayores a 0.56 (Tabla 2).

Los grupos de sitios que se generaron fueron seis: el primer grupo tiene un índice de similitud de 0.75, el segundo de 0.72, el tercero de 0.66, el cuarto de 0.68, el quinto de 0.70 y el sexto de 0.63. Los grupos formados se resaltan por el engrosamiento de la línea (Fig. 3).

La distribución de los grupos (en número romano) dentro de la parcela se muestra en un mapa tipo raster (Fig. 4A).

Tabla 1. Propiedades distintivas del suelo de acuerdo con los primeros componentes principales.

Características Edáficas	C P I	C P II	V E (%)
Pedregosidad	0.4361	0.1100	54.61
Rocosidad	0.1080	0.3326	44.06
Carbono orgánico total	0.6839	0.0123	69.62
Densidad aparente	0.6586	0.0044	66.30
Densidad real	0.4905	0.0945	58.50
Arcilla	0.0952	0.4814	57.66
Limo	0.2416	0.5224	76.40
Profundidad	0.4186	0.0878	50.64
Capacidad de campo	0.4191	0.0055	42.46

V.E. Variación explicada; CP Componentes principales.

La formación de los grupos corresponde al gradiente de color, es decir, cada grupo se encuentra asociado con un parche de color de suelo. Así, se observa que el grupo I sólo contiene subparcelas de color rojo, al avanzar hacia un grupo mayor, disminuyen el número de subparcelas con suelo de color rojo y aumentan las subparcelas de color café-rojizo, hasta llegar al grupo VI ocupado por subparcelas de color café-rojizo y negro. La distribución es la siguiente: el grupo I se encuentra en la zona de valor espectral 5YR; el grupo II está constituido una parte por subparcelas de color 5YR y otra más de 7.5YR; el grupo III se encuentra en el parche 7.5YR; el grupo IV se ubica en el parche de color 7.5YR, el grupo V y VI tiene subparcelas de color 7.5YR y 10YR (Fig. 4B).

La distribución de los seis grupos comparada con la distribución de los parches por colores, muestra que el parche de color rojo ocupa el 33% de la superficie total de la parcela y se corresponde con el grupo I en su mayor parte y secciones de los grupos II, III y IV. El parche de color café rojizo ocupa el 50% de la superficie, es el más diverso en cuanto al número de grupos que lo conforman, en su mayor parte se encuentra ocupando los grupos III y IV, acompañado de porciones de los grupos II, V y VI. El parche de color negro se encuentra en la parte central de la parcela ocupando el 17%, y está ocupado por los grupos V y VI y una porción del grupo IV.

Existen tres subparcelas con valores anómalos por lo cual, el análisis de conglomerados no encontró similitudes significativas para ser integradas dentro de un grupo (se les asignó el número 0) (Tabla 3).

Las diferencias en cuanto a los valores de pedregosidad, rocosidad, profundidad y COT entre los grupos que se encuentran en el área de suelo de color rojo (grupo I) y el área de color negro (grupo VI), es decir, se establece un gradiente de los parámetros a través del color del suelo (Tabla 4).

El grupo I está conformado por diez subparcelas (18.5% de la superficie total de la parcela); tienen los valores altos de densidad ($DR = 2.17 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.12$ y $DA = 0.87 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.12$). En su mayor parte poca pedregosidad y rocosidad; presentan los valores más bajos de carbono orgánico total (COT) $5.69\% \pm 2.53$; clase textural arcillosa; baja

Tabla 2. Matriz de correlación de las características edáficas, de acuerdo con el análisis de componentes principales (ACP).

	Piedras	Rocas	COT	D.A.	D.R.	Arcilla	Limo	Prof.	C.C.
Piedras	1.00								
Rocas	-0.25	1.00							
COT	0.55	0.30	1.00						
D.A.	-0.43	-0.33	-0.61	1.00					
D.R.	-0.40	-0.06	-0.39	0.56	1.00				
Arcilla	-0.16	-0.20	-0.26	0.25	0.15	1.00			
Limo	-0.39	0.0027	-0.26	0.34	0.56	-0.40	1.00		
Prof.	-0.35	-0.32	-0.1	0.50	0.32	0.31	0.13	1.00	
C.C.	0.33	0.26	0.63	-0.33	-0.30	-0.13	-0.24	-0.29	1.00

COT= carbono orgánico total, DA= densidad aparente, DR= densidad real, Prof= profundidad, CC= capacidad de campo.



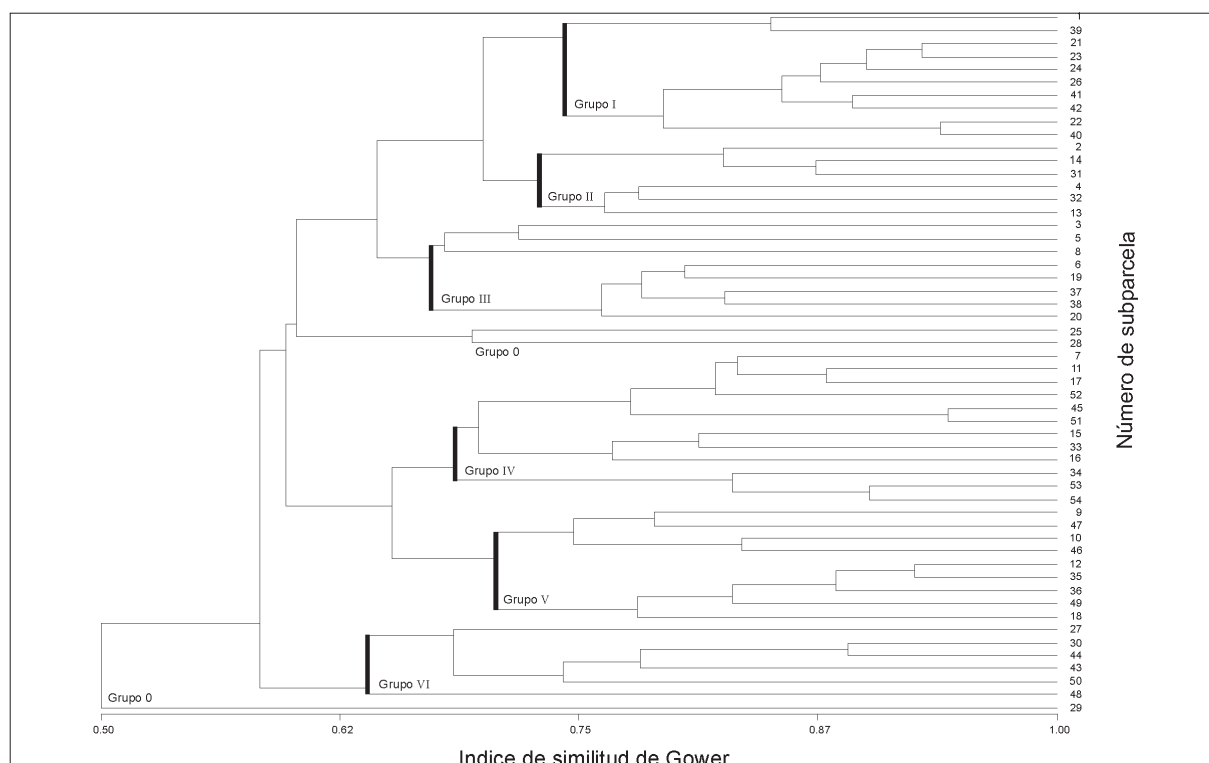


Figura 3. Análisis de conglomerados.

capacidad de campo; y son los suelos más profundos de la parcela (Tabla 4).

El grupo II está constituido por seis subparcelas (11%); el contenido de piedras es variable; no se hayan rocas; el contenido de COT y la CC es mayor que en el grupo anterior ($7.40\% \pm 3.70$), el valor de densidad es más bajo que el grupo anterior ($DR = 1.81 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.46$, $DA = 0.81 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.07$); y el contenido de arcilla es mayor (Tabla 4).

El grupo III está conformado por ocho subparcelas (15%); el contenido de piedras aumenta, mientras que el de rocas disminuye; el COT aumenta ($9.21\% \pm 2.84$); clase textural arcillosa; se trata de un suelo mineral ($DR =$

$2.17 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.22$ y $DA = 0.83 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.09$); mayor capacidad de campo; y es menos profundo (Tabla 4).

El grupo IV abarca 12 subparcelas (22%); el contenido de piedras es alto; la clase textural arcillo arenosa o arcillosa; el COT es mayor que en los tres anteriores grupos ($12.55\% \pm 4.37$); se observó una menor $DR = 1.62 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.37$ y $DA 0.68 \text{ g cc}^{-1} \pm 0.08$; la profundidad es baja; y un alto valor de CC (Tabla 4).

El grupo V abarca nueve subparcelas (17%); el contenido de piedras es alto (66.66 ± 10); la rocosidad es mayor en comparación a los anteriores grupos; la clase textural es franco arcillo arenosa; el contenido de COT fue de $12.49\% \pm 2.95$; existe una disminución de la $DR 1.63 \text{ g cc}^{-1}$

Tabla 3. Distribución de los grupos en función del color de los parches.

		Color			Unidad edáfica*
		Rojo	Café-rojizo	Negro	
Grupo	0	X	X	X	
	I	X			Leptosol crómico
	II	X	X		Leptosol crómico
	III	X	X		Leptosol lítico
	IV	X	X	X	Leptosol réndzico esquelético húmico / Leptosol lítico esquelético húmico
	V		X	X	Leptosol esquelético húmico
	VI		X	X	Leptosol lítico húmico
	Total de superficie	33%	50%	17%	

* De acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO/UNESCO, 1999).

Tabla 4. Estadística descriptiva de los grupos

	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI
Piedras (%)	16 ± 12	20 ± 5	40 ± 12	63. ±12	66 ± 10	22 ± 4
Rocas (%)	9 ± 2	10 ± 0	14 ± 16	10 ± 0	15 ± 5	44 ± 17
COT (%)	5.69 ± 2.53	7.40 ± 3.70	9.21 ± 2.84	12.55 ± 4.37	12.49 ± 2.95	13.39 ± 5.93
DA (g cc ⁻¹)	0.87 ± 0.07	0.81 ± 0.07	0.83 ± 0.09	0.68 ± 0.08	0.64 ± 0.06	0.65 ± 0.05
DR (g cc ⁻¹)	2.17 ± 0.12	1.81 ± 0.46	2.17 ± 0.22	1.62 ± 0.37	1.63 ± 0.39	1.84 ± 0.36
Arcilla (%)	42 ± 7	51 ± 9	41 ± 4	46 ± 23	29 ± 10	25 ± 14
Limo (%)	34 ± 5	21 ± 9	34 ± 6	12 ± 13	22 ± 10	32 ± 5
Arena (%)	24 ± 5	28 ± 4	25 ± 5	42 ± 20	45 ± 10	40 ± 12
Prof. (cm)	23.85 ± 13.45	20.16 ± 7.06	9.46 ± 3.38	11.52 ± 4.66	9.86 ± 2.88	6.75 ± 4.15
CC (%)	33.01 ± 4.01	34.91 ± 4.98	36.76 ± 4.20	37.99 ± 4.59	38.75 ± 5.66	39.92 ± 3.08

± 0.39 y la DA 0.64 g cc⁻¹ ± 0.06. Es un área menos profunda y con mayor CC (Tabla 4).

El grupo VI está constituido por seis subparcelas (11%); existe una disminución en el contenido de piedras (21.67 ± 4.08) y un aumento en la rocosidad; clase textural franca; tiene el mayor contenido de COT (13.39% ± 5.93); el contenido de arcillas es el más bajo de toda la parcela; la DR = 1.84 g cc⁻¹ ± 0.36 y la DA = 0.65 g cc⁻¹ ± 0.05. Es el área menos profunda y con mayor CC (Tabla 4).

ANÁLISIS MULTIVARIADO Y COLOR DE SUELO

La distribución de los diferentes tipos de suelos por color se muestra en la Figura 4, en un mapa tipo raster donde se reconocen tres colores de suelos. El parche de color rojo y valor espectral 5 YR, se distribuye en su mayor parte al norte de la parcela; domina el suelo sin piedras, ni rocas y se encuentra en la zona más profunda de la parcela. El parche de color café rojizo con valor espectral 7.5 YR se distribuye en la parte sur de la parcela, existe manchones de este tipo de suelo que se encuentran entre los otros dos tipos de suelo (carácter integrado). El parche de color negro, con valor espectral 10 YR, se distribuye en la parte central de la parcela, se trata de un suelo delgado con numerosos afloramientos rocosos y cantidades considerables de piedras.

En el grupo I, el color de los suelos es rojo de origen mineral; en el grupo II, es rojo y café-rojizo; en el grupo III, en su mayor parte es café rojizo; en el grupo IV, el color está distribuido en tres colores (rojo, café-rojizo y negro); en el grupo V, se presentan suelos de color café rojizo y negro; en el grupo VI, se encuentran suelos de color café-rojizo y negro.

Los parámetros seleccionados como propiedades distintivas a partir de los mapas vectoriales fueron: cantidad de limo; COT; densidad aparente; y densidad real. Los datos se mostraron en forma de mapas vectoriales; mismos que proporcionaron la base para formular el método de levantamiento de suelos en zonas cársticas de Yucatán.

En los mapas vectoriales, la cantidad de limo presente en el suelo es una característica distintiva que explica el 76% de la variación total de los valores de la parcela. La distribución espacial del contenido de limo se concentra hacia la parte norte de la parcela (en suelo de color rojo), principalmente en la zona noroeste. Hacia el sur se observa que disminuye la cantidad de limo (suelo café rojizo), mientras en el área sureste la cantidad de limo es menor.

Con respecto a la distribución del contenido de limo y la formación de grupos, se observa que el grupo I contiene en promedio entre 30% y 45% de limo, se encuentra bien definido en la zona norte (Fig. 4). La distribución de este grupo corresponde a la zona del Leptosol réndzico (color rojo). El grupo II no se encuentra en un contenido de limo en particular, tampoco se encuentra asociado a un color, (está en suelo rojo y en su mayor parte en café rojizo). El grupo III se encuentra bien definido en la zona del alto porcentaje de limo (entre un 23 y 45%). El grupo IV se ubica en el suelo café rojizo, el contenido de limo varía; sin embargo, dentro de este grupo se encuentran las subparcelas con menor cantidad de limo. El grupo V se posiciona en su mayor parte en los intervalos de 23 a 38%, en suelo de color café rojizo y negro. El grupo VI corresponde a cantidades de limo de 30 a 45%, en suelo café rojizo y negro. Este grupo se distribuye conforme a las isóneas de alto contenido de limo. Los grupos 0 se localizan en una zona con bajo contenido de limo.

El contenido de carbón orgánico (COT) explica la variación entre subparcelas en un 69.62%, tiene un comportamiento inverso al del contenido de limo, es decir, en la zona norte de la parcela se encuentra una cantidad mínima de carbono orgánico (suelo rojo), hacia la parte sur se localizan los porcentajes mas altos (en suelos café rojizo y negro) (Fig. 4). Se observa que el comportamiento del parche de color rojo sigue las isóneas de menor concentración, en la parte sur existe un parche de suelo color rojo, mismo que corresponde con la isónea de menor porcentaje de carbono orgánico.

El grupo I se ubica en la zona de menor contenido COT (en promedio de 3.5%) aunque existe una subparcela que supera este valor. El grupo II no tiene una concentración característica; sin embargo, la mayor parte tiene un bajo contenido de COT. El grupo III se encuentra asociado a la zona de bajo contenido de COT, con un intervalo que abar-



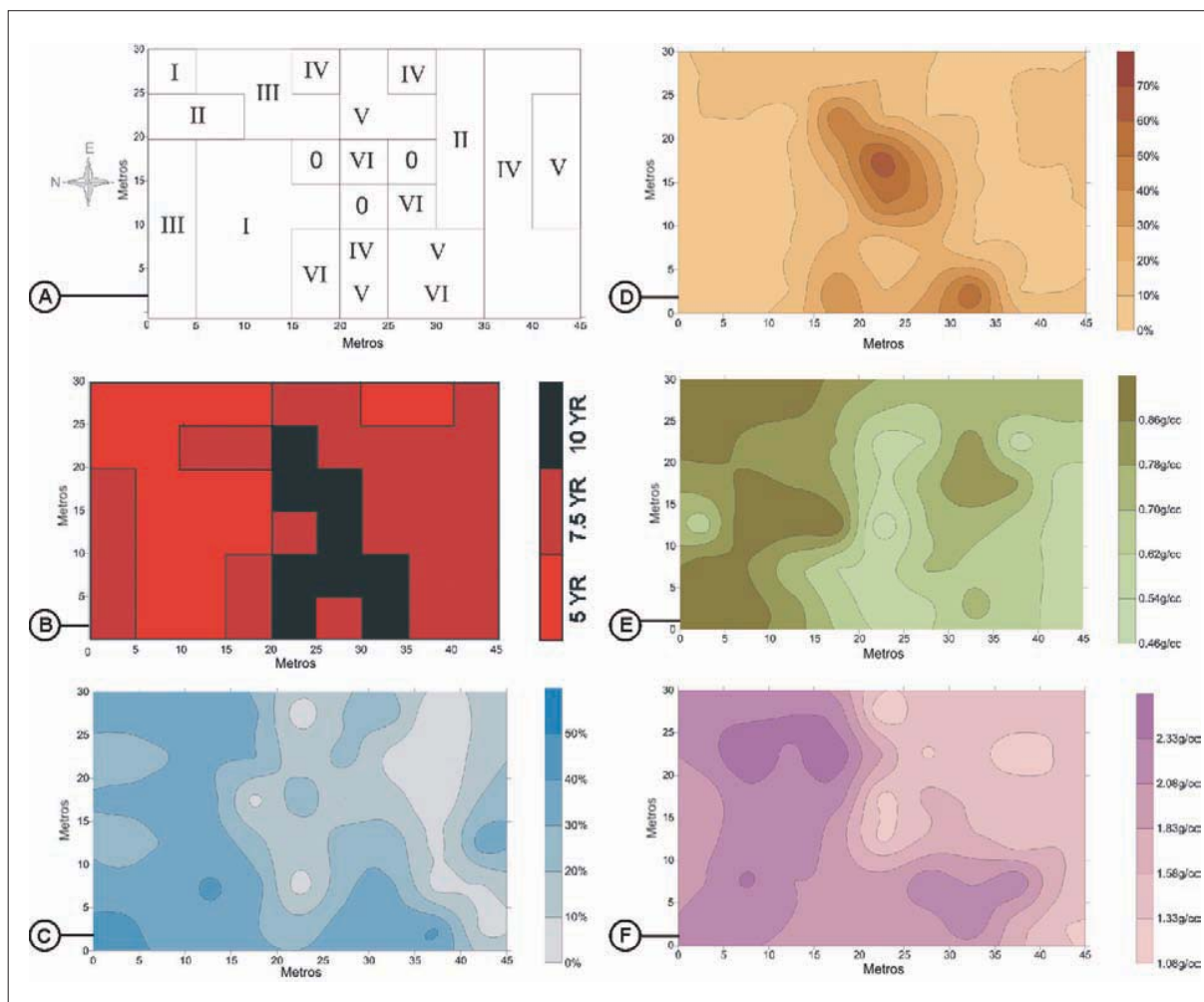


Figura 4. Mapas parcelarios. A= Mapa de grupos de suelo; B= Mapa de color superficial de suelo; C= Mapa de limo; D= Mapa de carbono orgánico total; E= Mapa de densidad aparente y F= Mapa de densidad real.

ca de 3.5 a 15.82%. El grupo IV tampoco tiene una concentración definida, pero su distribución corresponde al comportamiento de una isolínea (12.74%). El grupo V, se ubica en zonas de 6.58 a 18.90%, su distribución corresponde al comportamiento del contenido COT. El grupo VI, no tiene una concentración definida.

El comportamiento de la densidad aparente explica en un 66.30% la variación de los valores en la parcela. En la parte norte se encuentran los valores altos de densidad aparente, y se corresponden con el suelo de color rojo. En la parte central se localizan los valores de menor densidad y corresponden al parche de suelo de color negro. El parche de color café rojizo no está definido por una concentración (se presentan todos los valores).

El grupo I se encuentra bien definido (entre el 0.70 y el 0.94 g cc⁻¹) de densidad aparente en suelo de color rojo. El grupo II se localiza en el parche de color café rojizo y concentraciones de 0.70 y 0.94 g cc⁻¹, manteniendo un patrón de distribución conforme a las isolíneas. El grupo III abarca el intervalo de 0.62 y 0.94 g cc⁻¹. El grupo IV abarca las subparcelas con valores entre 0.62 y 0.86 g cc⁻¹. El grupo V

se distribuye en el área donde son menores los valores de densidad (0.54 g cc⁻¹), la presencia de este grupo puede asociarse a la distribución del grupo VI, donde los valores que comprenden este grupo son las sucesivas isolíneas (entre 0.62 y 0.78 g cc⁻¹). Existe un único valor extremo en la parte central de la parcela de 0.46 g cc⁻¹, el cual no fue agrupado, en este mapa se observa como un valor anómalo (Fig. 4).

El comportamiento de la densidad real en la parcela explica la variación en un 58.50%. Hacia la parte norte se localizan las subparcelas con mayor valor de densidad real (en suelo de color rojo), en la parte sur dominan las subparcelas con valores bajos de densidad real, principalmente en la zona de suelo café rojizo. En el parche negro se incluyen todas las clases.

El grupo I se ubica en la zona con altos valores de densidad real, al igual que el grupo III, entre 1.83 y 2.57 g cc⁻¹. El grupo II está dividido en los extremos, contiene tanto zonas con densidad real de 2.20 g cc⁻¹ y zonas con densidad real 1.3 g cc⁻¹. El grupo IV, V y VI no tienen un valor defini-

do, ya que no siguen un patrón de distribución, dado que abarca todas las clases (Fig. 4).

Las variables que no contribuyeron a realizar la separación de los grupos fueron la profundidad, pedregosidad, rocosidad, arena, arcilla, capacidad de campo; sin embargo, son de importancia para entender la heterogeneidad espacial de la zona.

En el mapa de pedregosidad se observa que las zonas con bajo contenido de piedras coincide con el parche de suelo de color rojo, en este mapa se encuentran bien definido el grupo I, II y V. Las zonas más profundas de la parcela se encuentran en el grupo I y II, sin embargo, no se

observa claramente la formación de los grupos. Las zonas de menor rocosidad se encuentran en el grupo I y II, en este parámetro se puede observar que las tres subparcelas que conforman el grupo 0 se encuentran en una zona de transición, lo que quiere decir que en un área de 5 X 5 cambia bruscamente el porcentaje de rocosidad en los montículos.

Existe mayor contenido de arena en los grupos I y II que corresponden al parche de suelo rojo, esto debido a su origen mineral. El mapa de contenido de arcilla muestra la homogeneidad del contenido de arcilla en la parcela, al igual que la capacidad de campo.

DISCUSIÓN

El análisis de clasificación numérica de las subparcelas, permitió identificar las propiedades distintivas para la agrupación y elaboración de los mapas, con los cuales se pudo apreciar las limitantes químicas y físicas para el desarrollo de propuestas agrícolas. Las propiedades distintivas fueron: porcentaje de limo, contenido de carbono orgánico, densidad aparente y densidad real.

En la parcela se presentan tres colores de suelo, mismos que se relacionan con el microrelieve de la zona, en la parte baja se tiene suelo de color rojo con valor espectral 5YR asociado a una nula pedregosidad y rocosidad; el color café rojizo y negro se corresponden con el suelo delgado (1 a 29 cm), esto concuerda con lo reportado por Bautista *et al.*, (1999).

El grupo I está caracterizado por un color rojo (Leptosol crómico), de origen mineral y presenta las mayores densidades, está conformado por 10 subparcelas (18.5%), sin piedras, ni rocas, es un grupo que se localiza en la zona más profunda y se distribuye homogéneamente en la parte oeste de la parcela.

El grupo II (Leptosol crómico) de color café rojizos y rojos, de clase textural arcilloso, con baja pedregosidad y rocosidad, contiene un valor bajo de carbono orgánico y baja capacidad de campo.

El grupo III (Leptosol lítico) presenta colores café rojizos, rojos, con piedras, altos contenidos de carbono orgánico y son someros.

El grupo IV (Leptosol lítico/Leptosol esquelético) son suelos pedregosos arcillosos, ocupa la mayor extensión (22.22%), ubicado en la parte Este. Predomina el color café-rojizo, sin embargo, se incluyen dos subparcelas de color rojo y una de color negro. En este grupo existe una alta variación en la textura y contenido de carbono orgánico.

El grupo V (Leptosol lítico esquelético) presenta un suelo de color café rojizos, negros, pedregosos y limosos.

El grupo VI (Leptosol lítico húmico) presenta un color negro, café rojizo, rocoso y tiene el valor más alto de carbono orgánico en toda la parcela y la más alta capacidad de campo; se caracteriza por conservar un mayor tiempo su humedad, debido a que la pedregosidad y rocosidad reducen la evaporación.

Existe mayor heterogeneidad espacial en los suelos de color café-rojizo, por presentar un mayor número de grupos.

Los análisis del color, textura, materia orgánica y densidad real son rápidos y económicos, por lo tanto permiten elaborar mapas parcelarios con las mismas ventajas y realizar estimaciones de otras características edáficas más costosas y que requieren más tiempo. Por ejemplo, de la textura se puede inferir la capacidad de intercambio catiónico, estimar el drenaje interno, reservas minerales y riesgos de erosión. Los datos de carbono orgánico evalúan el contenido de materia orgánica, fertilidad y capacidad de soporte de vegetación. El color del suelo, como propiedad clave para la elaboración de grupos, es de suma importancia dado que permite estimar el contenido de materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso, así como propiedades mineralógicas.

El carbono orgánico y la capacidad de campo se comportan en forma de gradientes siguiendo un patrón en función del microrelieve. Sin embargo, se deben tomar en cuenta la pedregosidad y rocosidad dado que es un factor limitante, que restringe la producción de ciertos tipos de cultivo y el uso de ciertas tecnologías agrícolas.

El color del suelo es una propiedad distintiva de zonas de alta heterogeneidad cársticas, y tiene una gran correspondencia con sus propiedades físicas y químicas, es decir, el color del suelo permite inferir sus propiedades edáficas.

El color del suelo refleja propiedades de relación suelo-planta, se encuentra asociado a propiedades como el contenido materia orgánica; también sirve para conocer las proporciones y tipos de minerales, condiciones de drenaje, aireación y porosidad.



CONCLUSIONES

El método de levantamiento de suelos a nivel parcela en zonas cársicas, se realizó utilizando cuadrantes de 25 m².

Las propiedades edáficas distintivas, físicas y químicas, de bajo costo fueron: color, textura, contenido de carbono orgánico, densidad real y densidad aparente.

La coloración del suelo es una propiedad distintiva en zonas de alta heterogeneidad cársicas. La parcela cuenta con tres suelos de diferentes colores: el rojo de origen mineral, profundo, localizado en la parte baja, es poco rocoso y sin piedras; otro situado al pie del monte, de color café rojizo en el que la cantidad de piedras aumenta; y el suelo de color negro que es más fértil, menos profundo y se encuentra prácticamente sobre la coraza calcárea.

El color del suelo puede ser utilizado con éxito en la elaboración de mapas parcelarios en zonas cársicas de calizas.

La pedregosidad y rocosidad favorecen un incremento del carbono orgánico y la capacidad de campo, como consecuencia de la estabilización del humus por el calcio derivado del material geológico. Sin embargo, deben tomarse en cuenta como factores limitantes en la producción de los cultivos y el empleo de ciertas tecnologías agrícolas.

Las propiedades como profundidad, densidad real, densidad aparente y carbono orgánico son indicadoras de la calidad del suelo y permiten conocer el estado de conservación de este recurso natural e inferir el carácter benéfico o perjudicial de la relación producción ambiente.

El mapa parcelario tipo raster se elaboró de manera sencilla con una hoja de papel cuadrícula o con mayor detalle y sofisticación, tipo vectorial, con el programa *Surfer* ver. 8.0.

REFERENCIAS

- Afifi, A. A. y V. Clark, 1988.** Computer-aided multivariate analysis. Segunda Edición. Chapman and Hall. Nueva York.
- Aguilera, H. N., 1989.** Tratado de edafología de México. Tomo I. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Anderson, J.M. y J. S. Ingram, 1993.** Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods, 2da. Edition, United Kingdom.
- Arkley, R. J., 1991.** Statistical methods in soil classification research. Department of Soil and Plant Nutrition, University of California, California.
- Arnold, W., I. Scabolcs y V. O Targulian, 1990.** Global Soil Change. International Report of an IIASA-ISSS-UNEP. Task Force Institute for Applied Systems Analysis. Luxembourg. Austria
- Bautista-Zúñiga, F., H. Rivas-Solórzano, C. Durán de Bazúa y G. Palacio, 1998.** Caracterización y clasificación de suelos con fines productivos en Córdoba, Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas*, 36: 21-33.
- Bautista-Zúñiga, F., H. Estrada-Medina, C. Delgado-Carranza y M. Sosa-Padilla, 1999.** Propuesta metodológica para el levantamiento de terrenos en zonas cársicas de la Península de Yucatán. *Jaina* 10(1): 7-9.
- Bautista-Zúñiga, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro-Alberto, A. Manu y R. Lozano, 2003.** Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársicos. *Terra*. 21: 1-11.
- Córdova, O. J., 2001.** Geografía y Cartografía: reflexiones sobre el status científico de una simbiosis necesaria. Geografía para el tercer milenio. Instituto de Geografía. UNAM. México.
- Dijkerman, J. C., 1981.** Field description, morphology and sampling of soils. Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands.
- Dutilleul, P., 1993.** Spatial heterogeneity and design of ecological experiments. *Ecology*, 74(6): 1646-1658.
- Espadas, M. C., 2004.** Introducción a los sistemas de información geográfica. En: Bautista-Zúñiga Francisco y Hugo Delfín González (eds). IG, UNAM-FMVñ, UADY Técnicas de muestreo para manejados de recursos naturales. En prensa.
- FAO/UNESCO, 1999.** Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. FAO-SICS-ISRIC, Roma, Italia.
- Fernández, A. L. y G. J. Rodríguez, 1994.** Estudio comparativo cartográfico-estadístico de algunas características físicas y químicas de suelos tropicales de montaña. Memorias del Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo, Montpellier, Francia.
- Fiamand, C., 1995.** Introducción a la edafología. Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México.
- Flores, S. J. y C. I. Espejel, 1994.** Tipos de vegetación de la península de Yucatán. Serie Etnoflora Yucatanense, Fascículo 3, Universidad Autónoma de Yucatán. Foth H. D., Turk L. M. 1980. Fundamentos de la ciencia del suelo. Continental, México.
- Gandoy, B. W., 1991.** Manual de laboratorio para el manejo físico de suelos. Universidad Autónoma de Chapingo, Colección de Cuadernos Universitarios. México.
- García, E., 1973.** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Apuntes de climatología. Talleres Laros. México.
- Herrera, S. J., 1994.** Spatial Heterogeneity and Seasonal Patterns in a Tropical Coastal Lagoon. *Journal of Coastal Research*, 10(3), 738-746.
- Jackson, D.A., 1993.** Stopping rules in principal component analysis: a comparison of heuristical and statistical approaches. *Ecology* 74(8): 2204-2214.
- Journel, A. G. y R. E. Rossi, 1992.** Geostatistical tools modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62(2) 277-314.
- Kovach, W. L., 1995.** MVSP- A multivariate Statistical Package for IBM-PC's ver 2.2. Kovach Computing Services. Gales, Reino Unido.
- Legendre, L y P. Legendre, 1983.** Numerical ecology. *Elsevier scientific Publishing Co.* New York. 419-429.
- León, A. R., 1984.** Nueva edafología. Grupo editorial Gaceta, Texcoco, México.
- Munsell Soil colors charts, 1990.** Munsell color Macbeth division of foil-morgen instrument corporation. Baltimore. Maryland.



Myers, D. E., 1991. Interpolation and estimation with spatially located data. *Elsevier scientific Publishing Co.* New York 209-228.

Navarro, A., 1998. Cuadernos de estadística. Academia de ecología. Facultad de Medicina Veterinaria y zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Ortiz, V. B. y S.C. Ortiz, 1990. Edafología, Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de suelos, Séptima edición.

Ovalles, V. F., 1998. Herramientas para la evaluación de tierras en zonas Tropicales: Uso de la Geoestadística. Universidad de Lleida, España.

Pla, I., 1986. Análisis multivariado: método de componentes principales. Monografía No. 27. Organización de Estados Americanos. Washington.

Porta, J., M. López Acevedo y L. Roquero, 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ediciones Multi-Prensa, 2ª impresión, Barcelona, España.

Rangel, L. L. y R. M. Henríquez, 1997. Delimitación de unidades cartográficas de suelos mediante análisis por componentes principales, geoestadística y conjuntos borrosos. Memorias del Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo, Montpellier, Francia.

Siebe, C., R. Jahn y K. Stahr, 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. México.

Sommer, C. I., L. P. Fernández, H. Rivas y M. Gutiérrez, 2000. La geoestadística como herramienta en estudios de contaminación de suelos, análisis de caso: afectación por Arsénico, Plomo y Cadmio contenido en jales mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 16 (4), 205-214.

Spavorek, G., y O. Camargo, 1990. Muestreo en floresta. IX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, La Habana, Cuba.

Tapia, L. M., A. C. Ruiz, V. M. Tiscarreño, G. E. Venegas, C. B. Sánchez, R. Molina y X. C. Chávez, 1995. Áreas potenciales para el cultivo de cucurbitáceas en el proyecto de riego Chilatan de Tepalcatepec, Michoacán. *Terra*. 13(3) 231-243.

Teuscher, H., R. Adler R. y J. P. Seaton, 1985. El suelo y su fertilidad. Ed. Continental, México.

Webster, R. y M. A. Oliver, 1990. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford University Press, New York.



RELACIONES SUELO-PLANTA EN ECOSISTEMAS NATURALES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN: COMUNIDADES DOMINADAS POR PALMAS

*Armando Escamilla, Fausto Quintal, Fátima Medina,
Adolfo Guzmán, Erika Pérez y Luz Ma. Calvo*

Centro de Investigación Científica de Yucatán

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es discutir la relación suelo-planta en comunidades vegetales no manejadas de la Península de Yucatán. Dado que las plantas que crecen exitosamente en un hábitat están adaptadas a las condiciones que el sustrato les imponen, el conocimiento de las estrategias de adaptación de las plantas nos permiten comprender los procesos por los cuáles las especies compiten exitosamente y predecir si será capaz de subsistir en otras condiciones. Por ello los estudios sobre la interacción suelo-planta son un componente fundamental para entender la abundancia y distribución de la vegetación en condiciones naturales.

Se discute una definición cuantitativa de la fertilidad del suelo basada en el componente químico y aplicable a la investigación en ecosistemas naturales. Se define el estatus del sistema suelo-planta para proporcionar los nutrimentos esenciales al crecimiento de las plantas a través de mecanismos de: i) liberación de nutrimentos de la fase sólida del suelo a la fase soluble, ii) el movimiento de estos nutrimentos a través de la solución del suelo hacia las raíces de las plantas y, iii) la absorción por las raíces. Se incluye el sistema radicular como la interfase entre los recursos del suelo y la biomasa aérea producida en el ecosistema. Finalmente se presentan resultados de investigaciones de las relaciones suelo-planta en comunidades vegetales de la Península de Yucatán.

ABSTRACT

The objective of this chapter is to identify soil-plant communities relationships in natural vegetation of the Yucatan Peninsula. Successful plant growth depends upon specific soil conditions and the physiological adaptations of plants that occupy a site. Because nutrient stress is ubiquitous in natural ecosystems it strongly influences the plant physiological adaptations. Therefore we propose to identify plant physiological adaptations so we can predict if natural vegetation will be able to persist in different environments. Soil-plant relationships studies are fundamental to understand the distributions of plants in natural ecosystems.

Soil fertility is defined here as being a three phase process based on: i) the release of nutrients to the soil solution from the solid form, ii) the movement of the nutrients to the plant root and iii) the uptake by the plant. Root systems are included as the inter phase between soil resources and aboveground ecosystem biomass to identify soil-plant relationships. Finally some examples of soil-plant relationships in natural vegetation dominated by palms of the Peninsula de Yucatan are presented.

INTRODUCCIÓN

Según Clements (1916), cada planta es una medida de las condiciones bajo las que crece, ya que son organismos que están anclados o enraizados en el suelo y reciben agua y nutrimentos para procesarlos en energía. Por otro lado Stone (1975) señala que el suelo es un componente del ecosistema natural, en el cuál existe un gran número de organismos y procesos químicos individuales compuesto de material mineral y orgánico resultado de la topografía, el material parental, la vegetación, los organismos, el clima y la edad. El suelo es un componente importante en la mayoría de los ciclos naturales como: el hidrológico, es regulador de escurrimientos superficiales, en conjunto con la cubierta vegetal, controla la recarga de los acuíferos y forma parte global del ciclo del carbono, el nitrógeno, el azufre y otros nutrimentos de las plantas. En general el

suelo es importante porque soporta plantas que proporcionan alimento, fibras, drogas y otros requerimientos humanos (Soil Survey Staff, 1999). El objetivo de este trabajo es discutir la importancia de estudiar la relación suelo-planta en comunidades vegetales no manejadas de la Península de Yucatán. La relación suelo-planta se centra en la productividad del ecosistema y su relación con el suelo, siendo el sistema radicular la interfase entre los recursos del suelo y la biomasa aérea producida en el ecosistema. Se presentará de manera general los componentes de la relación suelo-planta concluyendo con resultados de investigaciones de dicha relación en comunidades dominadas por palmas.

SUELOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La Península de Yucatán es una estructura geológica que corresponde a una plataforma, o sea, un conjunto de capas de rocas sedimentarias, con un grosor de más de 3500 m que descansan sobre un basamento paleozoico. La base del paquete sedimentario es de rocas Jurásicas y por encima de éstas se encuentran las del Cretácico, mismas que constituyen la mayor parte de la estructura profunda; las rocas paleogénicas se encuentran en todo el subsuelo y consisten principalmente en calizas, areniscas, evaporitas del Paleoceno y Eoceno (López-Ramos, 1979).

Las calizas en la superficie se encuentran formando una coraza calcárea o reblandecida. La coraza calcárea es de extrema dureza y constituye la superficie del relieve en grandes territorios; es conocida con los nombres comunes de *laja* o *chaltún*. Las calizas blandas tienen el nombre maya de *sahcab* (tierra blanca). Los suelos de la Península de Yucatán se formaron a partir de piedra caliza Terciaria en un terreno cárstico de roca plana, originando un mosaico de litosoles negros y rendzinas rojas (Duch, 1988). Los suelos negros y superficiales se dan ya sea como una capa delgada sobre la roca o de manera más profunda con un contenido de grava sin horizontes visibles y se presentan generalmente sobre los montículos y con profundidades menores a los 0.2 m. Los suelos rojos presentan profundidades mayores de 0.2 m con un contenido bajo de grava y se dan principalmente en depresiones. Las diferencias en profundidad y contenido de piedras están fuertemente relacionadas a las propiedades del suelo y

son claramente distinguidas en la clasificación maya típica como *Box'lum* (litosoles) y *Kankab* (rendzinas) (Magier y Ravina, 1984; Teran y Rasmussen, 1994). Estos suelos se presentan en parches en pequeñas áreas resultando en una gran heterogeneidad espacial. Adicionalmente son suelos que se mezclan con suelos someros y pedregosos por lo que se observa una reducción del volumen de suelo utilizable como fuente de agua y nutrimentos necesarios para el crecimiento de la vegetación. Sin embargo, en ellos crece una amplia variedad de especies vegetales herbáceas, arbustivas y arbóreas (Duch, 1988). Son escasos los reportes que describen con detalle las propiedades distintivas de los suelos, así como sus propiedades químicas relacionadas con su fertilidad (Bautista, *et al.*, 2003). Sin embargo se reconoce que la conversión de selvas naturales a vegetación secundaria provoca la pérdida de la materia orgánica del suelo (MOS) y por consecuencia en la pérdida de la fertilidad del suelo (Raich 1983). En ecosistemas naturales los paradigmas a resolver son: ¿Pueden los estudios clásicos de la fertilidad de suelo explicar el sustento de dicha vegetación?, ¿Posee la vegetación de dicho ecosistema estrategias competitivas para establecerse en un suelo con volúmenes limitantes y heterogéneos de agua y nutrimentos? Solamente podemos diseñar estrategias de manejo forestal en ecosistemas naturales si caracterizamos y conocemos la fertilidad del suelo y las estrategias competitivas de la vegetación de la Península de Yucatán.



VEGETACIÓN DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La vegetación de la Península de Yucatán presenta características particulares por lo que se le reconoce como una provincia biótica claramente definida (Barrera 1962; Miranda 1958; Rzedowski 1978). En la Península se concentran elementos florísticos de la región Antillana, Centroamericana sur y Sureste de México, los cuales aunados al componente endémico constituyen la flora de este territorio (Estrada-Loera 1991, Duran *et al.*, 1998). Las especies endémicas a la Península de Yucatán representan un porcentaje relativamente alto de la flora regional cuando se le compara con otras zonas tropicales del sur del país (Duran *et al.*, 1998). Carnevali *et al.*, (2003) resaltan que algunas de estas especies endémicas son bastante restringidas en su rango ecológico y su distribución corresponde a la distribución de asociaciones vegetales específicas. Algunos ejemplos serían *Dendropanax schippii* (A.C. Sm.) A.C. Sm. (Araliaceae) cuyo rango está limitado por los márgenes de algunos ríos en la sección SO de la Península. Otro caso sería el de *Ipomoea sororia*, una especie de trepadora estacional conocida solo de grietas rocosas inundadas en selva baja caducifolia con cactáceas columnares.

En la Península de Yucatán encontramos los siguientes tipos de vegetación (Miranda y Hernández X. 1963): manglar, matorral de duna costera, petén, sabana o pastizal inundable, selva baja caducifolia, selva baja caducifolia espinosa, selva baja inundable, selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia y selva alta subperennifolia. La Tabla 1 muestra la superficie que ocupan estos tipos de vegetación en la Península de Yucatán (González-Iturbe, no publicado).

Carnevali *et al.*, (2003) mencionan que con cierto grado de confianza, la flora de la porción Mexicana de la Provincia Biótica de la Península de Yucatán incluirá eventualmente un número entre 2,200 y 2,400 especies. Las Familias de plantas mejor representadas en la vegetación de la Península de Yucatán son: Fabaceae (263 spp) Poaceae (150 spp), Orchidaceae (123 spp), Asteraceae (121 spp), Euphorbiaceae (110 spp) y Cyperaceae (91 spp). En ellas se concentra cerca del 40% del total de especies de la flora.

Uno de los grupos de plantas que viven en estas selvas son las palmas, que se pueden considerar una de las fami-

lias de alta importancia económica junto con las gramíneas y leguminosas (Orellana y Durán, 1992). De las 20 especies de palmas registradas en la Península de Yucatán aproximadamente once se distribuyen en selvas tropicales, algunas con estatus de conservación (amenazadas o restringidas) y, distribuidas heterogéneamente en el territorio peninsular (Orellana y Durán, 1992), por lo que es un grupo de plantas de los más afectados y que necesita de acciones prioritarias de conservación.

Una de las estrategias que se han implementado para conservar la biodiversidad es el establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (ANP) en las que con base en un Plan de Manejo se regulan las actividades que se realizan con fines de conservar el patrimonio natural que estas áreas albergan. La Península de Yucatán cuenta con Áreas Naturales Protegidas que contienen diferentes superficies de los tipos de vegetación antes mencionados. La Tabla 2 muestra un resumen de las Áreas Naturales Protegidas de la Península de Yucatán (Alcérreca *et al.*, 1999).

Lo anterior constituye una enorme riqueza, pues desde el punto de vista biológico, las comunidades vegetales constituyen un laboratorio natural para estudiar los procesos de colonización, dispersión, adaptación y evolución de las especies y para diseñar experimentos que consoliden las bases de estrategias de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

No obstante, son numerosos los problemas que se presentan en estas Áreas Naturales Protegidas como son el cambio de uso del suelo, la modificación de los flujos hídricos y la contaminación, así como la presión demográfica, el turismo desordenado, los aprovechamientos ilegales y la falta de promoción y presupuesto (Alcérreca *et al.*, 1999).

Las elevadas tasas de deforestación en las zonas tropicales son un componente fundamental de la pérdida de biodiversidad y deterioro ambiental que vivimos actualmente. Así mismo, es evidente su influencia en el calentamiento global y regional (Houghton *et al.*, 2000), la pérdida de productividad primaria neta (Vitousek *et al.*, 1991) y la degradación del suelo (Barrow 1991). En México el esce-

Tabla 1. Tipos de vegetación de la Península de Yucatán y su distribución superficial parcial por estados.

Tipo de vegetación	Península	Yucatán*	Campeche*	Q. Roo*
Agropecuario	9.74	16.16	8.68	5.65
Manglar	4.31	2.64	7.26	2.53
Pastizales inundables	4.85	0.84	7.23	4.66
Vegetación secundaria	42.21	54.31	32.71	41.63
Selva baja inundable	5.81	0.10	10.38	6.27
Selva mediana subperennifolia	19.31	1.61	16.84	36.74
Selva alta subperennifolia	2.37	0.00	4.87	1.97
Selva baja caducifolia	4.74	11.15	4.36	0.00
Selva mediana subcaducifolia	6.66	13.20	7.67	0.55

*Superficie estatal parcial ocupada. Los valores están expresados como porcentajes



Tabla 2. Clasificación de las Areas Naturales Protegidas de la Península de Yucatán.

Estado	Número de ANP	Categoría	Superficie (ha)
Campeche	3	Reserva de la Biósfera (2) Area de protección de flora y fauna (1)	1, 810 597
Yucatán	9	Reserva de la Biósfera (2) Parque marino nacional (1) Parque estatal (1) Parque nacional (1) Zona sujeta a conservación ecológica (3) Area natural protegida con valor escénico (1)	566, 221
Quintana Roo	16	Reserva de la Biósfera (3) Parque marino nacional (4) Parque nacional (2) Parque urbano (1) Area de protección de flora y fauna (2) Zona sujeta a conservación ecológica (4)	271, 063

() El dato entre paréntesis es el número de ANP con esa categoría

nario es poco alentador y la mayoría de las tierras bajas de la Planicie del Golfo han sido deforestadas al igual que extensas superficies en la Sierra Lacandona. Las selvas de Campeche y Quintana Roo constituyen la última frontera de este frente de avance de oeste a este, de la deforestación y el desarrollo de las tierras bajas tropicales en nuestro país (Turner *et al.*, 2001). Alrededor del 10% de la vegetación natural ha recibido algún impacto por actividades humanas. México presenta grandes extensiones de selva degradadas por las diferentes actividades humanas que se llevan a cabo. Para darnos una idea, se ha estimado una tasa de deforestación anual de las selvas tropicales mexicanas de 400 y 500 mil hectáreas anuales para destinarlas a la producción agrícola y pecuaria (Raven, 1988). La tasa anual de deforestación en diferentes zonas de la Península ha variado a lo largo del tiempo, oscilando entre 2% y 0.2% (Cortina Villar *et al.*, 1999; Turner *et al.*, 2001) asociado en gran medida a los cambios en la situación económica y política del país. Ante esta deforestación continua de comunidades tropicales naturales el dilema es el diseño de estrategias sustentables para el aprovecha-

miento y la conservación de las especies y los hábitats en los que se desarrollan.

Dado que las plantas que crecen exitosamente en un hábitat determinado están adaptadas a las condiciones que el sustrato les impone, el conocimiento de las estrategias adaptativas de estas plantas nos permiten comprender los procesos por los cuáles estas especies compiten exitosamente y predecir si subsistirán en otras condiciones.

Es clara la diversidad biológica de la Península de Yucatán, dado el número y la variedad de especies nativas y endémicas de la región, por lo que es importante conocer sus recursos en flora y fauna, pero es aún más importante conocer los mecanismos que mantienen el equilibrio en cada uno de estos ecosistemas para generar los conocimientos suficientes que permitan manejar y/o conservar esta riqueza. Los estudios sobre la interacción suelo-planta son un componente fundamental para entender la abundancia y distribución de la vegetación, de ahí la relevancia de los estudios sobre este tema en condiciones naturales.

EL SUELO Y SU INTERACCIÓN CON LA VEGETACIÓN

El suelo es un componente del ecosistema natural, en el cual existen un gran número de organismos y procesos químicos individuales (Stone, 1975). El suelo puede ser un indicador de las causas de las diferencias en el tipo y distribución de la vegetación en un ecosistema dado, debido a que sus características físicas y químicas como pH, materia orgánica, salinidad, disponibilidad de nutrimentos, textura, profundidad, compactación y origen mineral, determinando la distribución natural de la vegetación. Por tanto no es en fran medida sorprendente que los suelos

presenten ciertas propiedades químicas o físicas asociadas con ciertos tipos de vegetación y exceptuando cambios temporales o locales del suelo, la distribución de esas propiedades es similar a la distribución de la vegetación (Escamilla, 1999). Sin embargo, la persistencia a largo plazo de una especie dentro de condiciones particulares de suelo, conlleva un rango de características que dependen más de la especie vegetal como plasticidad morfológica y fisiológica, que del suelo.



FERTILIDAD DEL SUELO

Uno de los caracteres más importantes del hábitat, es la fertilidad del suelo. La fertilidad del suelo es un concepto que incluye los componentes químicos, físicos y biológicos del suelo y desde el punto de vista forestal un suelo fértil debe i) promover el crecimiento de las raíces, ii) mantener y proporcionar agua, iii) mantener, proporcionar y reciclar nutrimentos, iv) promover intercambio gaseoso y v) promover la actividad biológica del suelo (Ranger y Turpault, 1999). Sin embargo, no existe un parámetro cuantitativo universal para definir la fertilidad de un suelo. Por ello Comerford (1999) propuso una apreciación cuantitativa basada en el componente químico y aplicable a la investigación en conservación de comunidades vegetales y la diversidad que ésta contiene, definiendo "la fertilidad del suelo" como: estatus del sistema suelo-planta para proporcionar los nutrimentos esenciales al crecimiento de las plantas a través de mecanismos de, i) liberación de nutrimentos de la fase sólida del suelo a la fase soluble, ii) el movimiento de estos nutrimentos a través de la solución del suelo hacia las raíces de las plantas y, iii) la absorción por las raíces". Estos conceptos están basados en el trabajo de Nye y Tinker (1977) y Barber (1984) y son cruciales para definir las características del abastecimiento de nutrimentos en el hábitat de las plantas. El entendimiento de dichos procesos conduce a entender los procesos de la relación suelo planta que son más sensibles en la vegetación natural.

Liberación de nutrimentos a la fase soluble del suelo. Las plantas silvestres no necesitan altas concentraciones de nutrimentos en la solución del suelo. En cambio, requieren concentraciones bajas pero suficientes que estén presentes cuando sean requeridas. De esta manera, al ser removidos los nutrimentos del suelo ya sea por lixiviación o por la toma de la planta, un suelo fértil debe tener la capacidad para reponer lo que se ha perdido de la solución (Comerford, 1999). El poder amortiguador (b) (la capacidad de la fase sólida del suelo para mantener la concentración de nutrimentos en solución) es dependiente del contenido de agua del suelo (θ), la densidad aparente del suelo (ρ) y el coeficiente de partición de los nutrimentos (K_d), el cuál describe la distribución de nutrimentos entre las fases sólida y líquida del suelo. La interpretación de K_d y de los potenciales de amortiguación (b), es hasta cierto grado independiente de la planta y define el reparto de un nutrimento entre las fases sólidas y líquidas del suelo. Esta es dependiente de la planta solamente en el supuesto de que influye sobre las condiciones de la solución del suelo (Comerford, 1999) y propone la determinación de la capacidad de amortiguación (b) y el coeficiente de partición (K_d) para cuantificar la disponibilidad de los nutrimentos del suelo. Sin embargo, otras metodologías pueden ser usadas por ejemplo, recientemente se están usando resinas de intercambio iónico en forma de membranas para extraer los nutrimentos en suspensiones acuosas del suelo como N, P, K y S (Saggar, *et al.*, 1990; Schoenau y Huang 1991; Schoenau, *et al.*, 1992). Weisbach y colaboradores (2002) en un estudio de suelos en Yucatán determinaron el contenido de nutrimentos disponibles como P, K, Mg y Ca mediante el uso de membranas de resinas de intercambio iónico como parámetros para determinar el estatus de fertilidad del suelo. La concentración de estos mismos elementos fueron determinados al mismo tiempo con el método de intercambio catiónico en solución comúnmente

utilizado. Los resultados que encontraron muestran que las concentraciones de los elementos determinados mediante el uso de las membranas de resinas de intercambio iónico se encuentran estrechamente relacionados con las concentraciones reales tomadas por las plantas, en tanto que con el método de intercambio en solución, los resultados se alejaron de las concentraciones tomadas por las plantas. Estos resultados muestran que el método de las resinas de intercambio iónico es más exacto en cuanto a que reflejan las condiciones reales de disponibilidad de nutrimentos a las cuales se encuentran expuestas las raíces de las plantas. Schoenau, *et al.* (1993), proponen el uso de estas nuevas herramientas en mediciones directas con membranas de intercambio iónico en el suelo, ya que bajo estas condiciones imitan de manera más parecida a las raíces en su función de absorción que en las soluciones acuosas del laboratorio por lo que esta sería una herramienta muy útil para su aplicación en estudios de suelos en ecosistemas naturales de la Península.

Movimiento de los nutrimentos en solución hacia la raíz. El movimiento de los nutrimentos en solución hacia la superficie de la raíz para que puedan ser absorbidos por ésta, se da por flujo de masa o difusión. El flujo de masa es producido por el flujo de transpiración de la planta. Al moverse el agua hacia la raíz, ésta arrastra consigo los nutrimentos; si el abastecimiento por flujo de masa es equivalente o superior a la demanda de las plantas, entonces todo el abastecimiento de nutrimentos estará dado por flujo de masa. Si el suministro por flujo de masa es menor que la demanda de agua, la concentración de la solución en la superficie de la raíz es reducida a la solución global del suelo estableciéndose un gradiente de difusión. Para el flujo de masa y difusión, la magnitud de flujo del nutrimento es proporcional al contenido de agua del suelo.

El papel de las raíces en la captación del nutrimento. La raíz representa una frontera de transición para la captura de nutrimentos. Para describir un sistema radical se debe conocer i) su longitud y diámetro radical (esto proporciona el área de superficie radical en el suelo), ii) la distribución de esta superficie radical con relación a la profundidad del suelo y iii) la fuerza del vertedero para la absorción del nutrimento (el requerimiento de la planta). La longitud radical y el diámetro, son medidas de la morfología radical. El área superficial de la raíz es la capa de transición física, a través de la que los nutrimentos deben pasar para poder entrar a la planta. Sin embargo, la misma superficie radical puede presentar diferencias en la morfología de la raíz. Si consideramos dos sistemas radicales con la misma área superficial, en un caso el sistema pudiera tener una longitud radical corta, pero estar dominado por diámetros relativamente grandes. El otro sistema radical puede tener una longitud radical larga con raíces muy delgadas. Estos dos extremos morfológicos pueden inferir diferentes niveles de absorción de nutrimentos aunque el área total sea la misma (Comerford, 1999).

La capacidad de captación del sistema radical se refiere a la demanda del nutrimento por parte de la planta. Las raíces pueden concebirse como membranas semipermeables que funcionan como barreras al paso libre de agua y nutrimentos hacia el interior de las plantas. Una vez que el nutrimento alcanza la superficie radical por los mecanis-



mos de flujo de masa y/o difusión, entonces está en posición de ser absorbido por la raíz. Independientemente que el nutrimento entre a la raíz por mecanismos activos o pasivos, la mayoría de las curvas de captación que describen el flujo de nutrimentos hacia el interior de la raíz siguen un patrón similar que puede ser descrito por medio de una cinética de Michaelis-Menten, donde el flujo hacia el interior de la raíz (Q) de un área unitaria básica es dependiente del flujo máximo hacia dentro de la raíz (I_{max}), la concentración del nutrimento en la superficie radical (C) y la constante de Michaelis (K_m) definida como la C , a $1/2$ de I_{max} . En vista de que la concentración de nutrimentos en la solución del suelo es usualmente muy baja, el término C_{min} ha sido introducido, y hace referencia a la concentración del nutrimento en la solución a la cual la absorción neta por las raíces cesa antes de que el nutrimento sea agotado. Por ejemplo la C_{min} para P en raíces de maíz es de 0.2 μM , mientras que para K es de 2.0 μM .

La literatura sobre la toma de nutrimentos ha sido dominada por estudios llevados a cabo con especies agrícolas creciendo en condiciones de altos niveles de fertilidad del suelo. Estos estudios revelan que la cinética de toma de nutrimentos por las raíces de las plantas es un factor determinante en la adquisición de nutrimentos. Sin embargo, tal y como Chapin (1980) ha señalado, se debe tener mucho cuidado cuando se extrapolan estos resultados a especies silvestres, más aún si se encuentran en su ecosistema natural bajo condiciones de ambientes pobres en nutrimentos.

La adquisición de nutrimentos en hábitats naturales pobres en nutrimentos, depende de las características fisiológicas y morfológicas de las plantas. Los rasgos morfológicos son especialmente importantes para la adquisición de nutrimentos que se difunden lentamente en el suelo, como el fósforo (Aerts y Chapin, 1999). Estos rasgos morfológicos varían desde aquellos que operan a nivel de planta (relación follaje/raíz) a aquellos que operan a nivel celular (densidad de pelos radicales).

Ya ha sido demostrado que en micrositos con alta disponibilidad de nutrimentos, las raíces de las especies de rápido crecimiento reaccionan rápidamente aumentando su cinética de toma de nutrimentos (Caldwell, *et al.*, 1996), esto representa una ventaja competitiva para estas especies, ya que bajo estas condiciones los nutrimentos en el suelo son agotados por ellas antes de que las especies de lento crecimiento tengan acceso a ellos. Por el otro lado, las especies de lento crecimiento que habitan sitios naturales pobres en nutrimentos generalmente no desarrollan cinéticas de absorción de nutrimentos elevadas, debido principalmente a que la disponibilidad de nutrimentos en estos sitios es en general baja y los nutrimentos en la solución del suelo en la zona de agotamiento tiene que difundirse hacia las raíces. Esto implica que el factor limitante en la toma de nutrimentos en estos sitios no es la cinética de toma de nutrimentos, sino la tasa de difusión de los iones en la solución del suelo. De este modo, las especies que presentan elevadas tasas en la cinética de absorción de nutrimentos (por lo general especies cultivables) enfrentan una desventaja en sitios pobres en nutrimentos, ya que sus elevadas cinéticas de absorción no conducen necesariamente a elevadas tasas de absorción, pero sí a elevados costos de carbono en la construcción de bombas de H^+ y proteínas. Así, de manera general, las especies que crecen en ambientes naturales pobres en nutrimentos (especies silvestres) se caracterizan por presentar bajas cinéticas de toma de nutrimentos en comparación con las especies de cultivo donde las condiciones de fertilidad del suelo les son favorables (Aerts, 1999).

Los parámetros de Michaelis-Menten I_{max} y K_m pueden ser usados como indicadores de la habilidad competitiva de las especies, sobre todo en suelos que presentan condiciones limitantes en la disponibilidad de nutrimentos, lo cual es usual en ecosistemas naturales. Los estudios realizados en este sentido han sido casi en su totalidad en especies de cultivo, solamente algunos trabajos se han llevado a cabo con especies perennes y los datos son casi nulos para especies silvestres.

CRECIMIENTO Y RAICES EN EL SUELO

Para el estudio de productividad de ecosistemas vegetales y su relación con los recursos del suelo, la interfase más importante es el sistema radical, como órgano que mantiene el crecimiento foliar ya que tiene como función principal absorber agua y nutrimentos del suelo. La forma en que los sistemas radicales compiten por esos recursos es más conocida por sus manifestaciones que por sus mecanismos. Sin embargo, su estudio es una de las vías más importantes para entender la relación suelo-planta en un ecosistema. Es la competencia por estos recursos del suelo lo que rige la presencia de las especies (Caldwell, 1987). Por ello se discutirán algunos aspectos generales del sistema radical y como conceptos proporcionan información sobre los mecanismos responsables de dicha relación.

Harper (1977) postula que la planta al crecer demanda del ambiente recursos. El término crecimiento se entiende como un aumento en tamaño, volumen, peso, número de

células o complejidad y se da en meristemos de raíces y vástagos (Salisbury y Ross, 1985; Pearcy *et al.*, 1989). Se puede medir mediante métodos destructivos o no destructivos. Entre los primeros están medir el peso fresco o seco y entre los segundos están medir la longitud, altura, área, etc. (Salisbury y Ross, 1985). Las raíces tienen como función proporcionar agua, nutrimentos, anclaje y soporte a la parte aérea de la planta. El vástago es el encargado de producir fotosintatos a partir de dióxido de carbono y luz, transportarlos a las diferentes áreas de consumo de la planta y de respirar (Groff y Kaplan, 1988; Flores-Vindas, 1999). El término vástago en el presente escrito se emplea para referirse a la parte aérea que comprende la parte fotosintética, que son las hojas.

La producción en biomasa (materia seca) resulta de la asimilación de bióxido de carbono que no se pierde por la respiración y puede ser utilizado para el crecimiento y



como reserva. El aumento en el suministro de bióxido de carbono está correlacionado directamente con la producción de biomasa por el aumento en la capacidad fotosintética. Entre otros factores que pueden afectar la producción de biomasa en la planta están, la radiación (intensidad o exposición), nutrimentos, translocación y hormonas, cada uno por separado o en interacción (Pearcy *et al*, 1989).

La raíz ejerce una marcada influencia reguladora sobre el crecimiento del vástago. Condiciones de estrés (insuficiencia de recursos para mantener una tasa de crecimiento máxima), como sequía, anegamiento, deficiencia de nutrimentos minerales, salinidad o compactación ocasionan que el vástago disminuya su expansión foliar, cierre de estomas y senescencia de hojas (Flores-Vindas, 1999).

En estudios de productividad, se ha utilizado el cociente del peso seco del vástago entre el de la raíz como unidad de medición, lo que se conoce como razón vástago:raíz. Éste puede ser modificado por factores externos y por la ontogenia (Marschner, 1986). Se ha encontrado en algunas plantas que cuando disminuye la intensidad de luz y el suministro de nutrientes, los fotosintatos se acumulan en las raíces por lo que el crecimiento de la raíz es mayor que el del vástago (Marschner, 1986). En la palma *Sabal palmetto* se ha reportado que el vástago crece más en biomasa que la raíz pero no se indican las condiciones del experimento ni las comparaciones y/o análisis realizados (Brown, 1976).

En general, se ha reportado que cuando se incrementa el suministro de nitrógeno, el peso seco del vástago aumenta más rápido que el de la raíz, ya que aumenta el nivel de citoquininas lo que promueve el crecimiento (Marschner, 1986; Flores-Vindas, 1999), esto se ha observado en hierbas perennes (Wilson y Tilman, 1993). Sin embargo, para maximizar el crecimiento la planta tiene que destinar más biomasa a la parte de la planta que está absorbiendo el recurso más limitante (Shipley y Peters, 1990). Las plantas son capaces de adecuar su arquitectura de acuerdo a las condiciones ambientales imperantes, y desde el punto de vista de selección natural, sólo los individuos capaces de adecuar su crecimiento sobreviven y se reproducen (Ledig, 1983).

Tilman (1988) propuso que la competencia por luz y nutrimentos actúa selectivamente sobre el crecimiento y la asignación de recursos en las plantas, siendo necesarios en ciertas proporciones para un crecimiento óptimo. En los ambientes con poca disponibilidad de luz, se esperaría encontrar plantas con una tasa de crecimiento baja y una mayor asignación de biomasa al vástago, a costa de la producción de raíces. Cuando las condiciones limitantes son de agua o nutrimentos, pero no de luz, presentan un aumento en la biomasa de raíces a expensas de una disminución en la biomasa del vástago (Mooney, 1972; Ledig, 1983; Tilman, 1988; Chapin, 1991). Por lo tanto las plantas que viven en sitios abiertos presentan una mayor asignación a raíces, mientras que las de sitios cerrados asignan una mayor cantidad de biomasa al vástago (Tilman, 1988).

Las características de las plantas, fisiología y translocación de recursos varían de acuerdo con el nivel de irradiación al cual están aclimatadas y/o ecológicamente restringidas. En las plantas aclimatadas ya sea a luz o a sombra, las hojas alcanzan su máxima actividad fotosinté-

tica a ese nivel que en otro. En los experimentos donde se someten a las plantas a sombra, hay que considerar que las diferentes partes de la planta están bajo diferentes intensidades de luz. Un efecto de la sombra consiste en disminuir la tasa de fotosíntesis respecto a la respiración, por lo que su crecimiento depende de que la actividad fotosintética de la planta exceda al gasto respiratorio. Aunado a esto, en condiciones de sombra aumenta la cantidad de bióxido de carbono, lo que favorece la fotosíntesis. La aplicación de nutrimentos puede provocar un mayor crecimiento de las raíces por lo que son capaces de captar mayores cantidades de agua y con ésta los nutrimentos (Harper, 1977).

Conforme aumenta la altura de las plantas es necesario aumentar la translocación de materiales producidos a estos tejidos. Las plantas leñosas y perennes crecen lento ya que destinan buena parte de su producción a tejidos de soporte (Givinish, 1988). Se ha registrado en *Beaucarnea recurvata* que la aplicación de fertilizantes (20N-8.6P-16.6K) no incrementa la altura de las plantas en un periodo de 10 meses en condiciones de invernadero (Wang y Sauls, 1988).

Las especies vegetales cultivadas han sido seleccionadas para consumir gran cantidad de insumos (fertilización) por lo que sus requerimientos nutricionales son muy diferentes que los requerimientos nutricionales de especies vegetales de ecosistemas naturales, cuyas especies crecen en suelos generalmente pobres en nutrimentos siendo una excepción las especies ruderales que necesitan alta disponibilidad de éstos (Chapin, 1988). Aunque se debe tener en consideración que no todos los ambientes naturales son pobres en nutrimentos y que además este comportamiento depende en gran medida de la especie y del nutrimento en cuestión. Las características morfológicas y fisiológicas de las plantas son factores que determinan su capacidad de adquisición de nutrimentos. Dependen del tipo de hábitat y la estrategia de supervivencia al estrés nutrimental de las especies (Aerts y Chapin, 1999).

Chapin (1980, 1988) agrupa a las especies vegetales que crecen en ecosistemas naturales en dos grupos (Tipo I y II) por sus características y su respuesta a la biodisponibilidad de nutrimentos.

Las especies comprendidas en el Tipo I, crecen en suelos con bajo contenido de nutrimentos o infértiles (como los ecosistemas áridos o semiáridos), presentan características de adaptación que conducen al almacenamiento y reciclaje de los nutrimentos que no se traduce en mayor crecimiento vegetativo. Mientras que las especies de suelos con alto contenido de nutrimentos ó fértiles (Tipo II) presentan características que conducen a un crecimiento producto de la alta absorción de nutrimentos en el suelo (Chapin 1980, 1988).

El balance de nutrimentos de especies perennes en ecosistemas pobres es determinado por la relación entre la adquisición y pérdida de nutrimentos (Aerts, 1995). La estrategia que siguen estas plantas es que tienden a almacenar grandes cantidades de nutrimentos, por lo que tienen una alta habilidad competitiva para la captura y acumulación de estos y bajas tasas de pérdida, lo que esta relacionado positivamente con bajas concentraciones de nutrimentos en tejidos senescentes. Para ello, estas especies retranslocan los nutrimentos desde los tejidos senes-

centes hacia tejidos nuevos, minimizando su pérdida con la caída de sus hojas. Por ello tienen tasas de bajo crecimiento y/o baja captura de nutrimentos (Grime, 1997). Además de que presentan una alta relación raíz:vástago (Chapin 1980, 1988).

Por otro lado, las especies ruderales (Tipo II), presentan características que conducen a altas tasas de crecimiento y a elevadas tasas de absorción de nutrimentos. También tienen altas concentraciones de nutrimentos en las hojas senescentes lo que resulta en una mayor aportación de nutrimentos al suelo por la caída de las mismas.

De esta manera no almacenan los nutrimentos, lo que resulta en mayores tasas de aportación de éstos al suelo, en relación con las plantas de bajo crecimiento (Tipo I) (Aerts, 1999).

La alta disponibilidad de nutrimentos para especies vegetales Tipo I, no se traduce en un mayor crecimiento en comparación con la biomasa producida cuando el nutrimento es limitante. En comparación, las especies vegetales de Tipo II, responden a la disponibilidad de nutrimento con producción de biomasa (Chapin 1980, 1988).

CICLAJE DE NUTRIMENTOS POR LAS PLANTAS

El ciclaje de nutrimentos es la forma principal de control de la distribución de nutrimentos en el suelo. Es en la parte más superficial del suelo donde se puede encontrar la mayor concentración de nutrimentos como K y P. Esto es debido al aporte de nutrimentos por la caída de las hojas de las plantas, las cuales al descomponerse la hojarasca liberan los nutrimentos que de otra manera no están disponibles para las raíces de las plantas. La extracción de nutrimentos por las plantas depende no solamente de la

relación de la tasa de captura y la disponibilidad de cada nutrimento. La profundidad de enraizamiento puede llegar a ser un factor determinante en la poza total de nutrimentos sujetos a ser utilizados por las plantas. En general, en suelos formados se muestra un incremento en la concentración de nutrimentos más allá de la profundidad en la que las raíces exploran el suelo (Richter, *et al.*, 1994; Jama, *et al.*, 1998).

DISTRIBUCIÓN DE NUTRIMENTOS EN TEJIDOS VEGETALES

El K junto con N, P, Mg, Cl y Mo están clasificados como elementos *móviles* en las plantas, esto significa que aunque todos los nutrimentos se mueven con relativa facilidad de las raíces a la parte aérea de las plantas a través del xilema, éstos nutrimentos pueden además moverse de las hojas más viejas a las más nuevas cuando éstas los requieren, como en el caso de la deficiencia de los mismos. Esta movilización de nutrimentos, empezando por las puntas de las hojas más viejas se da a través del floema. Conocer qué elementos son "*móviles*" es de ayuda para el diagnóstico en la deficiencia de nutrimentos en plantas, ya que si solamente las hojas de la parte inferior están afectadas, entonces es muy probable que la insuficiencia de alguno de estos elementos móviles sea el causante de esta deficiencia. Contrariamente, si solamente las hojas de la parte superior muestran la deficiencia, entonces es probable que la planta sea deficiente de algún elemento "*inmóvil*", debido a que estos últimos no pueden moverse de las hojas más viejas a las más nuevas para compensar esta deficiencia.

En la tabla 3 se presenta la clasificación de los nutrimentos minerales con base a su movilidad a través del floema. Este clasifica a los elementos de manera muy general, ya que para tener una clasificación más precisa se deben tener en cuenta ciertos factores como las diferencias genotípicas o el estado nutrimental de las plantas.

En especies de plantas nantrofóbicas la retranslocación en el floema es un componente importante para mantener bajos contenidos de Na^+ en las hojas (Marschner, 1995). Sin embargo, con frecuencia cantidades considerables de nutrimentos retranslocados son de nuevo liberados al xilema de las raíces para ser transportados de regreso a las hojas (ciclaje). Para K^+ se ha demostrado que al menos en ciertas especies el ciclaje de este nutrimento es un proceso importante para el mantenimiento del balance de carga en hojas y raíces. En términos más generales,

Tabla 3. Clasificación de los nutrimentos minerales basado en su movilidad en el floema como retranslocación del nutrimento

Movilidad en el floema		
Alta	Intermedia	Baja
Potasio (K)	Hierro (Fe)	Calcio (Ca)
Magnesio (Mg)	Zinc (Zn)	Manganeso (Mn)
Fósforo (P)	Cobre (Cu)	
Azufre (S)	Boro (B)	
Nitrógeno (N-amino)	Molibdeno (Mo)	
Cloro (Cl)		
Sodio (Na)		

Marschner, 1995.



la movilización de nutrimentos puede ser un medio útil para amortiguar las fluctuaciones externas en el suministro de los nutrimentos para igualar de manera más consistente la demanda de los mismos y para compensar la distribución heterogénea de nutrimentos minerales en la zona de enraizamiento (Loneragan, *et al.*, 1987; Webb y Loneragan, 1990; Romera, *et al.*, 1992).

La importación y exportación de los nutrimentos minerales se da de manera simultánea a lo largo de la vida de las hojas de las plantas. Como regla general, el envejecimiento (senescencia) de las hojas está asociado con tasas mayores de exportación (translocación) de nutrimentos minerales más que con la importación de los mismos. Por lo tanto, en la reducción en el contenido neto o más precisamente, en la disminución de la cantidad de nutrimentos en las hojas senescentes (Jeschke y Pate, 1991). En la literatura los términos *redistribución* y *retranslocación* son utilizados frecuentemente para describir este proceso, que también pueden ser usados como sinónimos de *removilización* de nutrimentos. La retranslocación o removilización de nutrimentos está basada en un rango de diferentes procesos fisiológicos y bioquímicos como: la utilización de los nutrimentos minerales almacenados en la vacuola (K, P, Mg, N-amino, etc.), la degradación de proteínas almacenadas (en vacuolas de células paraveniales de mesófilo de leguminosas; Klauer, *et al.*, 1991), o finalmente, la degradación de estructuras celulares (como el cloroplasto) y proteínas enzimáticas transformando de ese modo nutrimentos minerales que están unidos estructuralmente (micronutrimentos en enzimas, como el Mg^{2+} en clorofila) en una forma móvil.

Durante el crecimiento vegetativo, el suministro de nutrimentos a las raíces con frecuencia es insuficiente permanentemente (como en el caso de baja disponibilidad de nutrimentos en el suelo) o temporalmente interrumpido (por ejemplo, cuando hay una falta o exceso de humedad del suelo). La removilización de nutrimentos minerales de hojas maduras a áreas de reciente crecimiento es de vital importancia para la consecución del ciclo de vida de las plantas bajo condiciones desfavorables. Este comportamiento (estrategia) es típico de especies tolerantes (de bajo crecimiento), en tanto que para la mayoría de las especies de cultivo se da una reducción en el crecimiento bajo estas mismas condiciones. De tal manera, la removilización de nutrimentos juega un papel importante en el éxito de la capacidad de adaptación de especies silvestres ante condiciones ambientales adversas (Chapin, 1983).

El punto hasta el cual se da la removilización, difiere lógicamente entre nutrimentos y entre especies y es reflejado en la distribución de los síntomas de deficiencia en las plantas. Los síntomas de deficiencia que se dan predominantemente en hojas jóvenes y meristemas apicales reflejan una insuficiente removilización. En este caso, puede deberse a una insuficiente movilización de nutrimentos por el floema, o a que solo una pequeña fracción de los nutrimentos minerales pueden ser transformados a una forma móvil en las hojas más viejas. La magnitud de la removilización es importante para el diagnóstico del estado nutri-

cional de las plantas. Las hojas y otros órganos que responden al suministro insuficiente de un nutrimento mineral en particular por las raíces incrementando la removilización de ese nutrimento, son más adecuados para el análisis foliar que aquellas hojas u órganos menos responsivos (Marschner, 1995).

La removilización de nutrimentos minerales (excepto Ca y Mn) de las hojas de plantas vasculares es una característica típica de especies perennes antes de la caída de sus hojas, y está altamente relacionada con la decoloración de las hojas en otoño. De manera general, y similar en especies anuales, la magnitud de la removilización es alta para N, P, K y Zn, mientras que los contenidos de Ca, B, Fe y Mn se incrementan antes de la caída de las hojas (Sánchez-Alonzo y Lachica, 1987). Durante este periodo, se observan con frecuencia síntomas visibles típicos de deficiencia, indicando que durante el periodo de crecimiento pudo haber existido una deficiencia latente de algún nutrimento en particular.

En plantas que crecen en sustratos salinos, la removilización preferencial de ciertos nutrimentos minerales como K, con frecuencia resulta en síntomas de deficiencia de este nutrimento por un lado, y por el otro síntomas de toxicidad (por Na por ejemplo) en el margen de las hojas más viejas, indicando que este cambio conduce a un desequilibrio iónico extremo antes de la caída de las hojas (Marschner, 1995).

El conocimiento de las concentraciones de nutrimentos en las hojas es esencial en la relación que guardan las plantas con el suelo, dado que este contenido en gran medida es el reflejo del estatus de fertilidad de dicho suelo. Por lo tanto se deben tomar en cuenta los factores que afectan la movilización de nutrimentos en las plantas si se quiere incluir las concentraciones de nutrimentos en hojas como un parámetro del estatus de fertilidad de suelos de ecosistemas naturales. Asimismo, hay que tomar en cuenta que las especies silvestres poseen otras estrategias que les permiten compensar la pobreza de nutrimentos en el suelo, como la reutilización (removilización) de los nutrimentos ya absorbidos con anterioridad para evitar la pérdida de éstos con la caída de las hojas senescentes.

Por lo expuesto podemos concluir que las relaciones suelo-planta en ecosistemas naturales dependen de las estrategias de las mismas para optimizar la toma y uso eficiente de los nutrimentos, tanto en las partes aéreas como en las raíces y que cada especie vegetal ha desarrollado una serie de estrategias que determina la habilidad competitiva con respecto a otra en función de la disponibilidad de nutrimentos en el suelo. Por ello concluiremos con ejemplos de investigaciones que prueban las relaciones suelo-planta en palmares de la Península de Yucatán tomando en cuenta que las palmas juegan un papel preponderante en la estructuración y el funcionamiento de los ecosistemas (Kahn y De Granville, 1992) y que son un recurso natural aprovechable tanto actual como potencial (Johnson, 1996).

RELACIONES SUELO-PLANTA EN COMUNIDADES DOMINADAS POR PALMAS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Disponibilidad de K en el Suelo. En estudios del suelo de la duna costera de Yucatán (regosol calcáreo), Quintal (2000) documentó la disponibilidad de K para las raíces de las palmas *Thrinax radiata* y *Coccothrinax readii*. Los resultados muestran que la concentración de K en solución del suelo donde crece *T. radiata* (4.5 mM) es del doble en comparación con la encontrada para *C. readii* (2.7 mM). La capacidad amortiguadora es mayor para el suelo asociado a *T. radiata* (37.8 vs 35.7), mientras que el coeficiente de difusión efectivo fue similar en el suelo de ambas especies de palmas ($\sim 4.97 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$), documentando que la movilidad lineal de K para este suelo es de $\sim 0.654 \text{ mm día}^{-1}$ para ambas especies. Sin embargo, la zona de agotamiento de K es mayor para las raíces de *C. readii* (1.33 mm vs 1.29 mm). Esto nos demuestra que aunque la movilidad por difusión es la misma para ambas especies, la concentración de K en solución y la capacidad amortiguadora es mayor para *T. radiata*, por lo que la disponibilidad de K es mayor para las raíces de esta especie. En contraste palmares de *T. radiata* en suelos de la selva de Yum-Balam, Quintana Roo (Luvisol crómico) muestran que el K en la solución (C_i) va de 0.3 a 0.4 mM, que es aproximadamente 5 veces menor que lo encontrado en la duna costera de Yucatán con un coeficiente de difusión efectiva de K para el suelo de la selva de $0.195 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ a $0.247 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, aproximadamente 20 veces menor que el encontrado en la duna costera, sin embargo su capacidad de amortiguación es ~ 900 mayor comparado con la duna costera (Escamilla, datos no publicados). Los resultados concuerdan con la alta correlación (0.9015) entre la presencia de *T. radiata* y la concentración de K en el suelo reportado por Orellana y Ayora (1993). A pesar de que ya se han documentado estos parámetros de disponibilidad de K en estos suelos, todavía no se sabe por qué en la selva no se encuentra *C. readii* de manera natural junto con *T. radiata* como en la duna costera, por lo que el contenido de K del suelo debe ser solamente un factor secundario para la distribución de *C. readii*. Aun falta por determinar que factor o combinación de factores del medio ambiente están influenciando la distribución de esta especie en la Península.

Captación de K por las raíces de palmas. Se ha documentado que *C. readii* absorbe 5 veces más Rb^+ (K^+) que *T. radiata* bajo condiciones en las cuales el mecanismo responsable del transporte es el de baja afinidad ($< 1.0 \text{ mM}$), en tanto que esta diferencia se incrementa a casi 20 veces al inducir la activación del mecanismo de alta afinidad ($< 1.0 \text{ M}$), a pesar de que las raíces de ambas especies poseen la misma afinidad por este ión. Estos resultados sugieren que los mecanismos de captación de K^+ de *C. readii* son más dependientes de las concentraciones de este nutrimento en el suelo, por lo que bajo estas condiciones las raíces de *C. readii* presentan ventajas competitivas de la absorción de Rb^+ (K^+) sobre *T. radiata*. Aunque esto podría parecer una desventaja para *T. radiata*, el hecho de ser menos dependiente de las fuentes de K^+ del suelo, sugiere que esta especie debe poseer mecanismos alternos que le permiten establecerse y competir en un ecosistema dado aún cuando los parámetros de Michaelis-Menten indiquen sus menores tasas de absorción de K^+ (Quintal, 2003).

Por otro lado, bajo las condiciones del ecosistema en el cual crecen de manera natural, la cercanía con el mar impone otro reto para estas especies debido a las altas concentraciones de NaCl provenientes del mar. En un estudio de la determinación de nutrimentos en el suelo del hábitat natural (duna costera), Pereyda (2000) documentó que la concentración de Na^+ en el suelo que se encuentra influenciado por el dosel de *T. radiata* (45 mM) es aproximadamente tres veces mayor que la concentración de Na^+ en suelo de la duna costera y el influenciado por *C. readii* (debajo del dosel). Al probar la respuesta de *T. radiata* ante 50 mM NaCl, su absorción máxima (I_{max}) se incrementó a más de 6 veces respecto a su respuesta en ausencia de NaCl. Estos resultados sugieren que esta especie presenta requerimientos de Na^+ (características de las halófitas) o Cl^- , como ya ha sido reportado en otras especies de palmas como cocotero (*Cocos nucifera* L.) (Bonneau, et al., 1993; Bonneau, et al., 1997) y la palma aceitera (*Elais guineensis* Jacq.) (Ollagnier y Ochs, 1971; 1982). Sin embargo, el hecho de encontrar a *T. radiata* tierra adentro en la selva baja y mediana subcaducifolia donde la concentración de Na o Cl es despreciable lleva a pensar que esta especie pudiera ser en realidad una halófila facultativa. La I_{max} determinada para ambas especies de palmas es menor que las reportadas en la literatura para cultivos anuales, ya que la I_{max} reportada para maíz (*Zea mays* L.) es de 16 a $39 \times 10^{-4} \text{ mol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Barber, 1984), en tanto que para cebada (*Hordeum vulgare* L.) es de $24 \times 10^{-4} \text{ mol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Marschner, 1995). Los valores de este parámetro en maíz son de 7 a 18 veces, y en cebada de más de 11 veces respecto a *T. radiata*. Al compararlos con *C. readii*, la I_{max} de maíz es de 1.5 a 4 veces mayor y de 2 veces mayor en cebada. En el caso de las raíces de pino (*Pinus elliotii*) la I_{max} es de $0.0125 \times 10^{-4} \text{ mol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Van Rees, 1995), que es dos órdenes de magnitud menor que la I_{max} de estas dos especies de palmas.

En conjunto estos resultados muestran que los parámetros de absorción (I_{max}) de Rb^+ (K^+) de *T. radiata* y *C. readii* son intermedios entre la alta absorción de K^+ por las especies de cultivo y una menor absorción por especies perennes forestales. En tanto que la afinidad (K_m) de las raíces de *T. radiata* y *C. readii* por el K^+ es de 10 a 30 veces mayor que en especies de cultivo como el maíz o girasol (cuanto menor es el valor de K_m , mayor es la afinidad por el nutrimento). Por lo que podemos deducir que bajo condiciones de cultivo (en los que fertilidad del suelo usualmente es alta), estas palmas estarán en desventaja respecto a las especies cultivables que tienden a agotar los recursos más rápidamente dadas sus mayores tasas de crecimiento en comparación con las menores tasas de crecimiento de estas palmas, a pesar de que la afinidad por K^+ mostrada por estas palmas sea mayor que las mostradas por las especies de cultivo. Aquí surge la pregunta ¿Por qué las especies de lento crecimiento, de hábitats pobres en nutrimentos generalmente no poseen elevadas cinéticas de toma de nutrimentos? La respuesta es que, en estos hábitats, la disponibilidad de nutrimentos y agua es baja y los nutrimentos que se encuentran en la zona de agotamiento tienen que difundirse hacia las raíces por lo que la competencia principal es por agua y nutrimentos. Esto implica que uno de los factores limitantes en estos hábitats no son las cinéticas de absorción *per se*, sino la tasa de difusión



de los iones en la solución del suelo. Por lo que especies con elevadas cinéticas de absorción de nutrimentos presentan desventajas, debido principalmente a que cinéticas altas de toma de nutrimentos no conducen siempre a elevadas tasas de absorción de nutrimentos bajo estas condiciones, en cambio, este comportamiento sí conduce a mayores costos de C para la construcción y mantenimiento de proteínas transportadoras en membrana y de las raíces en general. De tal manera que bajo las condiciones que su hábitat natural les impone, *T. radiata* y *C. readii* pueden competir por los nutrimentos disponibles con tasas de absorción de nutrimentos (I_{max}) intermedios sin agotar rápidamente los pocos nutrimentos disponibles en el suelo, aprovechando la elevada afinidad (K_m) de los transportadores por los iones en sus raíces para captar exitosamente estos recursos antes que otras especies.

Crecimiento de palmas en función de disponibilidad de nutrimentos. El crecimiento de palmeras de *T. radiata* puede acelerarse bajo condiciones de vivero manteniendo condiciones de sombra y regímenes de fertilización, ya que las plántulas responden positivamente al suministro de nitrógeno, especialmente las raíces (Pérez, 2002). Las plantas de *T. radiata* presentaron un mayor crecimiento en altura cuando se mantuvieron en condiciones de sombra que de luz al 100%. En este estudio la fertilización no promovió el crecimiento en altura, tanto en condiciones de luz como de sombra, lo que también se ha registrado en *Beaucarnea recurvata* (Wang y Sauls, 1988). *T. radiata*, es una palma de crecimiento lento en altura en condiciones naturales (0.36 mm año^{-1}) (Calvo-Irabién, datos no publicados), una tasa de crecimiento 2.6 veces menor que cuando se fertilizan (0.96 mm año^{-1}) (Pérez, 2002). La razón vástago:raíz disminuyó en los tratamientos que contenían nitrógeno. Se comprobó que el N es el macronutriente más limitante para el crecimiento de palmas en contenedores según lo reporta Broschat (1992), ya que los tratamientos con Nitrógeno(N)-Fósforo(P)-Potasio(K) como N-P-K, N-0-K y N-0-0 dieron como resultado un aumento en biomasa en la parte aérea y radicular, mientras que en los tratamientos en los que se excluye el N se abate la velocidad de crecimiento respecto a los tratamientos en los que éste se incluye. Es probable que el mayor crecimiento de biomasa de las raíces en tratamientos no limitantes en N, se deba a que éstas se producen para absorber nitrógeno y otros nutrimentos del suelo y translocarlos a la parte aérea de la planta, lo que se hace evidente a lo largo del tiempo (Harper, 1977; Chapin, 1980, 1988; Shipley y Peters, 1990). Esto contrasta con lo propuesto por Ledig (1983), ya que en general las especies vegetales como árboles tropicales y en coníferas como *Pinus rigida*, presentan un mayor crecimiento de la raíz en relación al vástago cuando los nutrimentos son limitantes.

La biomasa en las hojas (vástago) no fue significativamente diferente en el tratamiento de luz porque se registró un peso total final casi igual en los tres tratamientos considerados, pero sí se registraron diferencias en la biomasa de la raíz, lo que muestra que las variaciones de crecimiento en la raíz están ejerciendo una influencia muy marcada sobre el crecimiento de la planta. Sin embargo, el crecimiento en biomasa en las hojas registró un aumento significativo a lo largo del tiempo, lo que refleja la acumulación de fotosintatos en la parte de soporte de la planta (Givinish, 1988). Además se observó que la relación vástago:raíz fue mayor en condiciones de 35% de sombra

(1.7 ± 0.1) que al 100% de luz (1.5 ± 0.1), lo que muestra que las plantas de *T. radiata* asignan una mayor cantidad de recursos para el crecimiento de la parte aérea con relación a las raíces en condiciones limitantes de luz, lo que concuerda con lo propuesto para crecimiento de plantas en estas condiciones (Mooney, 1972; Ledig, 1983; Tilman, 1988; Chapin, 1991). Esto responde a que en condiciones de sombra el suministro de bióxido de carbono aumenta, lo que favorece el incremento de la producción de fotosintatos, su acumulación en la parte aérea y una tasa de transpiración reducida (Harper, 1977; Björkman, 1981; Pearcy *et al.*, 1989). Además, como el factor limitante es luz, la planta mantiene los fotosintatos en el vástago (Ledig, 1983; Shipley y Peters, 1990).

Asimismo, al someter a las plantas de *T. radiata* a 100% de luz se observó lo propuesto por algunos autores, al ponerlas en condiciones de luz extremas las plantas aumentan la biomasa de la raíz y disminuyen la razón vástago:raíz, ya que las plantas no pueden aumentar más allá de su capacidad fotosintética y disminuyen su área foliar para evitar la pérdida de agua. Esto se traduce en un menor crecimiento en biomasa del vástago y un mayor crecimiento de la raíz (Björkman, 1981; Tilman, 1988). Además, se observaron algunos efectos deletéreos como que las plantas presentaban un color amarillento, lo cual ha sido observado por otros autores (Björkman, 1981).

Aunado a lo anterior la fertilización con N-P-K provocó un crecimiento de 1.5 veces y de 2 veces a los 90 y 180 días respectivamente en las plantas de *T. radiata*, lo que concuerda con la recomendación para la fertilización en palmas que se encuentran creciendo en contenedores (Broschat, 1992, 1999; Meerow y Broschat, 1996). De acuerdo con esto, el crecimiento de *T. radiata* en condiciones de vivero y con sustratos de la región puede mejorarse fertilizando con N-P-K en proporción 18-6-12 por Kg de sustrato y cada 3 meses. Adicionalmente, podemos inferir que *T. radiata* presenta una estrategia de crecimiento que correspondería a plantas perennes de bajo crecimiento (Tipo I), que crece en hábitats con suelos infértiles y que en condiciones de buena disponibilidad de nutrimentos se observa un incremento lento en su crecimiento, tanto en el vástago como en la raíz (Chapin, 1980, 1988; Aerts, 1995).

Ciclaje de nutrimentos en palmas. Dadas las características de poca profundidad de los suelos de la Península de Yucatán las raíces de las plantas que crecen en estas condiciones deben entonces ser capaces de explorar la mayor parte del suelo dada su poca profundidad en la Península, por lo que la dinámica de los nutrimentos en el proceso de ciclaje debe ser eficiente con respecto a regiones que presentan suelos más profundos. Por ejemplo, el aporte potencial de K al suelo por la caída de las hojas de *T. radiata* es 30 veces mayor respecto a *C. readii* en la duna costera de San Benito, Yucatán. Esto se debe a que la concentración de K, materia seca, y número de hojas es mayor en *T. radiata* (Medina-Lara, *et al.*, 1999). Con lo cual *T. radiata* promueve cambios mayores en el contenido de nutrimentos y materia orgánica favoreciendo la formación del suelo en el cual crece respecto a *C. readii*.

Pérez Jiménez (2004) documentó el contenido de nutrimentos presente en la Fracción Ligera de la Materia Orgánica (FLMO) en suelos donde se encuentran palmares de *T. radiata* en Quintana Roo y demostró que el % y contenido de nutrimentos es dependiente de la humedad

del suelo siendo el porcentaje de la FLMO mayor en época de secas (5.6%) que en la época de lluvias (3.8%). De manera similar los contenidos de P, K, Mg, Ca y Na de la FLMO fueron mayores en la época de secas que en la de lluvias lo que se resultó en mayor concentración de estos elementos en palmas adultas y juveniles. Se concluyó que el contenido de agua en el suelo regula el flujo de nutrientes asociado con la fracción ligera de la materia orgánica.

En estudios realizados por Guillén (2001), con palmas nativas de la duna costera de la Península de Yucatán encontró que la removilización de P es del 63% al 66% en palmas adultas de *Thrinax radiata* y *Coccothrinax readii*, mientras que la de K es mayor del 93%. Sosa (2002) encontró similitud en la removilización de P en las hojas de ambas especies, tanto en palmas adultas como juveniles con una tasa del 55% a 61% y valores de removilización de K en palmas juveniles y adultas mayores al 88% en ambas especies. Los resultados reportados por estos autores, muestran que *T. radiata* presenta una mayor concentración de Ca en sus hojas en comparación con *C. readii* y de-

bido a que el Ca es un elemento que se encuentra en altas concentraciones en el suelo de la duna costera, estas especies tienden a eliminar el exceso de este elemento al tirar las hojas senescentes en las cuales acumula este nutrimento. La tasa de acumulación de Ca es la misma para ambas especies según documentaron estos autores.

Con base en estos resultados se puede observar que la estrategia de ambas especies de palmas es la de retranslocar los nutrimentos como P y K. Mientras que elementos como Ca son eliminados con la caída de las hojas. Esto puede deberse a que por la naturaleza *per se* del suelo presenta altas concentraciones de Ca, así como una alta concentración de Na debido a la cercanía con el mar. Estas condiciones y el pH, influyen en la disponibilidad de nutrimentos del suelo, por lo que en estos suelos se espera que exista baja disponibilidad de N, P, Fe y Zn, así como probable toxicidad por exceso de Na y Ca. Por lo que para sobrellevar estas condiciones, las plantas tienden a removilizar los elementos móviles esenciales como una estrategia adaptativa para compensar la baja disponibilidad de los mismos en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó como resultado de los proyectos: "Características nutricionales de palmas endémicas de la Península de Yucatán" y "Conservación, manejo sustentable y propagación de la palma *Thrinax radita* (Chit) en tres ejidos del norte de Quintana Roo" del Centro de Investigación Científica de Yucatán. Agradecemos el apoyo en campo de Oswaldo Pech Cauich y Gerardo Ceballos para la obtención de los resultados presentados. También agradecemos a los estudiantes tesis de licenciatura: Carlos Pereyda, Diana Guillén, Irving Sosa, Edward Pérez y Roberto Sibaja por que mediante sus trabajos de investigación aportaron evidencias para esta revisión.

REFERENCIAS

- Aerts, R., 1995.** The advantages of being evergreens. *Trends in Ecol. Evol.* 10: 402-407.
- Aerts, R., 1999.** Interspecific competition in natural plant communities: mechanisms, trade-offs and plant-soil feedbacks. *J. Exp. Botany.* 50: 29-37.
- Aerts, R. y F.S. Chapin III, 1999.** The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Adv. Ecol. Res.* 29: (in press).
- Alcérreca, C., Arellano, A., Bezaury, J., Chavez, M., Robles de Benito, R. y H. Rodríguez, 1999.** Areas Protegidas. En: Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. México. pp. 227-234.
- Barber, S.A., 1984.** Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Barrera, A., 1962.** La Península de Yucatán como provincia biótica. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 23:71-105.
- Barrow, C. J., 1991.** Land degradation: development and breakdown in terrestrial environments. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A. y R. Lozano, 2003.** Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en leptosoles cársticos. *Terra.* 21: 1-11.
- Björkman, O., 1981.** Responses to different quantum flux densities. En Lange, O.L.; Nobel, P.S. Osmond, C.B. y H. Niegl. (eds.). *Encyclopedia of plant physiology.* Springer Verlag, Berlin. Vol. 12: 57-107.
- Bonneau, X., D. Boutin, R. Bourgion y J. Sugianto, 1997.** Sodium chloride, an ideal fertilizer for coconut palms in Indonesia. *Agronomie.* Sept-Oct. 336-446.
- Bonneau, X., R. Ochs, W.T. Kito y Yuswohadi, 1993.** Chlorine: an essential element in the mineral nutrition of hybrid coconuts in Lampung (Indonesia). *Oléagineux.* 48: 179-190.
- Broschat, T. K. y A.W. Meerow, 1992.** Palm nutrition guide. Florida cooperative extension service. IFAS, University of Florida.
- Broschat, T.K. 1999.** Nutrition and fertilization of palms. *Palms.* 43: 73-76.
- Brown, K.E. 1976.** Ecological studies of the cabbage palm, *Sabal palmetto*. III. Seed germination and seedling establishment. *Principes.* 20: 98-115.
- Caldwell, M.M. 1987.** Competition between root systems in natural communities. pp. 167-186. En Gregory, P.J.; Lake, J.V. and D. Rose (eds.). Root development and function. Society for experimental biology seminar series. No. 30. University Press, Cambridge. 206 p.



- Caldwell, M.M., J.H. Manwaring y S.L. Durham, 1996.** Species interactions at the level of fine roots in the field influence soil heterogeneity and plant size. *Oecologia*, 106: 440-447.
- Carnevali, G., I. Ramírez, I y J. A. González-Iturbe, 2003.** Flora y vegetación de la Península de Yucatán. En: Larqué Saavedra, A. y P. Colunga García-Marín, (Eds.). *Naturaleza y Sociedad en el área Maya*. Edición de la Academia Mexicana de la Ciencia-CICY. México. En prensa.
- Chapin, F.S. III, 1980.** The mineral nutrition of wild plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 11: 233-260.
- Chapin, F.S. III, 1983.** Adaptation of selected trees and grasses to low availability of phosphorus. *Plant Soil*. 72: 283-297.
- Chapin, F.S. III, 1988.** Ecological aspects of plant mineral nutrition. En *Advances in plant nutrition*. Vol 3. Tinker, B. and A. Läuchli (eds.). Praeger, New York.
- Chapin, F.S. III, 1991.** Effects of multiple environmental stresses on nutrient availability and use. En Mooney, H.A.; Winner, W.E.; Pell, E.J. y E. Chu (eds.). *Responses of plants to multiple stresses*. San Diego, California. Academic Press.
- Clements, F.E., 1916.** Plant succession: an analysis of the development of vegetation. Carnegie. Inst. Publ. No. 242. Washington, D.C.
- Comerford, N.B., 1999.** Mecanismos de captación de nutrientes en ecosistemas forestales: de cómo interpretar la fertilidad en el contexto de la conservación de recursos genéticos. En Orellana, R.; Escamilla, J.A. y A. Larqué-Saavedra (eds.). *Centro de Investigación Científica de Yucatán*, A.C. Mérida, México. 222 p.
- Cortina-Villar, S., M. Mendoza, P.M. Ogneva y Y. Himmelberger, 1999.** Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. *Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM. Investigaciones Geográficas*. Vol. 38. pp. 41-56.
- Duch, J., 1988.** La conformación territorial del estado de Yucatán. Los componentes del medio físico. Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional de la Península de Yucatán. Mérida, México.
- Durán, R., J.C. Trejo y G. Ibarra-Manriquez, 1998.** Endemic phytotaxa of the Peninsula of Yucatan. *Harvard Papers in Botany*. 3:263-314.
- Escamilla, J.A., 1999.** Estudio de suelos y de ecosistemas vegetales. En Orellana, R.; Escamilla, J.A. y A. Larqué-Saavedra (eds.) *Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos*. Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, México.
- Estrada-Loera, E., 1991.** Phytogeographic relationships of the Yucatan Peninsula. *J. of Biogeog.* 18:187-197.
- Flores-Vindas, E., 1999.** La planta: estructura y función. LUR. Vol. II. Costa Rica.
- Givinish, T.J., 1988.** Adaptation to sun and shade: a whole plant perspective. *Aust. J. Plant Physiol.* 15: 63-92.
- Grime, J.P., 1997.** Integrated screening validates primary axes of specializations in plants. *Oikos*. 79: 259-281.
- Grof, P.A. y D.R. Kaplan, 1988.** The relation of root systems to shoot systems in vascular plants. *The Botanical Review*. 54: 387-421.
- Guillén, D.K., 2001.** Determinación de nutrientes de palmas de la duna costera de San Benito, Yucatán, *Thrinax radiata* y *Coccothrinax readii*. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Química. Tesis de licenciatura. Mérida, Yucatán, México.
- Harper, J.L., 1977.** Population biology of plants. Londres. Academic Press. Pp. 33-496.
- Houghton, R. A., D. L. Skole, C. A. Nobre, J. L. Hackler, K. T. Lawrence y W. H. Chomentowski, 2000.** Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature* 403:301-304.
- Jama, B., R.J. Buresh, J.K. Ndufa y K.D. Shepherd, 1998.** Vertical distribution of roots and soil nitrate: tree species and phosphorus effects. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 62: 280-286.
- Jeschke, W.D. y J.S. Pate, 1991.** Cation and chloride partitioning through xylem and phloem within the whole plant of *Ricinus communis* L. under conditions of salt stress. *J. Exp. Bot.* 42: 1105-1116.
- Johnson, D., 1996.** Palms: their conservation and sustained utilization. IUCN, Switzerland 116 pp.
- Kahn, F. and J. J. De Granville, 1992.** Palms in forest ecosystems of Amazonia. Springer Verlag, Berlin. 226 pp.
- Klauer, S.F., V.R. Franceschi y M.S.B. Ku, 1991.** Protein composition of mesophyll and paravenial mesophyll of soybean leaves at various developmental stages. *Plant Physiol.* 97: 1306-1316.
- Ledig, F.T., 1983.** The influence of genotype and environment on dry matter distribution in plants. En Huxley, P.H. (ed.). *Plant research and agroforestry*. Nairobi. International council for research in agroforestry. pp. 427-454.
- Loneragan, J.F., G.J. Kirk y M.J. Webb, 1987.** Translocation and function of zinc in roots. *J. Plant Nut.* 10: 1247-1254.
- López-Ramos, E., 1979.** Estudio geológico de la península de Yucatán. *Enciclopedia yucatanense*. Tomo X. Mérida, México.
- Magier, J. e I. Ravina, 1984.** Rock fragments and soil depth as factors in land evaluation of Terra Rossa. *Special Public. Soil. Sci. Soc. Amer.* 13: 13-30.
- Marschner, H., 1995.** Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, Cambridge, UK. 889 p.
- Marschner, H., 1986.** Mineral nutrition in higher plants. Germany. Academic Press.
- Medina-Lara, F., O. Pech-Cauch y J.A. Escamilla-Bencomo, 1999.** Muestreo y distribución de potasio (K) en hojas de palmas endémicas de la duna costera de Yucatán. En V Reunión de investigación química en el sureste de México. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Química. Memorias de congreso. Mayo de 1999. Mérida, Yucatán, México.
- Meerow, A.W. y K.T. Broschat, 1996.** Container production of palms. Cooperative Extension Service. IFAS. University of Florida.
- Miranda, F., 1958.** Estudios acerca de la vegetación. En E. Beltrán (Ed.). *Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento*. IMENAR, México. pp. 215-271.
- Miranda, F. y E. Hernández, X., 1963.** Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 28: 29-179.
- Mooney, H.A., 1972.** The carbon balance of plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 3: 315-346.
- Nye, P.H. y P.B. Tinker, 1977.** Solute movement in the soil-root system. University of California Press, Berkeley, California, USA. 342 p.
- Ollagnier, M. y R. Ochs, 1982.** Management of mineral nutrition on industrial oil palm plantations fertilizer savings. En Pushparajah, E. and P.S. Chew (eds). *The oil palm in agriculture in the eighties*. Vol. II. p 71-90. Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, Malays.
- Orellana, R. y N. Ayora, 1993.** Population structure of two palm species in a community of sand dune scrub in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Principes*. 37: 26-34.
- Orellana, R. y R. Durán, 1992.** Las palmas de la Península de Yucatán: un patrimonio que debemos conservar. Universidad Autónoma de Yucatán. Gaceta Universitaria. 14: 22-28.
- Pearcy, R.W., J. Ehleringer, H.A. Mooney y P.W. Rundel, 1989.** Plant physiological ecology: field methods and instrumentation. Great Britain. Chapman and Hall. pp 15-116.
- Pereyda, C.M., 2000.** Determinación nutricional en suelos asociados a dos palmas endémicas de la Península de Yucatán *Thrinax radiata* y *Coccothrinax readii*. Instituto Tecnológico Agropecuario No. 2. Memorias de residencia profesional. Conkal, Yucatán, México.
- Pérez, E., 2002.** Germinación y crecimiento de la palma *Thrinax radiata* Loddiges ex, J.A. Schult. en condiciones naturales y controladas. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma de Yucatán. Tesis de Licenciatura. 87 p.



- Pérez Jiménez, E., 2004.** Nutrimientos en la Fracción Ligera de la Materia Orgánica y el Suelo en palmares de *Thrinax radiata* en Quintana Roo. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Universidad Autónoma de Yucatán. Tesis de Licenciatura. 66 p.
- Quintal, F.H., 2000.** Disponibilidad de potasio del suelo de la duna costera de San Benito, Yucatán, para las raíces de *Thrinax radiata* y *Coccothrinax readii*. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Química. Tesis de Licenciatura. Mérida, Yucatán, México. 62 p.
- Quintal, F.H., 2003.** Absorción de Rb^+ (K^+) por raíces de las palmas de *Thrinax radiata* y *Coccothrinax readii*. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Posgrado en Ciencias y Biotecnología de Plantas. Tesis de Maestría, Mérida, Yucatán, México. 123 p.
- Raich, J.W., 1983.** Effects of forest conversion on the carbon budget of a tropical soil. *Biotropica* 15:177-184.
- Ranger, J y M.P. Turpault, 1999.** Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*. 122:139-154.
- Raven, P.H., 1988.** Our diminishing tropical forests. En: Wilson, E.O. (Ed.). Biodiversity. Washington, USA. National Academy Press. pp.119-122.
- Richter, D.D., D. Markewitz, C.G. Wells, H.L. Allen, R. April y P.R. Heinen, 1994.** Soil chemical change during three decades in a loblolly pine ecosystem. *Ecology*. 75: 1463-1473.
- Romera, F.J., E. Alcantara y M.D. de la Guardia, 1992.** Role of roots and shoots in the regulation of the Fe efficiency responses in sunflower and cucumber. *Physiol. Plant*. 85: 141-146.
- Rzedowski, J., 1978.** Vegetación de México. Limusa. México.
- Saggar, S., M.J. Hedley y R.E. White, 1990.** A simplified resin membrane technique for extracting phosphorus from soils. *Fertilizer Research*. 24: 173-180.
- Salisbury, F.B. y C.W. Ross, 1985.** Plant physiology. California. Wadsworth Publishing Company. 540 p.
- Sánchez-Alonzo, F. y M. Lachica, 1987.** Seasonal trends in the elemental content of sweet cherry leaves. *Comm. Soil Sci. Plant. Anal*. 18: 17-29.
- Schoenau, J.J., W.Z. Huang y P. Qian, 1992.** Soil fertility analysis using ion exchange membranes. En Havlin, J.L.(ed.). Proceedings of the great plains soil fertility conference. pp 32-39. Denver, Colorado. Vol 4. Kansas State University.
- Schoenau, J.J. y W.Z. Huang, 1991.** Assessing P, N, S, and K availability in soil using anion and cation exchange membranes. En Proceedings of the 1991 western phosphate and sulfur workgroup. pp 131-136. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Schoenau, J.J., P. Qian y W.Z. Huang, 1993.** Ion exchange resin strips as plant root simulators. *Proc. Soil and Crops workshop*. University of Saskatonewan, Saskatoon, Canada. pp. 392-400.
- Shipley, B. y R.H. Peters, 1990.** A test of the Tilman model of plant strategies: relative growth rate and biomass partitioning. *The American Naturalist*. 136: 139-153.
- Soil Survey Staff, 1999.** Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. USDA Natural Resource Conservation Service Agriculture Handbook # 436, U.S. Government Printing Office, Washington DC
- Sosa, I.F., 2002.** Concentración temporal de nutrimentos en dos tipos de palmas nativas de la Península de Yucatán *Thrinax radiata* y *Coccothrinax readii*. Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Química. Tesis de licenciatura. Mérida, Yucatán, México.
- Stone, E.L., 1975.** Effects of species on nutrient cycles and soil change. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*. 271: 149-162.
- Teran, S. y C.H. Rasmussen, 1994.** La milpa de los Mayas. Danish International Development Agency. Merida, Mexico.
- Tilman, D., 1988.** Dynamics and structure of plant communities. Princeton University Press.
- Turner, B. L., S. Cortina-Villar, D. Foster, J. Geoghehan, E. Keys, P. Klepeis, D. Lawrence, P. Macario-Mendoza, S. Manson, A. Ogneva-Himmelbergger, A. Plotkin, D. Perez Salicrup, R. Chowdhury, B. Savitsky, L. Schneider, B. Scmook y C. Vance, 2001.** Deforestation in the southern Yucatan peninsular region: an integrative approach. *Forest Ecology and Management*. 154:353-370.
- Van Rees, K.C.J., 1995.** Michaelis-Menten kinetics: calculation and use in nutrient uptake model. *New Zealand J. Forest. Sci*. 24: 226-233.
- Vitousek, P.M y R.W. Howarth, 1991.** Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry*. 13: 87-115.
- Wang, W.T. y J. Sauls, 1988.** Influence of light, medium and fertilization on growth and acclimation of ponytail palm. *HortScience*. 23: 720-721.
- Webb, M.J. y J.F. Loneragan, 1990.** Zinc translocation to wheat roots and its implications for phosphorus/zinc interaction in wheat plants. *J. Plant Nut.* 13: 1499-1512.
- Weisbach, C., H. Tiessen, y J. Jimenez-Osornio, 2002.** Soil fertility during shifting cultivation in the tropical karst soils of Yucatan. *Agronomie*. 22: 253-263.
- Wilson, S.D. y D. Tilman, 1993.** Plant competition and resource availability in response to disturbance and fertilization. *Ecology*. 74: 599-611.



III

MANEJO DE SUELOS



DIAGNÓSTICO DE SUELOS PARA EL MANTENIMIENTO DE LA FERTILIDAD EN ÁREAS TROPICALES

David J. Palma-López, Sergio Salgado, y Arnulfo Triano

Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco

RESUMEN

Las metodologías utilizadas para generar recomendaciones de fertilización han sido ligadas al desarrollo de los conocimientos de suelo, clima, estadísticos, de cómputo y la conceptualización de la relación suelo-planta (Etchevers *et al.*, 1991). En México se han utilizado dosis fijas de fertilización por muchos años, sin considerar la variedad del cultivo y tipos de suelos. Por lo que, es necesario plantear nuevas estrategias que permitan aplicar la cantidad de nutrientes que demanda el cultivo para mantener rendimientos adecuados y así evitar el empobrecimiento del suelo a mediano plazo. Se encontró, que la demanda del cultivo de la caña de azúcar en los suelos Fluvisol, Luvisol y Leptosol tuvieron los mayores rendimientos de biomasa aérea, (así también las variedades Mex 57-453 cultivada en Fluvisol y la Mex 68-P-23 cultivada en el resto de los suelos, demandaron cantidades variables de nutrimentos. El suministro de N fue bajo, por la pérdida a través de la quema y la baja relación C/N de los suelos. El suministro de P fue suficiente en la mayoría de los suelos, debido al reciclaje del P por la quema de los residuos, su poca movilidad y las aplicaciones anuales a través de la fertilización, el suministro de K en las unidades Fluvisol y Cambisol abastece la demanda del cultivo de la caña debido, a su incorporación durante la quema e historial de fertilización. Se obtuvieron déficits de N y P en todos los casos y en dos para el K, los déficits difieren entre sí, lo que refleja la variabilidad de los contenidos nutrimentales de los suelos así como el historial de manejo de cada sitio. Observándose que existe una relación estrecha con la potencialidad de los suelos. Respecto al diagnóstico de la fertilidad en las plantaciones de cacao se encontró que los nutrimentos P y Mg presentaron altas concentraciones en suelo y en las plantaciones en el área que mostraron un comportamiento similar de estudio fueron, en el caso del Ca y K, para el primero existe un alto suministro de los suelos (100%) y un 75% en niveles deficientes en las plantas. Para el K en el suelo, en su mayoría fue considerado bajo (70%) y un 80% de las muestras fueron consideradas como altos. Por lo tanto, no se cuenta con suficiente evidencia para inferir el porque de estas respuestas. Por su parte, los micronutrientes en los suelos mostraron suministros adecuados. Sin embargo, la mayoría reflejó altos problemas nutrimentales; al respecto en el estado de Tabasco se realizan muy pocos esfuerzos dirigidos al estudio de los micronutrientes, de aquí se infiere la necesidad de establecer una mayor cantidad de trabajos que este encaminados a resolver estos problemas.

ABSTRACT

Methods used to generate recommendations about fertilization have been linked to the development of knowledge about soil, weather, statistics, computing and to the understanding of the interaction between soil and plant (Etchevers et al., 1991). Fixed-doses of fertilizers have been used in Mexico for many years with no consideration to the both kinds of crop and soil. Therefore, it is necessary to present new strategies in order to determine the amount of nutrients required by the crop so the suitable yields are maintained and the impoverishment of the soil in a medium term is avoided. Results show that Fluvisols, Luvisols and Leptosols had the highest yields of aerial biomass. The variety Mex 57-453 cultivated on Fluvisol and Mex 68-P-23 cultivated on the remaining of soils (Vertisol, Cambisol, Luvisol and Leptosol) demanded various amounts of nutrients. The N input was low because this element was lost during burning and also because the relation between C/N observed on these soils was low. P provided was sufficient in most soils because P was recycle when the remainders were burned, and also because it had little mobility. The annual applications of fertilizers was constant. When the application of ha K on Fluvisol and Cambisol plots satisfied the demand for sugar cane crop as it is incorporated during burning and there is a fertilization background. Deficits of N and P were obtained in all cases, while K deficits were detected in two cases. Difference between deficits indicate that both the nutrient content of the soils and the management background on each site was variable. A close relationship between this deficits the soil potentiality was detected. The fertility diagnosis show high P and Mg levels in soils and cacao plantations. Showed Ca input on soils was high but was 75% deficiency in the plants. Most of the soil content of K was low (70%) but 80% of the foliar samples had high content. For this reason there is no enough evidence to know the reason of these responses. In general, the micronutrients (Zn, Cu, Fe) had suitable content in the soils from the cacao plantations but most of them had numerous nutrient problems. Few efforts are to study micronutrients are made in Tabasco, so that More Research is needed in order to solve this problem.

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de suelos es una serie de técnicas y procedimientos que nos permite determinar sus características físicas y químicas para el desarrollo de los cultivos. En condiciones ecológicas tropicales, los suelos mantienen un ritmo cíclico en sus procesos que no se detiene, como suele ocurrir en otras regiones de latitudes intermedias, como las regiones templadas, donde la actividad biológica se reduce al mínimo por las bajas temperaturas. Esta actividad físico-química y biológica de los suelos esta regulada fundamentalmente por la humedad y la temperatura; ya que esta última es alta y constante durante todo el año en latitudes tropicales.

La agricultura contemporánea registra la pérdida de la capacidad productiva de los suelos, como uno de los más graves problemas, a consecuencia del deterioro de sus componentes físicos, químicos (Ribon *et al.*, 2002), y particularmente el biológico en condiciones tropicales. Si el suelo fuese únicamente desprovisto de su cobertura natural, sin ser sometido al laboreo con maquinaria agrícola, la exposición directa a factores como la radiación solar, el calor, la precipitación y los vientos, provocarían cambios en sus características físicas, químicas y biológicas, que conlleva a un proceso de deterioro, que dependerá de la capacidad del suelo, si se le considera como un sistema de retroalimentación negativa, capaz de retornar a las propiedades originales de su estado natural, es decir, de su elasticidad, y de la intensidad de la intervención y uso al que fuera sometido.

Eswaran, citado por Warkentin (1995) consideró que la elasticidad, es la capacidad del mismo para recuperar sus funciones normales después de un estrés inducido por

causas naturales o humanas. Es por ello, que definir las características del suelo en su condición original, permite fijar el patrón o situación ideal en el cual el mismo debería permanecer bajo una condición de uso y cobertura adecuada, garantizando su utilización prolongada de manera sostenida en el tiempo y el espacio, con un grado mínimo de deterioro. Warkentin (1995), señala que la calidad del suelo es la clave para la agricultura sustentable; ya que su comprensión resulta básica para el conocimiento de los procesos ecológicos naturales. Al respecto Lal (1994) propone una lista de indicadores para determinar la sostenibilidad de los suelos (Tabla 1).

Comprender el significado de la fertilidad de un suelo exige conocer su naturaleza desde un punto de vista agro-nómico. El concepto moderno de suelo la define como la colección de cuerpos naturales sobre la superficie terrestre, en algunos lugares modificados o incluso hecho por el hombre a partir de materiales terrestres, conteniendo materia viva y soportando o permitiendo de soportar plantas superiores (Soil Survey Staff, 1998). Un suelo fértil es aquel que presenta concentraciones de nutrientes en niveles adecuados para el desarrollo normal de las plantas (Salgado *et al.*, 2000).

Las principales propiedades físicas y químicas que el agricultor debe conocer para tener una mejor comprensión de la fertilidad del suelo y de la respuesta de los cultivos a la aplicación de fertilizantes son: la textura y los contenidos de arena, limo y arcilla, el humus, la estructura, los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg y S), micronutrientes (Cl, B, Zn, Fe, Mn, Cu, Mo y Ni), (Buckman y Brady, 1991; Marschner, 1995), reacción del suelo o pH.



Tabla 1. Indicadores de sostenibilidad del suelo y frecuencia de muestreo.

Indicador	Frecuencia de muestreo
Propiedades físicas:	
Humedad	Cada semana
Densidad y resistencia a la penetración	Cada estación
Conductividad hidráulica	Año
Estructura	1 a 2 años
Infiltración	1 a 2 años
Capacidad de retención de humedad	3 a 5 años
Textura	3 a 5 años
Propiedades químicas:	
pH	Cada estación
Nitrógeno total	1 a 2 años
Nutrientes disponibles	1 a 2 años
CIC	1 a 2 años
Indicadores biológicos:	
Lombrices	Cada estación
Carbón	1 a 2 años
Carbón orgánico en el suelo	1 a 2 años
Cultivo:	
Rendimiento	Cada estación
Crecimiento de raíces	Cada estación
Concentración nutrimental	1 a 2 años
Microclima:	
Temperatura del suelo	Diaria y en cada estación
Temperatura del aire	Diaria
Evaporación	Diaria
Precipitación	Cada estación
Intensidad de la lluvia	Máxima 5 a 10 min

Modificado de Lal, 1994.

DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL

Uno de los principales problemas que afrontan los agrónomos y productores de manera general es la merma en la producción, tanto en cantidad como en calidad, debido a alteraciones nutrimentales causadas por:

- La carencia de uno o más elementos dispensables para el crecimiento vegetal.
- La precipitación, inmovilización o fijación de los nutrientes.
- La existencia de desbalances entre los nutrimentos.
- Condiciones edáficas particulares, que conducen a que uno o varios elementos se presenten en cantidades excesivas que producen toxicidad y en consecuencia anomalías en el crecimiento y producción.

Las metodologías que se han utilizado para generar recomendaciones de fertilización han sido ligadas al desa-

rollo de los conocimientos del suelo, clima, estadísticos, de computo y la conceptualización de la relación suelo-planta (Etchevers *et al.*, 1991). Invirtiendo en este proceso más de 80 años de investigación agrícola en:

- La Extrapolación de recomendaciones.
- Recomendación media regional.
- Análisis químicos de suelos y de plantas.
- Recomendación específica por agrosistema.
- Funciones generalizadas de producción.
- Modelo conceptual.
- El sistema integrado para recomendar dosis de fertilización (SIRDF).

En la última década, la generación de metodologías para recomendar dosis de fertilización ha llamado la atención de especialistas en fertilidad de suelos y economistas, dada la necesidad de utilizar de forma más eficiente los fertilizantes, al incremento de su precio, al mejoramiento de la calidad de los alimentos, y por la necesidad de conservar el medio ambiente (Salgado *et al.*, 2001).

En Tabasco el Área de Gerencia Ambiental del Campus Tabasco ha realizado una serie de estudios encaminados al diagnóstico de la fertilidad de los suelos cañeros del área de abastecimiento Ingenio Tenosique (Palma-López

et al., 2003) e Ingenio Presidente Benito Juárez (Palma-López *et al.*, 1998) y más recientemente en el ingenio Santa Rosalía (Salgado *et al.*, 2003), diagnóstico del estado nutricional del cultivo de cacao (Triano, 1999), al diagnóstico de los recursos naturales para determinar los niveles de contaminación y alternativas para el desarrollo del área de influencia de los campos petroleros Cinco Presidentes y la Venta Norte Tabasco (Palma-López *et al.*, 1998). A continuación se presentan algunos resultados de estos estudios donde su metodología involucra las acciones más importantes de los siete métodos antes señalados.

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LOS NIVELES DE NUTRIMENTOS EN LOS SUELOS

La utilización del modelo conceptual para estimar dosis de fertilización resulta sencilla, ya que es capaz de describir el esquema nutricional de los cultivos en su totalidad con un mínimo de postulados (Rodríguez, 1990).

SISTEMA INTEGRADO PARA RECOMENDAR DOSIS DE FERTILIZACIÓN (SIRDF)

En México generalmente se han utilizado la dosis fijas de fertilización por muchos años, sin considerar la variedad de cultivo y los tipos de suelos. Por lo que es necesario plantear nuevas estrategias que permitan aplicar la cantidad de nutrientes que demanda el cultivo para mantener rendimientos adecuados y así evitar el empobrecimiento del suelo a mediano plazo. Con el objetivo de ajustar las dosis de fertilización de acuerdo a las diferentes tipos de suelo en los que se maneja un determinado cultivo se propone un sistema integrado para recomendar dosis de fertilización (SIRDF); el cual consta de siete etapas:

Etapas de caracterización de los tipos de suelos

Recolección de antecedentes. En estos tipos de estudios primeramente se realiza la revisión y recolección de información (superficie, necesidades y requerimientos de N, P y K, manejo agronómico del cultivo, datos meteorológicos, cartografía de INEGI y fotografía aérea).

Fotointerpretación. En la primera fase se realiza la cartografía de subunidades de suelo apoyados en la fotointerpretación de fotografías aéreas a escala de 1:20,000 a 1:75 000 (INEGI). Se fotointerpreta y se delimitan las unidades cartográficas con el apoyo de elementos como el tono, textura y forma, así como de factores como la geomorfología, la topografía, litología, vegetación e hidrología. Con el auxilio de cartas edafológicas de INEGI, se transfiere la nomenclatura a las unidades similares de fotointerpretación. Posteriormente la información de las fotografías aéreas es transferida al mapa topográfico a la escala final, quedando listo para la verificación de campo.

Definición y caracterización de las subunidades de suelo. Una vez realizada la fotointerpretación se procede a la identificación del tipo de suelo correspondiente a cada unidad cartográfica definida y a la caracterización de las subunidades de suelo con base en la siguiente metodología de campo:

Definición del tipo de suelo correspondiente a la unidad cartográfica. Las unidades cartográficas se definen a través de recorridos de campo apoyándose con barrenamientos a profundidades de 1.20 a 2.00 m de profundidad, en lugares cercanos a los linderos y al centro de las unidades cartográficas para homogeneizar las unidades.

Caracterización morfológica de las unidades de suelo. Partiendo del tipo de suelo se realiza la descripción del perfil (uno por unidad cartográfica) en base a la metodología de Cuanalo (1981). Se realiza la descripción de los sitios de estudio y la descripción morfológica del suelo en campo. Las características tomadas en cuenta son el color, la textura, la estructura, la consistencia del suelo, las características micropedológicas, la permeabilidad, las raíces y la transición entre horizontes, las cuales se determinan por capa de suelo.

Muestreo de suelo con fines de clasificación. Esta, consiste en la obtención de una muestra compuesta de suelo de cada horizonte detectadas en las subunidades descritas posteriormente se secan bajo sombra y se envían para su análisis físico y químico al laboratorio. Los análisis efectuados y los métodos sugeridos se mencionan en la Tabla 2.

Clasificación y caracterización física y química de las unidades de suelo. Con la descripción de perfiles de suelo y los análisis físicos y químicos se procede a la clasificación de los tipos de suelo (Soil Survey Staff, 1998) y del referencial de los suelos del mundo de (ISRIC-FAO, 1999). Mediante la interpretación de las características físicas y químicas y con base en la descripción del medio de cada unidad de suelo, se realiza la determinación de capacidad de uso y capacidad de fertilidad de los suelos con la metodología del IMTA (1988) y Sánchez *et al.*, (1982), respectivamente.

Diagnóstico de la fertilidad de las subunidades de suelo

Una vez ubicado geográficamente las unidades de suelos, se procede a seleccionar las parcelas para el muestreo dentro de cada una de ellas, tomando en consideración la pendiente y la localización.

Las muestras compuestas se pueden tomar a partir de sitios de muestreo, las cuales pueden ser realizadas a dos profundidades (0-30 y 30-60) con barrena o según el tipo de cultivo que se encuentre establecido, hasta formar una muestra compuesta; se recomienda muestrear en áreas no mayores de cuatro hectáreas en terrenos accidentados y en áreas de cinco hectáreas en terrenos uniformes y planos (Salgado *et al.*, 1999). Las muestras son secadas a la sombra, molidas y tamizadas para su análisis químico (Tabla 2). A partir de los datos de P-Olsen y K intercambiable se calcula el suministro.

Tabla 2. Métodos analíticos para estudios de suelo y de plantas.

Análisis	Métodos
Suelo:	
Textura:	Bouyoucos
pH:	Relación 1:2:5 suelo: agua destilada hervida. Walkley y Black
Materia orgánica:	Kjeldahl
Nitrógeno total:	Acetato de amonio 1N pH 7.0 (cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica)
Bases intercambiables (Ca, Mg, Na y K):	Acetato de amonio 1N pH 7.0
Capacidad de Intercambio Cationico (CIC):	Olsen
Fósforo asimilable:	
Plantas:	
Nitrógeno total:	Kjeldahl
Potasio, sodio, calcio, magnesio, fierro, manganeso, zinc y cobre total:	HNO ₃ -HCO ₄ . Cuantificación por Espectrofotometría de Absorción Atómica
Fósforo total:	HNO ₃ -HCO ₄ . Cuantificación calorimétrica

(Aguilar *et al.*, 1987).

Para obtener excelentes resultados en el análisis de suelos, se requieren de muestras representativas del área de estudio, para esto el área debe dividirse en tantas veces como diferentes tipos de tierra se encuentre, o por diferencia de altitudes (lomas, planadas, etc.). Una muestra de suelo es una porción o parte del suelo representativa de un terreno. Para cada área diferente se debe de tomar de 10 a 15 muestras de suelos las cuales se juntan para conformar una muestra compuesta que corresponde a una extensión no mayor de cinco hectáreas, tomadas en forma de zigzag para abarcar en lo posible lo largo y ancho del terreno.

Muestreo de biomasa aérea para el diagnóstico nutrimental

Para estimar la demanda de nutrimentos, se debe realizar un muestreo de la biomasa aérea en los sitios representativos donde se describan los perfiles de suelo. Las muestras se obtienen a partir de un muestreo lineal, en zigzag o estratificado al azar; son los mas eficientes en reducir la variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo. La parte de la biomasa foliar a muestrear varía dependiendo del tipo de cultivo, su edad y su hábito de crecimiento (Salgado *et al.*, 1999a). Las muestras vegetales se secan en la estufa, se muelen y se les determina la concentración de nutrimentos. A partir de la materia seca y las concentraciones nutrimentales se calcula el suministro. En el caso de tener árboles es mucho más complicado la extracción de la biomasa aérea por lo que, se recurre a los datos de literatura o bien extracciones densométricas de volumen para extraer la biomasa.

Para el caso de las muestras foliares se deben formar muestras compuestas, tomando de 15 a 30 submuestras de material vegetal dentro de un lote o área homogénea de la plantación (Cottenie, 1984; Jones *et al.*, 1991; Marschner, 1995).

Determinación de dosis de fertilización con el modelo conceptual

Con este modelo se determinan la dosis de fertilización cuyas bases se encuentran en el balance entre la demanda del nutrimento por el cultivo (DEM) y el suministro que hace este del suelo (SUM) por lo que, si la demanda es mayor que el suministro se producirá un déficit del nutrimento que es necesario suplir con fertilización. Cuando la demanda es menor que el suministro se aplicará una dosis de manutención para mantener la fertilidad del suelo y los rendimientos con base a criterios agronómicos y experiencia regional. En dichos términos, la dosis de fertilización (DF) está definida por la diferencia entre la demanda y el suministro, así como por la eficiencia de aprovechamiento del fertilizante por el cultivo (EF); ya que sólo una parte del nutrimento aplicado es aprovechado y al final se tiene un modelo para calcular la dosis de fertilización de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$DF = (DEM - SUM) / EF$$

Demanda (DEM). La demanda del cultivo es equivalente a la extracción del nutrimento, lo que corresponde a su concentración en las diferentes partes de la planta por la producción de cada una de ellas. En la práctica, esta demanda es expresada para un nivel de rendimiento esperado, en base a materia seca (M.S). Esta se obtiene de la siguiente manera:

$$DEM(\text{kg/ha}) = M.S. (\text{kg ha}^{-1}) (\% \text{ nutrimento planta} / 100)$$

Para estimar la demanda de nitrógeno, fósforo y potasio la materia seca incluye el total de la biomasa aérea (para caña hojas + tallos).

Suministro (SUM). El suministro del suelo depende de diversos factores que intervienen en la dinámica de los nutrientes; ya sean del suelo, del clima y manejo. El suministro corresponde a la cantidad de nutrimento que el cultivo puede extraer del suelo y su estimación se realiza mediante el análisis químico del suelo, calibrado con base a dicha extracción. En el suministro del suelo se deben considerar los aportes a través de los residuos del cultivo que quedan después de la cosecha por lo tanto, debe de estimarse la cantidad, contenido nutrimental y tasa de mineralización. Las fórmulas para el cálculo del suministro en el caso del nitrógeno es:

$$\text{SUM-N} = (\text{DEM-N} \cdot 0.04 + \text{NDS})$$

Para el cálculo del suministro de nitrógeno se considera que únicamente el 4% de la demanda de nitrógeno se incorpora al suelo y el resto se pierde en el campo en el caso de la caña.

NDS: Nitrógeno Derivado del suelo

$$\text{SUM-P} = (\text{P suelo (ppm)} \cdot \text{Ec}) + (\text{M.S.R.}) (\% \text{ P foliar}/100)$$

$$\text{SUM-K} = (\text{K suelo (ppm)} \cdot \text{CK}) + (\text{M.S.R.}) (\% \text{ K foliar}/100)$$

El índice de eficiencia del cultivo (Ec) indica que por una parte por millón (ppm) de P-Olsen el cultivo absorbe 1.7 kg de P del suelo (en el caso de la gramíneas).

La eficiencia de absorción de potasio (CK) indica las ppm de K intercambiable que el cultivo absorbe según el tipo de suelo (en el cultivo de la caña de azúcar se estima en 1.5 ppm para suelos arenosos, 1.4 ppm para francos y 1.3 ppm para los arcillosos).

Para calcular el suministro del fósforo y potasio, la M.S.R. incluye el 9% de la biomasa aérea más la M.S de hojas, por considerar que estos nutrientes se incorporan al suelo con la quema.

Eficiencia. Es la cantidad de nutrimento del fertilizante que es aprovechado por la planta y depende de factores como: tipo de cultivo, fuente de fertilizante, época y forma de aplicación. En el caso del N la eficiencia se estima de 50 a 60% (García, 1984), para el caso del fósforo es de 0.20-0.40, para suelos, Vertisol, Fluvisol, Luvisol, Cambisol y Leptosol) y para el caso del potasio la eficiencia se estima en 0.60, 0.50 y 0.40 ppm para suelos arenosos, francos y arcillosos, respectivamente; bajo cultivo de gramíneas (Rodríguez, 1990).

Caracterización climática

Con los datos de temperaturas máximas y mínimas (°C), precipitación (mm) y evaporación, de las estaciones meteorológicas cercanas al ingenio o región productora sobre el plano de suelos, se trazan los polígonos de Thiessen para determinar áreas que tengan precipitación homogénea.

Recomendaciones de fertilización

A partir de las dosis generadas en el punto 3.1.4 con base a los tipos de suelo se recomiendan las mejores fuentes de fertilizantes, épocas y formas de aplicación.

Seguimiento de resultados

Para asegurar que las dosis de fertilización generadas con el SIRDF produzcan los rendimientos esperados, es conveniente establecer parcelas de validación a nivel comercial y a partir de estas calcular las dosis de fertilización para el siguiente ciclo.

RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN EMPLEANDO EL SIRDF

Resultados del SIRDF

Una versión preeliminar del SIRDF se realizó en el Ingenio Azsuremex de Tenosique, Tabasco (Palma-López *et al.*, 1995).

Demanda. Referente a la demanda del cultivo de la caña de azúcar las unidades Fluvisol, Luvisol y Leptosol tuvieron los mayores rendimientos de biomasa aérea (Tabla 3), también se observó que las variedades Mex 57-453 cultivada en Fluvisol y la Mex 68-P-23 cultivada en el resto de los suelos demandaron cantidades variables de nutrientes que concuerda con los discutido por Cuellar *et al.* (1981) en sus estudios de extracción de nutrientes en caña de azúcar cosechada a los 13 meses de edad, donde encontró contenidos variados de acuerdo a la variedad y tipo de suelo con valores de N de 1.07 a 1.78 kg, P de 0.4 a 1.14 kg P_2O_5 y K de 2.1 a 4.95 kg de K_2O por tonelada de caña producida.

Por lo anterior, se demuestra la capacidad del suelo para restablecer sus propiedades químicas estableciendo que el monocultivo de caña no es tan perjudicial para el suelo. Sin embargo, las propiedades físicas sufren modificaciones que se pueden restablecer con el subsuelo profundo al reemplazar las plantaciones viejas (cada siete años).

Suministro. El suministro representa la cantidad de nutrientes que el suelo es capaz de proveer al cultivo durante su desarrollo, más la que se incorpora al suelo por la quema de los residuos (Tabla 4). El suministro de N fue bajo, ya que la mayor parte se pierde durante la quema y por la baja relación C/N de los suelos. El suministro de P fue suficiente en la mayoría de los suelos debido al reciclaje del P por la quema de los residuos, su poca movilidad y por las aplicaciones anuales por medio de la fertilización; por último el suministro de K en las unidades Fluvisol y Cambisol abastece la demanda del cultivo de la caña dada su incorporación durante la quema e historial de la fertilización química.



Tabla 3. Estimación de la demanda para el cultivo de la caña de azúcar en el Ingenio Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	Demanda (kg/ha)		
	N	P ₂ O ₃	K ₂ O
Fluvisol	135	90	192
Vertisol	97	100	321
Cambisol	97	65	249
Luvisol	171	116	444
Leptosol	128	120	274

Tabla 4. Estimación del suministro para el cultivo de la caña de azúcar en el Ingenio Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	Suministro (kg/ha)		
	N	P ₂ O ₃	K ₂ O
Fluvisol	55	87	420
Vertisol	54	88	303
Cambisol	54	61	283
Luvisol	57	91	355
Leptosol	56	102	262

Dosis de fertilización. Se estableció que según el balance nutricional del modelo conceptual (Rodríguez, 1990), se presentan déficits en todos los casos para N y P y en dos casos para el K, lo que refleja la variabilidad de los contenidos nutrimentales de los suelos así como el historial de manejo de cada sitio. En el caso de los Luvisol los déficits de N y K resultaron sobreestimados, debido al exceso de humedad en el suelo; para el caso de los suelos Fluvisol y Cambisol no se recomienda la aplicación de potasio.

Se observó que existe una relación estrecha con la potencialidad de los suelos (Tabla 4). En los casos donde el método no recomienda la aplicación, se optó por la aplicación de dosis de manutención para mantener al suelo en fertilidad adecuada, para evitar que a largo plazo existan desbalances nutrimentales difíciles de corregir que repercutan en el rendimiento del cultivo.

Recomendaciones de fertilización. Para determinar la cantidad de fertilizante que debe de aplicar el productor (Tabla 5), es indispensable conocer el tipo de fertilizante suministrado por el Ingenio Tenosique para realizar los cálculos correspondientes. (Suponiendo que se suministrara el complejo 20-10-10, Triple 17, Super nitrato y Urea, se aplicarían en las siguientes cantidades (kg ha⁻¹)). Se recomienda que la fertilización debe aplicarse en forma mecanizada después del primer cultivo para plantillas y socas. La eficiencia de aprovechamiento del fertilizante es 18% mayor en comparación a la aplicación manual, ya que el fertilizante se deposita a 15 cm de profundidad que favorece el enraizamiento profundo.

Seguimiento. Las dosis de N, P y K recomendadas para tipo de suelo se aplican a rendimientos esperados que varían en función a la potencialidad del suelo. De acuerdo a la gran variabilidad de los contenidos de P y K dentro de las subunidades de suelo, se recomienda la do-

Tabla 5. Recomendaciones de fertilización en base al rendimiento de caña por unidad de suelo en el Ingenio Tenosique, Tabasco.

Unidad de suelo	Rendimiento (kg/ha)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Fluvisol	120	160	60	60
Vertisol	100	120	80	80
Cambisol	80	120	60	60
Luvisol	90	140	80	80
Leptosol	120	160	80	80

Tabla 6. Cantidad y tipo de fertilizante que debe de aplicar el productor al cultivo de caña en las diferentes unidades de suelos.

Unidad	Fórmula	20-10-10	S. Ni-trato	Triple 17	S. Urea	S. Ni-trato
Fluvisol	160-60-60	600	123	353	-	308
Vertisol	120-80-60	-	-	471	92	-
Luvisol	120-60-60	600	-	353	138	-
Cambisol	140-80-80	-	-	471	138	-
Leptosol	160-80-80	800	-	471	-	247

sis de fertilización por un período máximo de cuatro años, luego realizar un muestreo de suelo a profundidades de 0-30 cm y 30-60 cm para detectar si el suelo esta sufriendo un proceso de enriquecimiento o empobrecimiento en los contenidos de P y K debido a la continua aplicación de fertilizantes.

DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL EN PLANTACIONES DE CACAO (*THEOBROMA CACAO* L.)

Disponibilidad de macro y microelementos en suelos

Para determinar la disponibilidad nutrimental de los suelos se realizó un levantamiento nutrimental basado en la áreas previamente delimitadas como homogéneas.

Levantamiento nutrimental en suelos

La metodología empleada en el Levantamiento de suelos (Ortiz y Cuanalo, 1981) se realizó con los siguientes pasos:

Acopio y revisión de la información previa como son publicaciones, mapas, fotografías aéreas, recorridos por la zona de estudio para definir las características del estudio (nivel de detalle, material cartográfico, escalas de trabajo y de publicación y unidades taxonómicas y cartográficas a utilizar).

Se seleccionaron 27 sitios distribuidos en toda el área de estudio, seguidamente se realizaron muestreos de suelo empleando el método de zigzag, muestreando los primeros 30 cm con 15 submuestras por muestra compuesta, para conocer los contenidos de macro y micronutrientes; así mismo se realizaron barrenaciones de suelos para conocer las series de suelo presentes en el área de estudio. Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente, en charolas de plástico, molidas y pasadas por un tamiz de 2 mm y una fracción pequeña de suelo se tamizó con malla No. 30 para determinar la materia orgánica.

Levantamiento nutrimental en las plantaciones

En lo referente al levantamiento nutrimental se realizaron 27 muestreos de plantas que consistió en coleccionar hojas de cacao y considerar como muestras representativas de las condiciones generales de la plantación de cacao, observándose que estas presentaban el mismo desarrollo y coloración; además de no estar dañada por causa del manejo, insectos o enfermedades; evitando las que presentaban manchas o bordes quemados y que no fueran hojas recientes o nuevas (peniente).

Se escogieron 10 árboles distribuidos en el área de muestreo y se colectó la segunda y tercera hoja (contando del ápice hacia el tronco) de las ramas que se encontraron en lados y en la parte baja de la copa del árbol de cacao; por cada árbol muestreado se tomaron cinco hojas en ramas diferentes alrededor de la copa del árbol. Las hojas fueron colocadas dentro de una bolsa de papel en la cual se le anotó el número de muestra, lugar y fecha; al término del muestreo las hojas fueron trasladadas al Laboratorio de Suelos, Plantas y Agua (LASPA) del Campus Tabasco y colocadas en la estufa a 70°C hasta peso constante.

Para conocer el estado nutrimental del el suelo se determinaron: la textura, pH, materia orgánica, calcio, magnesio, potasio, capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo, cobre, hierro, manganeso y zinc. En el caso de las plantas nitrógeno total y los elementos antes mencionados.

Diagnóstico de la fertilidad de las unidades de suelos

De los sitios muestreados con fines de fertilidad, el 52% pertenece a la serie Gamas, 18% Libertad, 15% a la serie

Fuentes y el 7.5% a las Comalcalco y Aluviones, respectivamente; todas pertenecen a la unidad Fluvisol.

Los suelos de la serie Libertad presentaron altos contenidos de arcilla (32%) y los más bajos (20%) la serie Comalcalco, existiendo una diferencia del 12%, suficiente para encontrar una distinta expresión en los rendimientos. De manera general, los porcentajes de arcilla son adecuados para el óptimo crecimiento y desarrollo de las plantaciones (Tabla 7).

Los contenidos de arcilla y CIC indican la buena relación entre la arcilla y la CIC de los suelos, es decir, a mayor contenido de arcilla, mayor CIC en los suelos. La CIC es una propiedad que depende de la cantidad y tipo de arcilla que contienen los suelos; así como de los contenidos de materia orgánica (MO) y sesquióxidos que forman el complejo coloidal (Ordóñez *et al.*, 1983).

Los suelos de las series Fuentes, Gamas y Libertad presentaron un pH moderadamente ácido (6.3) y la Comalcalco y Aluvión neutro (6.7); esto posiblemente debido a los menores porcentajes de MO en estas dos últimas series, que generaron menor cantidad de ácidos carbónicos en la solución del suelo por lo cual, se tiene un mayor pH. En general, todas la series son apropiadas para tener una mineralización eficiente de MO y por consiguiente, óptimo para el desarrollo de la mayoría de las plantaciones.

El 7.4% de los sitios presentaron valores bajos de MO, el 40.7% valores altos y el 51.9% medios, a pesar del gran aporte de materia orgánica que tiene el cacao por las hojas del árbol de sombra y de la plantación (Alonso, 1987), esta no se refleja en los análisis.

Todas las series de suelo presentaron contenidos altos de Ca, con un valor medio de 20.7 cmol(+) kg⁻¹ suelo, los valores se encuentran muy por encima de lo considerado como alto debido a la génesis misma del suelo, ya que fueron formados por materiales sedimentarios arrastrados de la parte alta de la Sierra Norte de Chiapas, ricos en Ca y depositados continuamente por los ríos (Palma y Cisneros, 1997).

Las concentraciones de Mg fueron altas en todas las series, manifestando el aporte de la biomasa aérea una buena cantidad de magnesio a través de la descomposición de la hojarasca (Alonso, 1987). El 70% de los suelos FLe presentan cantidades bajas de K (0.2-0.3 cmol(+) kg⁻¹ suelo), 20% concentraciones medias (0.3-0.6 cmol(+) kg⁻¹ suelo) y sólo el 10% mostró concentraciones altas (0.6-1.3 cmol (+) kg⁻¹ suelo). En los suelos FLeg el 43% manifestó concentraciones altas de K y el 57% concentraciones me-

Tabla 7. Contenidos medios de arcilla y de parámetros químicos de las series de suelos estudiados .

Serie de suelo	arcilla	M.O	pH	Ca	Mg	K	CICe	P	Zn	Cu	Fe	Mn
	%			cmol(+) kg ⁻¹ suelo				Mg kg ⁻¹ suelo				
Fuentes	29	2.9	6.3	20.7	10.4	0.25	24	28	6	9	137	70
Gamas	27	3.0	6.3	21.0	12.0	0.28	28	25	4	8	123	58
Libertad	32	3.2	6.3	21.1	19.8	0.25	30	25	8	8	156	66
Comalcalco	20	2.8	6.7	20.3	9.4	0.29	26	45	6	7	143	44
Aluvión	26	2.8	6.7	20.4	8.8	0.26	29	27	4	6	105	57

días; a pesar de que de manera natural estos suelos presentan altas concentraciones de K. Sin embargo, la nula fertilización de este elemento y su extracción por las plantaciones de cacao durante años a agudizado el problema, así como su pérdida por lixiviación (alta solubilidad común en suelos arenosos) que es favorecido por las intensas y frecuentes precipitaciones.

Los altos contenidos de P obtenidos en los suelos indican que esto se debe al historial de fertilización de este elemento y a la alta dosis de fertilización de P utilizada por los productores y lo es más aún si consideramos los aportes de MO. Por último, los contenidos de micronutrientes (Zn, Fe, Cu y Mn) en todas las series de suelos se encontraron en concentraciones consideradas como adecuadas por lo que, no existe problema para el buen desarrollo de las plantaciones de cacao.

Diagnóstico nutrimental del cacao

Los contenidos de P en las muestras foliares de los sitios de muestreo se manifestaron en concentraciones consideradas como normales, lo cuál concuerda con lo obtenido en los análisis de suelos, lo que indica que existe una acumulación de P como consecuencia del historial de fertilización. Esto es válido si continuamente se ha realizado fertilización con P. Por tanto, los datos nos indican que el suelo es rico en P y que la planta está tomando este elemento. Por su parte las concentraciones de K indican que el 80% de los cacaotales que se encuentran sobre los suelos Fluvisoles éutricos presentan un buen abastecimiento de K; un 10% presenta concentraciones moderada y severamente deficiente. Y las plantaciones sobre FLe todas manifestaron concentraciones normales, estos valores contrastan con lo obtenido por los suelos en los que el 65% presentaron concentraciones bajas; a pesar de esta baja concentración en los suelos FLe la planta absorbe a este elemento en cantidades suficientes para su desarrollo por lo que, deben de realizarse estudios que permitan dilucidar lo que sucede con el K (Tabla 8).

Caso similar sucede con el Ca ya que el 75% de las plantaciones en suelo FLe presenta valores severamente deficiente, al parecer existe algún factor que está incidiendo en la baja absorción de Ca por la plantación, a pesar del aumento de su concentración con la edad de la hoja. Por otra parte se encontró que el Mg no es problema para la

nutrición de los cacaotales, ya que todas las series de suelos presentaron concentraciones normales.

Referente a los micronutrientes solamente el Zinc fue moderadamente deficiente en un 92.6% de las plantaciones, cuyos resultados contrastan con lo obtenido en los suelos que presentaron un buen suministro, por lo tanto, se recomienda llevar a cabo estudios encaminados a resolver dicho problema. Las concentraciones de Cu indican que el 77.7% de las plantaciones presentan contenidos normales, 14.8 y 7.4 moderada y severamente deficiente. En lo que se refiere a la concentraciones de Fe en las plantaciones de cacao el 88.9% de los análisis manifestó concentraciones con severa deficiencia y el 11.1% concentraciones normales, siendo bastante extraño, a pesar de las altas concentraciones manifestada por los suelos por lo que, se establece que posiblemente el elevado pH este disminuyendo la disponibilidad del Fe. Dicha deficiencia se puede deber a la utilización de este elemento para la utilización del mecanismo de la clorofila, ya que se encuentra asociado a la síntesis de proteína cloroplástica e interviene en la respiración a través de enzimas que la regulan como: citocromos b y c y la catalasa por lo que, la cantidad de hierro en la relación con las cantidades de otros elementos, es tan importante o más que la cantidad de este elemento en la planta (Arzola *et al.*, 1981).

Por lo tanto, el diagnóstico nutrimental en plantas muestra un gran desbalance nutrimental; uno de los factores que está influyendo en la deficiencia de Fe es la nula disponibilidad del elemento en el suelo, que es ocasionado por el pH moderadamente ácido encontrado en los suelos del área de estudio.

En conclusión los nutrientes que presentaron altas concentraciones en el suelo y que mostraron un comportamiento similar en las plantaciones en estudio fueron P y Mg. En el caso del Ca y K, para el primero existe un alto suministro de los suelos (100%) y los niveles en las plantas son 75% deficientes. Para el K en su mayoría fue bajo (70%) y en las plantaciones un 80% son considerados como altos. Por lo tanto, no se cuenta con suficiente evidencia para inferir el porque de estas respuestas. Por su parte los micronutrientes en los suelos mostraron suministros adecuados. Sin embargo la mayoría reflejó altos problemas nutrimentales; al respecto en el estado de Tabasco se realizan muy pocos esfuerzos dirigidos al estudio de los micronutrientes, de aquí se infiere la necesidad de establecer una mayor cantidad de trabajos que este encaminados a resolver estos problemas.

Tabla 8. Concentración promedio de macro y microelementos en plantas de cacao, ubicadas por serie de suelo en la zona de estudio.

Serie	N	Ca	Mg	K	P	Zn	Cu	Fe	Mn
	%					Mg kg ⁻¹ de materia seca			
Fuentes	1.95	0.84	1.05	2.07	0.27	28	18	41	88
Gamas	1.99	0.26	0.95	2.31	0.26	35	15	35	99
Libertad	1.95	0.39	1.37	2.17	0.25	37	22	31	88
Comalcalco	2.09	0.67	0.86	2.46	0.29	33	9	48	61

REFERENCIAS

- Aguilar, S. A., B.J.D. Etchevers y J. Z. Castellanos, R. 1987.** Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. SMCS. Publicación Especial. No. 1. Chapingo, México. 217 p.
- Alonso, V. R. 1987.** Contribución de la hojarasca al ciclo de nutrientes. Dinámica nutricional de las hojas y distribución radical del árbol de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la región de la Chontalpa, Tabasco. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 126 p.
- Arnon, D. I. and P. R. Stout, 1939.** The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol.* 14: 371-375.
- Arzola, P. N., O. Fundora H y J. Machado de A., 1981.** Suelo, Planta y Abonado. Editorial Pueblo y Educación. La Habana, Cuba. 461 p.
- Bidwell, R. G. S., 1990.** Fisiología vegetal. A.G.T. Editor. pp. 245-292.
- Buckman, H.O y N. C. Brady, 1991.** naturaleza y propiedades de los suelos. UTEHA. Grupo Noriega Editores. México. D. F. 590 p.
- Cottenie, A., 1984.** Los análisis de suelos y de plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. Boletín de suelos 38. FAO. Roma. Italia. 115 p.
- Cuanalo de la C., H., 1981.** Manual de descripción de perfiles de suelo en el campo. 2ª. Edición. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 40 p.
- Cuellar, I., H. Pérez, N. Companioni y E. García, 1981.** Extracción de NPK por cuatro variedades de caña en los principales suelos cañeros. Resúmenes 43. Conf. ATAC. P 47.
- Etchevers, B. D.J., V. Volke H., 1991.** Generación de tecnologías mejoradas para pequeños productores. Serie cuadernos de Edafología 17. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 45 p.
- FAO, ISRIC y SICS, 1999.** Base de referencia mundial del recurso suelo. 83 p + anexos
- Fassbender, W. H., 1984.** Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José, Costa Rica. 398 p.
- García, E. A., 1984.** Manual de campo en Caña de azúcar. Serie Divulgación Técnica. IMPA. Libro No. 24. México, D.F. 469 p.
- Gebhart, D. L., H. B. Johnson, H. S. Mayeux and H. W. Polley, 1994.** The CRP increases soil organic carbon. *Journal of Soil and Water Conservation* 49(5): 488-492.
- Guerrero, G. A., 1990.** El suelo, los abonos y la fertilización de los cultivos. Ediciones Mundi-Prensa. España. 206 p.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 1989.** Manual de clasificación cartográfica e interpretación de suelos con base en el sistema de taxonomía de suelos. Cuernavaca, Morelos, México.
- Jones, B. J., B. Wolf and H. Mills, 1991.** Plant Analysis Handbook: a practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. Micro-Macro publishing. Inc. USA.
- Lal, R., 1994.** Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. SMSS tech. Bull. 21. USDA. Soil conservation service. Washington, D.C. 78 p.
- Liang, B.C. and A. F. Mackenzie, 1992.** Changes in soil organic carbon and nitrogen after six years of corn production. *Soil Science* 153(4): 307-313.
- López, N. U., 1990.** El estudio del potasio como nutriente en los suelos del estado de Tabasco. Tesis profesional. Instituto Tecnológico de Villahermosa, Tabasco. 114 p.
- Marschner, H., 1995.** Mineral nutrition of higher plants. Second edition. Academic Press. San Diego, C.A. USA. 889 p.
- NPFI, 1988.** Manual de fertilizantes. Ed. LIMUSA. México, D.F. 292 p.
- Obrador, O. J. J., 1991.** Dinámica del fósforo en unidades de suelos del estado de Tabasco. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Veracruzana. Orizaba, Ver. 67 p.
- Ordóñez, M. J., P. Calderón y M. A. Valera, 1983.** Determinación de la superficie específica y su relación con algunas propiedades físico-químicas de suelo de Amozoc. Puebla. En: Terra. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. No. 2.
- Ortiz, V. B. y S.C.A. Ortiz, 1980.** Edafología. Suelos. UACH. Chapin-go. México. 331 p.
- Palma, L. D. J., J.J. Obrador O., J. Zavala C., E. García L., C. F. Ortiz G., W. Camacho Ch., R. Meseguer E., A. Sol S., J. F. Juárez L., J. Jasso M., A. Guerrero P., R. Ramos R., y A. Triano Sánchez, 1999.** Diagnóstico de los recursos naturales, niveles de contaminación y alternativas para el desarrollo del área de influencia de los campos petroleros Cinco Presidentes y la Venta Norte. Informe Técnico. Colegio de Postgraduados. Campus Tabasco. CIMADES. H. Cárdenas, Tabasco. 400 p.
- Palma, L. D.J. y D.J. Cisneros, 1997.** Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. I. Fundación Produce Tabasco A.C-Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Villahermosa, Tabasco. 116 p.
- Palma, L. D.J., G.S. Salgado, N.A. Trujillo, J.J. Obrador O., E.L.D.C. Lagunes, C.J. Zavala, B.A. Ruiz y M.M.A. Carrera, 1995.** Diagnóstico de la fertilidad de los suelos cañeros del área de abastecimiento del Ingenio Tenosique, Tabasco. Campus Tabasco-PYCSA. H. Cárdenas, Tabasco. 40 p.
- Palma L., D.J., J.J. Obrador O., A. Valdéz B., J. Zavala C., J.F. Juárez L. y A. Puebla E., 1998.** Dosis de fertilización en caña de azúcar para el sur del área de abastecimiento del ingenio Pdte. Benito Juárez. GITCAYA-Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco. 60 p. (Informe Técnico).
- Palma-López, J. D., G.S. Salgado, N.A. Trujillo, J.J. Obrador O., E.L.D.C. Lagunes, C.J. Zavala, B.A. Ruiz y M.M.A. Carrera, 2002.** Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF). TERRA. 19 (3):347-358.
- Potter, K. N., O. R. Jones, H. A. Torbert and P. W. Unger, 1997.** Crop rotation and tillage effects on organic carbon sequestration in the semiarid southern great plains. *Soil Science* 162(2): 140-147
- Ribón, C.M.A., S. Salgado G., D. J. Palma-López y L. C. Lagunes-Espinoza, 2003.** Propiedades físicas y químicas de un Vertisol cultivado con caña de azúcar. *INTERCIENCIA*. Vol. 28. No. 3. pp. 154-159.
- Rodríguez, S. J., 1990.** Fundamentos de Fertilidad de Cultivos. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.
- Rodríguez, Q.A., 1993.** Efecto del encalado sobre las propiedades químicas de un suelo ácido de la Sabana de Huimanguillo, Tabasco. pp. 64-66. In. Memorias de Avances de Investigación CEICADES. 92/93. CEICADES-CP. H. Cárdenas, Tab.
- Roming, D., M. J. Garlynd, R. F. Harris and K. McSweeney, 1995.** How farmers assess soil health and quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 50(3): 229-236
- Salgado, G. S., 1991.** Manejo de la fertilización nitrogenada en arroz de temporal en la Chontalpa, Tabasco. tesis de Maestría, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 163 p.
- Salgado, G. S., L.D.J. Palma y D.J. Cisneros, 1999.** Procedimientos para muestreo de suelos, plantas y aguas; e interpretación de análisis en cultivos tropicales. Campus Tabasco-IREGEP, CP-ISPROTAB. Villahermosa, Tabasco. 76 p.
- Salgado, G. S., L.D.J. Palma, E.R. Núñez, L.C. Lagunes E. y V.H. Debernardi, 2000.** Manejo de fertilizantes y abonos orgánicos. Campus Tabasco, CP-ISPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México. 135 p.
- Salgado G., S., L. Bucio A., D. Riestra D. y L. C. Lagunes-Espinoza. 2001.** Caña de azúcar: Hacia una un manejo sustentable. Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados-Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. 394 p.



Salgado, G. S., E.R. Núñez, P.J.J. Cabriaes, B.J.D. Etchevers, L.D. Palma y H.M.R. Soto, 2001^a. Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometido a diferentes manejos de fertilización. *Terra*. 19(2): 155-162.

Salgado, G. S., L.D.J. Palma, C.F. Ortíz G., L.C. Lagunes E. y J.M. Rivera C., 2003. Sistema Integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar. Ingenio Santa Rosalía. Colegio de Postgraduados-Campus Tabasco, SIGOLFO, Fundación Produce Tabasco A. C. H. Cárdenas, Tabasco. Informe Técnico. Fundación Produce Tabasco A. C. H. Cárdenas, Tabasco. Informe Técnico

Sánchez, P.A., W. Couto y W. Boul, 1982. El sistema de clasificar los suelos de acuerdo con su fertilidad: Interpretación y modificaciones. *Revista Geoderma* 27:283-309.

Sánchez, A. P., 1981. Suelos del trópico, características y manejo. IICA. San José, Costa Rica. 660 p.

Soil Survey Staff, 1998. Keys to Soil Taxonomy. 6 th. Edition. USDA-SCS. Washington, D.C. USA. 306 p.

Tisdale, S. L. y W.L. Nelson, 1985. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Edit. LIMUSA. México, D.F.

Triano S. A., 1999. Estudio Nutricional de las plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la margen derecha del río seco, Comalcalco, Tabasco. Tesis Profesional. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Biológicas. Villahermosa, Tabasco. 65 p + anexos.

Warkentin, B. P., 1995. The changing concept of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 50 (3) : 226-228

LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Manuel Soria

Instituto Tecnológico Agropecuario No. 2

RESUMEN

La nutrición de los cultivos en la Península de Yucatán ha tenido la misma evolución que en el resto del país, es decir hasta la década de los 90's, se basó en los tratamientos de fertilización que se generaron de metodologías que fueron válidas para su época, pero que posteriormente se vio que tenían limitaciones. Todas estas metodologías se basaban en evaluaciones de respuesta de los cultivos a diferentes dosificaciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) posteriormente se caracterizaban por utilizar diseños de tratamientos factoriales.

Algunas de las principales limitaciones que tuvieron y que influían en una adecuada nutrición de la planta eran: no considerar la demanda del nutrimento por el cultivo, ni el suministro de nutrientes por el sustrato y/o suelo, ni la eficiencia de los fertilizantes y algo muy importante, la pérdida de nutrientes por lixiviación, ya que ésta puede propiciar contaminación de suelos y acuíferos, sobre todo en suelos delgados y permeables como los leptosoles de la Península de Yucatán.

Otra limitante de estas metodologías era que al evaluarse simultáneamente muchos factores se presentaban múltiples interacciones que en ocasiones sus efectos enmascaraban los efectos del factor más importantes como era la respuesta a algún nutriente determinado.

Otro aspecto importante es que todos los experimentos de nutrición se establecían en siembras a cielo abierto y el fertilizante se disponía en una o máximo dos aplicaciones, lo cual propiciaba reducida respuesta del cultivo, ya que la planta sólo tomaba los nutrientes que requería y el resto se fijaba en el suelo, como el fósforo y el potasio, no así el nitrógeno que se perdía por lixiviación dado lo delgado y permeable de los suelos y por efecto de la lluvia o el riego.

En 1994 se generó la metodología denominada "Balance nutrimental", ésta; parte de la base de que la necesidad de fertilización de un cultivo está dada por la demanda del nutrimento por la planta, la cantidad del nutriente que suministra el suelo y la eficiencia del fertilizante aplicado. Esta metodología fue aplicada en todo el país pero tuvo el problema de que existían pocos laboratorios confiables para hacer los análisis de suelo y planta, básicos en este enfoque.

También en 1994, se incrementa el uso del riego por goteo y con ello la aplicación de los nutrientes en el agua (fertiriego), de esta forma era posible dosificar los nutrientes de acuerdo al desarrollo de la planta, con ello se optimizaban los nutrientes y se reducían las pérdidas por lixiviación. Al respecto destacan los proyectos comerciales de la empresa Yucatán Import y Export en Uxmal, Yucatán y de la empresa Primavera Peninsular con tecnología Israelí, estos dos proyectos introdujeron innovaciones importantes en la forma de nutrir a los cultivos, que influyeron en el desarrollo de la agricultura en la Península.

La nutrición mediante el fertiriego sin duda es más efectiva que la fertilización tradicional que se hace alrededor de la planta en una sola aplicación. Sin embargo, hay mucho por hacer para determinar las dosis adecuadas por etapa fenológica para los diferentes cultivos, considerando el suministro de nutrientes del suelo y el agua y la eficiencia de los fertilizantes, para no aplicar más nutrientes de los que requiere la planta, ya que todo exceso influye en un aumento de costo de cultivo y en contaminación del suelo y acuíferos, principalmente los nitratos los cuales deben ser monitoreados para valorar la cantidad que se lixivia en todo cultivo debido a los riesgos que estos representan para la salud humana.

ABSTRACT

Crops nutrition in the Peninsula de Yucatán has evolved in the same way in the rest of the country. In other words, in the 90s, they were base in fertilization treatments from methodologies valid in that time but those presented limitations. All these methodologies were base on evaluation responses from crops to different dosages to nitrogen, phosphorus and potassium and they were used factorial design treatments. Some of the limitation that they had and affected the plant nutrition were: They did not consider the nutrient demand by the crop and also the substrate as a source of nutrients, not even the fertilizer efficiency and something more important the lost of nutrient by lixiviation that causes soil and aquifers contamination mainly in thin and permeable soils like the leptosols from Yucatan.

Another limitation from this methodologies was that when they evaluate many factors at the same time there were multiple interaction that it hidden the most important factor effect. Other important factor is that the nutrition experiment were done out door and the fertilizer was available in two dosages this produced a reduced crop response maybe because the plant took only the nutriment that it was requiring and the rest was absorbed by the soil like the phosphorus and potassium and the nitrogen was lixiviated because the thin and permeable of the soils due to rainfall and irrigation. In 1994 it was developed the methodology called "nutrimental balance" this is based on the fertilization need of the crop and this is given by the nutriment demand of the plant, the nutrient quantity added by the soil and the applied fertilizer efficiency. This methodology was applied in whole country, but were there few trusty lab to do the soil and plant analysis with this approach. Also in 1994, it was increased the use of drop irrigation with the application of fertilizers, using this method is possible to do dosages according to the development plant needs and to optimize the nutrient and reduce the lost by lixiviation. Regarding to this there are some project by the companies Yucatan Import and Export, and Primavera Peninsular with Israel Technology. This two projects introduced important innovations y crop fertilizations that had influenced the agricultural development. Fertilization by irrigation is without doubt more effective than traditional fertilization. However, there are many aspects to research like the adequate dosage for the different phenologic stages in different crops. This is to avoid costs increases and contamination of the soil and aquifers mainly by nitrates because it represents a risk for the human health.

INTRODUCCIÓN

La nutrición de los cultivos es una de las prácticas más importantes en el proceso de producción de estos, ya que está influye directamente en su crecimiento y desarrollo y principalmente en el rendimiento.

El requerimiento de nutrientes varía durante el desarrollo de la planta. Para calcular con exactitud la cantidad de nutrientes en cada etapa de crecimiento, se requiere de investigaciones muy precisas en donde debe tenerse un control, de los demás factores que intervienen en el proceso de producción tales como luz, temperatura, características del sustrato, humedad, control de plagas y enfermedades y manejo del cultivo entre otros.

En México, hasta la década de los 90's las metodologías existentes para determinar las necesidades nutrimentales de los cultivos eran muy variadas pero todas se basaban en la evaluación de la respuesta de los cultivos a diferentes dosificaciones de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); a partir de está, se generaba un tratamiento de fertilización. Para ello se propusieron diversas metodologías que utilizaban diseños de tratamientos factoriales en los que se evaluaba simultáneamente diversos factores.

Estas metodologías fueron importantes en su época porque a partir de ellas se obtuvieron las recomendaciones de fertilización de los principales cultivos en el país, principalmente granos básicos, pero actualmente se considera que tienen limitaciones porque no consideran aspectos muy importantes que influyen en la nutrición de cultivos, tales como: demanda de nutrimento por el cultivo, suministro del nutrimento por el sustrato y/o suelo, eficiencia del fertilizante y los más importante, la pérdida de nutrientes por lixiviación aspecto muy importante porque puede propiciar contaminación de suelos y acuíferos sobre todo en los suelos muy delgados y permeables, como los leptosuelos de la península de Yucatán. Algunas de estas metodologías fueron: los Plan Puebla I y II (Turrent y Laird, 1975), matriz mixta para la optimización de cinco a ocho factores controlables de la producción (Turrent, 1979), diseño San Cristóbal (Rojas, 1978), el enfoque de agrosistemas (1979) y enfoque de análisis de suelo (Volke y Etchevers, 1994).

ESTADO DEL CAMPO DEL ARTE

EL MÉTODO GRÁFICO: ESTADÍSTICO PARA LA INTERPRETACIÓN DE EXPERIMENTOS CONDUCTOS CON LA MATRIZ PLAN PUEBLA I

El diseño Plan Puebla fue propuesto por Turrent en 1979, para generar recomendaciones de fertilización para el cultivo de maíz. El Plan Puebla I es un diseño de tratamientos que contempla tres factores: nitrógeno, fósforo y densidad de población (Tabla 1), esta matriz contempla 14 tratamientos formados por la interacción de los tres factores. La respuesta del cultivo a las diferentes dosis de N, P y las densidades de población se grafica para observar las tendencias (Fig. 1) y puedan determinarse las dosis óptimas económicas, mediante análisis económicos de cada uno de los tratamientos formados por la dosis de N, P y la densidad de población.

MATRIZ MIXTA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE CINCO A OCHO FACTORES EN LA PRODUCCIÓN

Esta matriz fue generada por Turrent en 1979, como una necesidad del estudio multifactorial integrado de los factores controlables de la producción cuando el objetivo del investigador es el de la optimización tecnológica, principalmente en la agricultura de temporal para subsistencia.

Tabla 1. Ejemplo de tratamientos para un experimento de maíz utilizando el Plan Puebla I.

Fertilizante			Densidad de población
Nitrogenado	Fosfórico		
Subexperimento 1			
1	60	20	40.000
2	60	20	50.000
3	60	40	40.000
4	60	40	50.000
5	90	20	40.000
6	90	20	50.000
7	90	40	40.000
8	90	40	50.000
9	30	20	40.000
10	120	40	50.000
11	60	0	40.000
12	90	60	50.000
13	60	20	30.000
14	90	40	60.000

Esta matriz considera hipotéticamente a los ocho factores de mayor prioridad para su estudio en las principales regiones maiceras del país (Tabla 2).

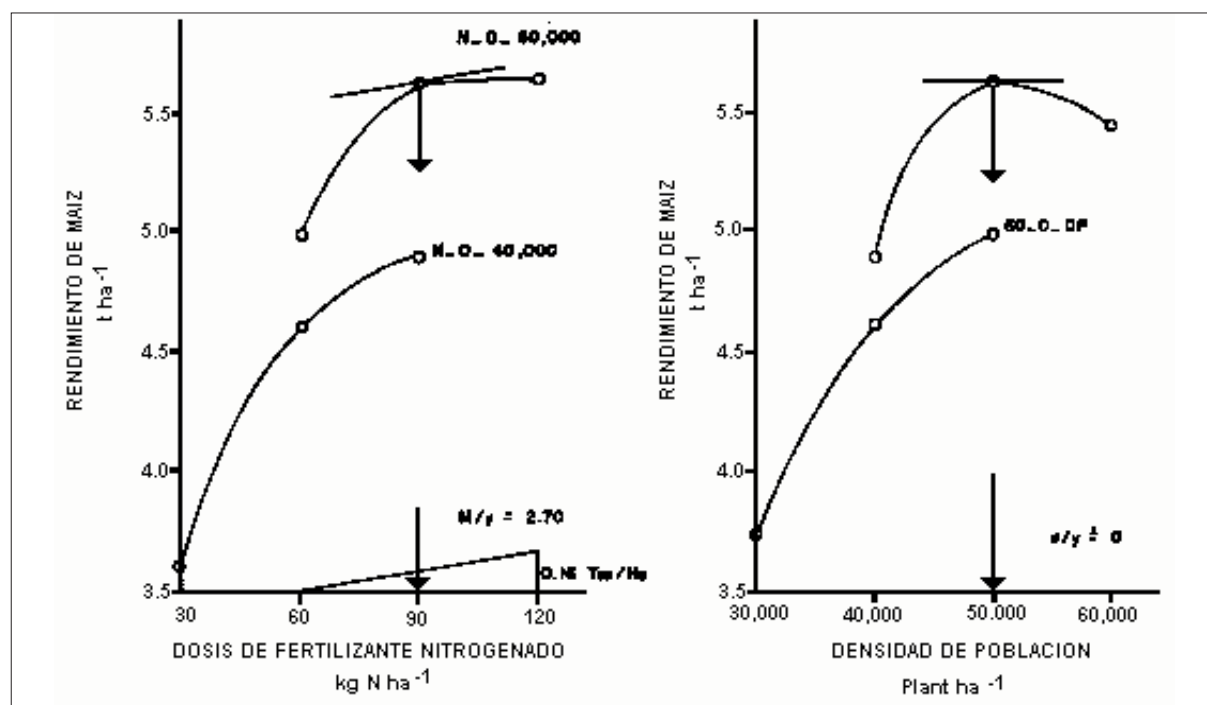


Figura 1. Ejemplo de gráficas de respuestas para maíz utilizando el Plan Puebla.

Tabla 2. Lista de ocho factores controlables de la producción de maíz en el altiplano.

Factor	Dosis	Unidades
1 Fertilizante nitrogenado	90	kg de N ha ⁻¹
2 Fertilizante fosfórico	40	kg de P205 ha ⁻¹
3 Densidad de población	50.000	plantas ha ⁻¹
4 Estiércol	0	
5 Variedad	H-31	
6 Oportunidad de fertilización	S2*	
7 Combate de malezas	Mecánico	
8 "Despunte" del cultivo	sin	

* S2 - siembra y segunda labor.

En la matriz mixta los tres primeros factores y sus niveles son los mismos que en la matriz Plan Puebla I y sólo el resto de los factores tiene un tratamiento especial.

Este enfoque tiene como ventajas principales: 1) la sencillez en el procedimiento de interpretación; 2) la flexibilidad, número de factores y niveles y 3) la facilidad de manejo en el campo. La desventaja central del enfoque es la imposibilidad de medir las interacciones dentro del grupo de cinco factores y entre este grupo y el de tres factores.

Este enfoque tiene las siguientes desventajas: la parcela experimental sugerida de dos surcos de 8 m de longitud resulta poco representativa, sobre todo en suelos muy heterogéneos. Son demasiados los factores que se evalúan, lo cual propicia demasiadas interacciones que dificultan su análisis y además generalmente enmascaran el efecto de factores importantes como, la respuesta a nitrógeno y fósforo, que es fundamental en los experimentos. Ejemplo: a veces la aplicación del estiércol puede enmascarar cualquier tratamiento de N y P, o un control de maleza mecánico contra un control manual puede tener mayor efecto que la respuesta del tratamiento de fertilización. Lo anterior propicio que este enfoque dejara de utilizarse por ser impráctico y poco exacto.

DISEÑO SAN CRISTÓBAL

El diseño San Cristóbal fue propuesto por Rojas en 1978 y se ha utilizado por diversos investigadores en México y en otros países para el estudio de la respuesta a fertilizantes en varios cultivos, ya que se considera un diseño muy simple y que proporciona información confiable.

Con el diseño San Cristóbal se pueden probar tres factores simultáneamente que generalmente son: nitrógeno, fósforo y potasio, los niveles de cada factor son de 0, 1, 2 y 3 siendo 0 el valor testigo sin fertilizar, 1 el nivel mínimo del elemento, 2 el nivel intermedio y 3 el valor máximo del elemento.

Ejemplo: Se tienen para N, P y K los siguientes niveles.

N: 0 – 40 – 80 – 120
(1) (2) (3)

El 40 será el nivel 1, el 80 el nivel 2 y el 120 el nivel 3.

P: 0 – 30 – 60 – 90
(1) (2) (3)

K: 0 – 50 – 100 – 150
(1) (2) (3)

Para obtener el total de los tratamientos se utiliza la Tabla 3 propuesto por Rojas (1978).

Los tratamientos obtenidos del diseño San Cristóbal pueden ser evaluados en el campo utilizando cualquier diseño experimental (bloques al azar, completamente al azar, entre otros), y posteriormente con los resultados de las variables obtenidas analizarlos estadísticamente

Tabla 3. Tratamientos para el diseño San Cristóbal.

	N	P	K	Tratamiento		
				N	P	K
1	0	0	0	00	00	00
2	2	0	0	80	00	00
3	0	2	0	00	60	00
4	2	2	0	80	60	00
5	0	0	2	00	00	100
6	2	0	2	80	00	100
7	0	2	2	00	60	100
8	2	2	2	80	60	100
9	1	1	1	40	30	50
10	3	1	1	120	30	50
11	1	3	1	40	90	50
12	1	1	3	40	30	150

ENFOQUE DE AGROSISTEMAS

Este enfoque se basa en el concepto de agrosistemas desarrollado por Turrent (1979), a partir del concepto de sistemas de producción que se define como una parte del universo de producción de un cultivo, en el que los factores inmodificables de la producción: suelo, clima y manejo previo son razonablemente constantes.

El enfoque de agrosistemas parte de la estratificación de los factores inmodificables de suelo, clima y manejo previo que afectan los rendimientos del cultivo y su respuesta a los fertilizantes. De esta forma dentro del agrosistema la respuesta del cultivo a los factores tecnológicos es relativamente constante y en consecuencia las recomendaciones de ellos se consideran como únicas y particulares para el agrosistema.

Para la obtención de las recomendaciones tecnológicas, se realiza una serie de experimentos de campo sobre la respuesta del cultivo a los factores tecnológicos dentro



del agrosistema, cuyo número depende de la sensibilidad de dicha respuesta a las variaciones de suelo, clima y manejo, propias del agrosistema. Con base en ellos, en aproximaciones sucesivas a medida que se va captando más información, se obtienen las recomendaciones para el agrosistema, normalmente mediante la media de los óptimos económicos experimentales y ajustes de tipo práctico.

Sin embargo, fuera de las variaciones de los factores de suelo, clima y manejo propias del agrosistema, un factor que suele presentar una variación importante dentro del agrosistema es el contenido nutrimental del suelo para aquellos nutrimentos que sean deficitarios, lo que causará variaciones también importantes de la respuesta del cultivo a los fertilizantes. Si bien dichas variaciones se pueden captar con la experimentación de campo, y se consideran en la generación de las recomendaciones de fertilización, éstas se dan en términos de un valor medio para el agrosistema. De esta manera, para los suelos cuyos contenidos nutrimentales difieran del valor medio del agrosistema, la recomendación presentará algún grado de imprecisión, mayor cuanto más difieran de dicho valor medio.

Por otra parte, los factores de suelo, clima y manejo que suelen variar dentro del agrosistema pueden afectar el suministro de nutrimentos por el suelo y su aprovechamiento por el cultivo, y consecuentemente su respuesta a los fertilizantes. Una situación similar ocurre con factores de suelo, clima y manejo que causan variaciones de los rendimientos del cultivo, lo que indirectamente se relaciona con cambios en las necesidades de nutrimentos de éste, a través de una mayor o menor extracción de nutrimentos.

A este enfoque se le consideró como parcializador para generar recomendaciones por no considerar en conjunto a todos los factores del suelo, clima y manejo previo que afectan y determinan los rendimientos de los cultivos y su respuesta a los fertilizantes. A este respecto es sabido que los factores de suelo, clima y manejo previo que afectan los rendimientos de los cultivos y su respuesta a los fertilizantes son numerosos y además pueden y suelen presentar una serie de interacciones que no son necesariamente despreciables (Volke y Etchevers, 1994).

EL ENFOQUE DE ANÁLISIS DE SUELO

Este enfoque se basa en la relación inversa que se da entre la respuesta de un cultivo a un nutrimento y sus necesidades como fertilizante, y el contenido del nutrimento en el suelo en su forma aprovechable, en términos de que a medida que este aumenta, dichas necesidades decrecen, hasta hacerse inexistentes (Volke, 1994).

Para aprovechar esta relación con fines de generar recomendaciones de fertilización, es necesario estimar la cantidad del nutrimento del suelo que puede ser aprovechable por la planta, lo que se hace mediante un método de análisis de suelo. Dependiendo del nutrimento, estos métodos pueden ser de tipo biológico y químico, como para el nitrógeno, y de tipo químico, como para el fósforo y potasio.

Tratando de simular de la mejor manera la extracción del nutrimento que hace la planta, y debido a que la extracción del nutrimento puede ser afectada por características del suelo, se suelen probar varios métodos, cuya elección se fundamenta en conocimientos de química de suelo. La selección del mejor método se hace con base en la mejor asociación entre los valores del nutrimento que, determine el método y la respuesta del cultivo al nutrimento. Para esto, con la finalidad de lograr mayor precisión, normalmente se trabaja bajo condiciones controladas de invernadero.

Una vez seleccionado el mejor método de análisis de suelo, la siguiente etapa consiste en relacionar los valores del nutrimento que da el método con la respuesta del cultivo al nutrimento aplicado como fertilizante, bajo condiciones de campo. Para esto, es necesario trabajar con una serie de experimentos de respuesta del cultivo al nutrimento, que muestreen el ámbito de variación del nutrimento en el suelo.

Sin embargo, la respuesta del cultivo al nutrimento depende no sólo del contenido del nutrimento en el suelo, sino también de factores de suelo, clima y manejo que pueden afectar tanto el suministro de nutrimentos por el suelo y su aprovechamiento por el cultivo como los requerimientos de ellos por el cultivo a través de la extracción que haga según el nivel de rendimientos.

En cuanto a los factores de suelo, clima y manejo que afectan la extracción de nutrimentos por el cultivo según el nivel de rendimientos, son aquellos que afectan los rendimientos, tales como: la materia orgánica, la presencia de sales y de carbonatos, la profundidad del suelo y la textura, entre los factores de suelo: la deficiencia de humedad, las heladas, las granizadas y los vientos fuertes (por acame), entre los factores climáticos: y, la rotación de cultivos y el cultivo previo, el régimen hídrico, la fecha de siembra y la variedad, entre los factores de manejo.

Tal como los contenidos nutrimentales del suelo, estos factores deben ser considerados en la experimentación de campo, a fin de tomar en cuenta las modificaciones que causan a la relación entre la respuesta del cultivo al nutrimento y el contenido de él en el suelo. Esto exigirá captar mediante la experimentación de campo, la variación de dichos factores dentro de la región en estudio.

Todo lo anterior conduce a plantear que la calibración de un método de análisis de suelo para estimar el contenido aprovechable del nutrimento en el suelo, con fines de predecir las necesidades y recomendaciones de fertilizantes para cultivos, pueda ser una tarea que requiere tiempo y es más o menos costosa, pero también que puede no resultar simple en cuanto al análisis de la información que se requiere realizar.

En la práctica, esta situación se ha traducido en que no se hayan desarrollado calibraciones satisfactorias y consecuentemente, que el enfoque de análisis de suelo potencialmente más preciso para generar recomendaciones de fertilización, no ha tenido el desarrollo esperado.

LA NUTRICIÓN DE CULTIVOS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

La nutrición de los cultivos en la Península de Yucatán ha tenido la misma evolución que en el resto del país, es decir hasta la década de los 90's, se basó en los tratamientos de fertilización que se generaron de metodologías antes descritas que fueron válidas en su tiempo y momento pero que posteriormente se vio tenían limitaciones.

En la Tabla 4 se presentan los tratamientos recomendados para los principales cultivos en la Península de Yucatán, en los dos tipos de suelo mas representativos que son los leptosoles, que ocupan aproximadamente el 90% de la superficie de la Península y los luvisoles ródicos y férricos.

En la Tabla 4 se observa que en algunos cultivos existen dos tratamientos recomendados para el mismo cultivo en el mismo tipo de suelo, lo cual denota la falta de precisión en las recomendaciones, ya que estos tratamientos se obtuvieron solo evaluando la respuesta en rendimiento del cultivo a diferentes dosificaciones de nitrógeno, fósforo y en algunas ocasiones potasio; sin considerar otros aspectos importantes como biomasa total, peso fresco, peso seco, abastecimiento de nutrientes por el suelo, eficiencia del fertilizante, etc.

Otro aspecto importante que debe señalarse es que hasta los 90's existía la creencia de que no era necesario aplicar potasio a los cultivos, porque los suelos de todo el país eran ricos en este elemento. Sin embargo se ha demostrado que existe una gran respuesta de todos los cultivos a este nutrimento, principalmente las hortalizas, que consumen más cantidades de este elemento que de nitrógeno y fósforo.

Respecto a la forma recomendada de aplicar el fertilizante a los diferentes cultivos, que era en banda o alrededor de la planta, en una o máximo dos aplicaciones, se considera una limitante, porque dadas las características de los suelos de la Península y de las condiciones climáticas (precipitación y temperatura), se presentan pérdidas considerables de nutrientes principalmente nitrógeno y que nunca han sido cuantificadas.

EL ENFOQUE DE BALANCE NUTRIMENTAL

Este enfoque parte de la base de que la necesidad de fertilización de un cultivo esta dada por la demanda del nutrimento del cultivo, la cantidad del nutrimento que suministra el suelo y la eficiencia del fertilizante aplicado al suelo (Rodríguez, 1990; Etchevers *et al.*, 1991).

$$\text{Dosis de Fertilización} = \frac{\text{Demanda del nutrimento por el cultivo} - \text{Suministro de nutrimentos por el suelo}}{\text{Eficiencia del fertilizante}}$$

Tabla 4. Recomendaciones generadas para la Península de Yucatán.

Cultivo	Tratamiento	Fuente de Consulta
Maíz (Luvisoles)	30-30-30, 40-60-00	INIA, 1981
Maíz (Leptosoles)	00-40-00	INIA, 1981
Frijol (Luvisoles)	80-90-00, 30-80-00	INIA, 1981
Frijol (Leptosoles)	30-80-00	INIA, 1981
Calabaza(Luvisoles)	225-225-50	INIA, 2000
Tomate rojo (Leptosoles)	75-100-100 *	INIA, 1984
Tomate rojo (Luvisoles)	150-200-50	INIA, 1981
Tomate verde (Leptosoles)	75-100-100 *	INIA, 2000
Chile (Leptosoles)	50-100-100 *	INIA, 1984
Chile (Luvisoles)	120-120-50	INIA, 1981
Pepino (Leptosoles)	100-100-100 *	INIA, 2000
Pepino (Luvisoles)	200-225-50	INIA, 1981
Melón (Leptosoles)	50-100-100 *	INIA, 1982
Melón (Luvisoles)	200-225-50	INIA, 1985
Sandía (Leptosoles)	38-38-38 *	INIA, 1983
Sandía(Luvisoles)	225-225-50	INIA, 1981

* Acompañada de fertilización orgánica.

La demanda de nutrimentos se refiere a la cantidad de elemento que consume la planta desde la siembra hasta la cosecha y se obtiene al multiplicar la concentración de cada elemento en una planta entera al final de su ciclo productivo por el peso seco de esa planta (Bertsch, 1998).

El suministro del nutrimento por el suelo comprende, por un lado, la capacidad del suelo para suministrar el nutrimento, y por otro, la eficiencia de la planta para absorber el nutrimento disponible. En estos términos, la capacidad del suelo para suministrar nutrimentos depende de distintos factores de suelo, clima y manejo previo, según el nutrimento de que se trate. Así, para el nitrógeno, el suministro depende de factores de suelo y clima que afectan la mineralización de la materia orgánica del suelo y de los residuos del cultivo anterior, y de cultivos previos de leguminosas en la rotación; para el fósforo, el suministro depende de factores de suelo, como su capacidad de fijación de fósforo, y de manejo, en relación a fertilizaciones previas y su acumulación en los reservorios lábiles y no lábiles. Por su parte, la eficiencia de absorción de la planta depende del tipo de sistema radicular de la planta, en cuanto a: la densidad de raíces para el caso de los nutrimentos inmóviles, como el fósforo y potasio, y la profundidad para el caso de nutrimentos móviles, como el nitrógeno (Rodríguez, 1990). De esta manera, la eficiencia de absorción depende del cultivo según su tipo de sistema radicular, a la vez que de factores de suelo, clima y manejo que lo afectan.

Un índice de suministro de nutrimentos por el suelo, para el fósforo y potasio, lo da el análisis de suelo. Más, para el nitrógeno, Rodríguez (1990) considera que el suministro no es adecuadamente medido mediante índices quí-



micos, que más bien sería función de los residuos de cosecha y las raíces del cultivo incorporados, y del nitrógeno inmovilizado de la fertilización del cultivo anterior, cuando el sistema se encuentra en equilibrio. Sin embargo, otros investigadores han considerado el nitrógeno potencialmente mineralizable (Stanford and Smith, 1972). Para el caso del fósforo, Rodríguez (1990), considera al fósforo determinado por el método de Olsen, conjuntamente con la eficiencia de absorción del cultivo, según el tipo de sistema radical, y para el caso del potasio, al potasio intercambiable y la capacidad tampón del suelo, y la eficiencia de absorción del cultivo, según el tipo de sistema radical.

La eficiencia del fertilizante es un valor que reúne criterios sobre: propiedades del nutrimento, características del suelo, características de la fuente fertilizante, método y época de aplicación y condiciones climáticas.

Los factores que determinan la eficiencia del nitrógeno son:

- **Lixiviación.** Cuando se aplican como NO_3 , cuando se aplica sin fraccionar, en suelos de textura gruesa, zonas de alta precipitación y en suelos sin cobertura vegetal.
- **Volatilización.** Cuando se aplican fertilizantes amoniacales o urea superficialmente, en suelos con pH alcalino o neutro, en regiones cálidas, si se aplica en mezclas con otros fertilizantes de reacción básica.
- **Denitrificación.** Cuando está presente como NO_3 , en suelos con mala aireación, en presencia de microorganismos anaerobios.
- **Fijación.** Como NH_4 , cuando se aplican fuertes dosis de amoniacales en suelos ricos en arcillas 2:1.
- **Inmovilización.** Cuando se aplican residuos con alta relación C/N en suelos muy pobres en N.

Factores que determinan la eficiencia del fósforo:

- **Fijación.** Cuando se aplica al voleo o localizado, en suelos con pH alto porque reacciona con el Ca y ácidos porque reacciona con el Fe y Al.
- **Inmovilización.** Cuando se aplican residuos orgánicos en alta relación C/N, cuando se favorece la actividad microbiana, en suelos muy pobres en P disponible.

Factores que determinan la eficiencia del potasio son:

- **Lixiviación.** Cuando se aplican dosis altas, en suelos de textura gruesa, en suelos muy permeables, en zonas de alta precipitación pluvial, cuando se aplican altas dosis de fertilizantes amoniacales que compiten por el potasio por las posiciones de fijación (Bertsch, 1998).
- **Fijación.** En suelos ricos en arcillas 2:1.

El principal problema que tuvo el enfoque de balance nutrimental, fue que para su aplicación en todo el país, no

existían laboratorios de suelos confiables y con métodos bien calibrados.

ENFOQUE DE NUTRICIÓN INTEGRAL

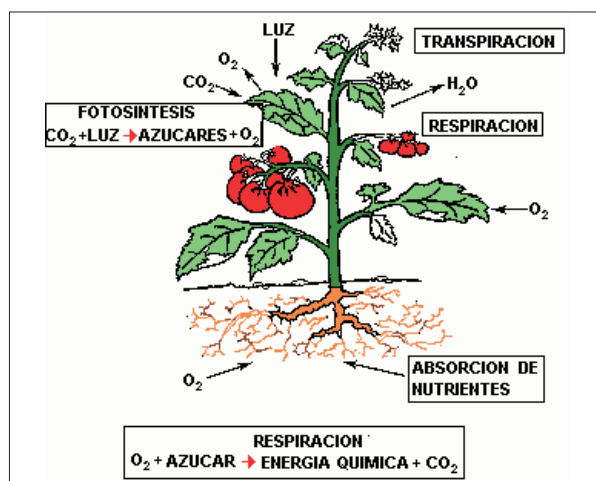


Figura 2. Factores que interactúan en la nutrición de una planta.

Este enfoque parte del principio que para nutrir adecuadamente una planta es necesario considerar diversos factores entre los que destacan los relacionados con la planta, con el suelo y con el clima, y todos ellos interactúan en el desarrollo y producción de un cultivo (Fig. 2).

A este respecto en 1994, Burgueño inicia a nivel comercial con gran éxito en el norte del país un proyecto que revoluciona la producción de hortalizas en México, en donde sin utilizar las metodologías existentes en esa época para generar recomendaciones de fertilización, prueba comercialmente un paquete tecnológico generado por el Dr. Philippe en Francia y utilizado con éxito por productores de ese país. Esta tecnología se basa en el control de algunos factores de la producción, como humedad del suelo, control de malezas, material genético, control de plagas y enfermedades entre otras, y utilizando fertiriego obtiene rendimientos de tomate y chile muy superiores a los promedios regionales y nacionales y basa este logro principalmente en una adecuada nutrición de los cultivos consistente en aplicaciones periódicas en dosis bajas de los nutrientes a lo largo del ciclo de cultivo, de acuerdo a necesidades de las plantas, contrario a lo que tradicionalmente se recomendaba, que era una sola aplicación o máximo dos.

Este mismo paquete tecnológico se prueba con éxito por el propio Burgueño en 1996 en Yucatán, en el denominado Proyecto Uxmal para pepino y okra de exportación.

La base de esta tecnología es la nutrición adecuada del cultivo, la cual se basa en los análisis de tejidos conductores (savia) y análisis de la solución del suelo y el Dr.

Monard fundamenta sus recomendaciones en los siguientes conceptos:

Para vegetales que producen mucha biomasa en corto tiempo, la composición de la hoja que es el análisis tradicional, varía muy lentamente con respecto a la velocidad de crecimiento de la planta, por lo tanto las hojas no constituyen un órgano de referencia sensible para evaluar el estado nutricional de toda la planta.

Sin embargo, los tejidos conductores (tallos y peciolo), constituyen un mejor indicador porque guardan una relación permanente y directa entre la fuente de aprovisionamiento (sistema radicular) y las zonas de utilización de los elementos minerales (hojas y frutos).

Para el Dr. la cantidad global de un elemento presente en la savia refleja las condiciones de absorción y la fracción iónica de un nutriente en la solución de suelo, constituye una reserva de donde el vegetal se abastece según sus necesidades, por ello el análisis de savia da un seguimiento más preciso de la absorción de nutrientes de una planta que el análisis foliar.

Otra ventaja que presenta el análisis de savia es la rapidez con que se realiza, ya que los análisis son hechos directamente y sin preparación de los extractos de los tejidos conductores, además de ser muy simple pues solo consiste en cortar tejidos axilares de los peciolo, tamularlos, extraer la savia y analizarla directamente.

¿PORQUÉ EFECTUAR UN SEGUIMIENTO REGULAR DE LA NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS?

El flujo y la concentración de elementos minerales en los tejidos varían principalmente en función de: la insolación,

la hora del día, la edad y el estado de desarrollo de la planta, la temperatura y humedad relativa. Con el análisis foliar es imposible establecer estándares óptimos o parámetros fijos de concentración de los elementos minerales en las plantas. Sin embargo con el análisis de savia es posible llevar un control constante de las concentraciones de macro y microelementos, durante el ciclo de desarrollo y especialmente durante la fase de producción.

De acuerdo a lo anterior, la fertigración no se hará con base en normas establecidas, sino a partir de la tendencia de evolución en concentración de los muestreos subsiguientes.

Otra información importante relacionada con el tema son los resultados obtenidos por Burgueño (1987). El cual evaluó la influencia de diferentes sistemas de cultivo sobre la alimentación mineral de las plantas, tanto en suelo desnudo o acolchado, así como sustratos (tezontle, turba, hidroponia entre otras) encontrando que en todos los tratamientos utilizados, manteniendo una alimentación mineral aceptable, no se aprecian diferencias significativas debidas al tipo de cultivo o sustrato sobre el contenido mineral de la savia de las plantas y concluye que la calidad de los frutos no depende de los sistemas de cultivo sino de una fertigración correcta.

A raíz de los resultados de los trabajos realizados por Monard y Roucolle (1983), se tienen los parámetros optimizados de variación de concentración de elementos minerales en función del estado fisiológico del tomate cultivado en invernadero, los cuales se muestran en las Tablas 5 y 6.

Estos resultados pueden servir solo como referencia ya que fueron realizados bajo condiciones climáticas específicas, pero pueden validarse y adaptarse a regiones con climas diferentes.

Tabla 5. Análisis de savia del tomate.

Concentración de elementos minerales (ppm)												
	N, NO ₃	H ₂ PO ₄	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Zn	Cu	Fe	Mn	pH	CE
Nivel 1	1,300	280	4,500	200	270	50	2	3	1.3	3	5.7	15
Nivel 2	1,000	200	3,600	80	200	30	1.2	1.6	1	2	5.6	14
Nivel 3	850	170	3,300	50	180	10	0.6	0.8	0.4	0.7	5.4	11

Tabla 6. Análisis de savia del bell pepper.

Concentración de elementos minerales (ppm)												
	N, NO ₃	H ₂ PO ₄	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Zn	Cu	Fe	Mn	pH	CE
Nivel 1	1,700	280	7,660	80	700	70	3	5	2	6	5.6	21
Nivel 2	1,200	220	7,000	40	550	30	2.5	3	1.5	5	5.4	20.5
Nivel 3	900	160	6,500	30	400	18	1	1	0.5	2.5	5.3	19

* Tomado de Burgueño, 1994.



REFERENCIAS

- Bertsch, F., 1978.** La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, C.R. pp. 126-127.
- Burgueño H., 1994.** La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Vol. I. Culiacán, Sin. México. 45 p.
- Burgueño H., 1995.** La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Vol. II, Culiacán, Sin. México.
- Medina E., J., 1982.** El cultivo del melón en suelos pedregosos del estado de Yucatán. SARH-INIA-CAEZOHE. Folleto para productores. Mérida, Yucatán, México. 18 p.
- Medina E. J., 1982.** El cultivo de la sandía en suelos pedregosos del estado de Yucatán. SARH-INIA-CAEZOHE. Folleto para productores. Mérida, Yucatán, México. 15 p.
- Medina E. J., 1984.** Guía para producir chile habanero en la zona henequenera. SARH-INIA-CAEZOHE., Número 10. Mérida, Yucatán, Méx. 15 p.
- Medina E. J., 1984.** Guía para producir tomate en la zona henequenera. SARH-INIFAP-CAEZOHE. Folleto para productores, Número 9. Mérida, Yucatán, Méx. 16 p.
- Rodríguez S. F., 1989.** Fertilizantes, nutrición vegetal. AGT Editor, S.A. México. pp. 33-44.
- Rojas, B., 1978.** Análisis estadístico del diseño San Cristóbal. Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG). Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA). I4D.
- SARH-INIA, 1981.** Centro de Investigaciones Agrícolas Península de Yucatán. 1981. Logros y aportaciones de la investigación Agrícola en el estado de Yucatán. Publicación especial No. 1.
- Soria, F.M., J.M. Tún S., A.T. Trejo, y R. Terán S. 2000.** Tecnología para la producción de hortalizas a cielo abierto en la Península de Yucatán. Centro de Investigación y Graduados Agropecuarios (CIGA). Instituto Tecnológico Agropecuario No. 2, Conkal, Yucatán, México.
- Turrent, F.A., y R.J. Laird, 1975.** La matriz experimental. Plan Puebla para ensayos sobre prácticas de producción de cultivos. Escritos sobre la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas. Número 1. Depto. Editorial. Col. de Postgraduados, Chapingo, México.
- Turrent, F.A., 1979.** El método C.P. para el diseño de agrosistemas. Escritos sobre la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas. Número 8. Rama de Suelos. Col. de Postgraduados, Chapingo, México. 65 p.
- Turrent, F.A., 1979.** Uso de una matriz mixta para la optimización de cinco a ocho factores controlables de la producción. Escritos sobre la metodología de la investigación en productividad de agrosistemas. Número 6. Col. de Postgraduados, Chapingo, México. 65 p.
- Volke, H.V., y J. Etchevers. 1994.** Recomendaciones de fertilización para cultivos: Necesidades y perspectivas de una mayor precisión. Cuaderno de edafología 21. Instituto de Recursos Naturales. Edafología. Col. de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. 42 p.
- Monard P., y Kerohas, 1982.** Controle de la nutrition et de la fertilisation del cultures legumieres par l'analyse des sucs extraits tisus conducteurs. (S.E.T.C.) C.R. Acad. Agric. de France.
- Monard P., y A. Roucolle, 1983.** Diagnostic de la nutrition et controle de la fertilitation de la tomate et du cocoombe par l'analyse des sucs extraits de gourmands. P.H.M. Un. 242. pp. 37-41.

MANEJO CAMPESINO DE LA SELVA BAJA Y SELECCIÓN DE ESPECIES ARBÓREAS PARA BARBECHOS MEJORADOS EN HOCABÁ, YUCATÁN

Javier García, Aliza Mizrahi y Francisco Bautista

*Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales,
FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán*

RESUMEN

En México, a menudo los problemas agropecuarios son identificados desde una perspectiva disciplinaria e interpretativa de una realidad no propia, en la que se omite la opinión de los actores principales: agricultores y campesinos. En este trabajo se plantea la realización de un diagnóstico de la situación agrícola en el municipio de Hocabá Yucatán, con base en el conocimiento campesino y técnico, para posteriormente diseñar opciones de solución con conocimiento de causa. La lluvia es la causa más importante que limita la agricultura en el municipio de Hocabá, según el 85% de los campesinos entrevistados, lo cual se explica por las características de la precipitación pluvial derivadas de la estacionalidad y la frecuencia de la lluvia, así como por la escasa retención de humedad de los suelos. El barbecho es la segunda causa (5%), en tercer lugar la proliferación de arvenses (3%), y en cuarto la fertilidad y tipo de suelo (3%). Según los campesinos, los tres árboles con mayor uso potencial como barbechos mejorados son *L. latifolium*, *P. piscipula* y *P. albicans*.

ABSTRACT

In México, seldom the agricultural problems are identified by disciplinary and interpretative vision by people from other places without campesinos point of view. In these work, the aims was to do a diagnostic of agricultural situation on the Hocabá, Yucatán, with campesinos and technician known for later design solution options. The rain was the most important cause of limit agriculture in Hocabá, agreement with 85% of campesinos by characteristic rain (one short station and frequency) and by low holding soil water capacity. The fallow was the second cause with 5%, third cause was weeds with 3% and fourth cause was soil fertility and soil type with 3%. Agreement with campesino's know, the three tree with more potential use as fallow improvement, are: *L. latifolium*, *P. piscipula* y *P. albicans*.

INTRODUCCIÓN

En la Península de Yucatán, mediante la milpa con roza, tumba y quema (r-t-q) se produce alimento para más de un millón de campesinos. En el Estado de Yucatán se cultivan alrededor de 150,000 ha con la RTQ constituyendo, a nivel nacional, la mayor extensión cultivada con este sistema (Hernández, 1985). En la zona exhenequenera, a raíz de la disminución del precio de la fibra del agave, ha venido disminuyendo la superficie sembrada, actualmente es una actividad abandonada. Algunos campesinos han vuelto a la siembra el maíz mediante la milpa de r-t-q.

En la década de los noventa los campesinos estaban obteniendo escasa producción de maíz, de 1.5 t ha^{-1} en el primer año a 0.75 t ha^{-1} en el segundo (Arias, 1995), pero actualmente están utilizando vegetación de cuatro años de barbecho lo cual ocasiona que la producción de maíz, primer año, sea menor a la tonelada por hectárea y alrededor de los 500 kg ha^{-1} en el segundo año. De mantenerse e incrementarse esta tendencia, considerando que el tiempo ideal de barbecho es de 20 años, muy pronto faltarían tierras para producir los alimentos para la población humana e incluso comenzaría a escasear la leña, como ha ocurrido en otras áreas del país en las que los suelos han sido fuertemente degradados.

A menudo los problemas agropecuarios son identificados desde una perspectiva disciplinaria e interpretativa de una realidad no propia, es decir, sin tener en cuenta a los actores principales, lo cual genera diagnósticos incompletos y sesgados. En la última década, se ha reportado que en la identificación de los problemas agrícolas la participación campesina debe ser tomada en cuenta, debido que ellos viven y conocen su realidad socioeconómica y su entorno ecológico y político (Martínez y Ortiz, 1992; Sando-

val y Martínez, 1995; Cruz *et al.*, 1998; Barrera-Bassols y Zinck 2000; Toledo, 2000).

Por otro lado, el uso de árboles junto con especies herbáceas y animales en sistemas agroforestales ha sido ampliamente difundido por organismos de carácter internacional. Asimismo, en los últimos años en el mundo, se ha generado una gran cantidad de información sobre los sistemas agroforestales en los que se mencionan las ventajas ambientales de la utilización de los árboles; sin embargo, existe muy poca información sobre estos sistemas en clima de trópico seco y menos aún en zonas de suelos de escasa profundidad limitados por roca continua (Leptosoles), como es el caso de la Península de Yucatán.

Ante esta situación, se requiere la generación de opciones productivas sencillas, rentables y de bajo costo y riesgo, en las que la participación campesina sea tomada en cuenta, debido al conocimiento de su realidad socioeconómica y de su entorno ecológico y político. Es posible la elaboración de estrategias de aprovechamiento de la selva baja caducifolia con características de sustentabilidad conjuntando el conocimiento campesino y técnico. Una opción es el uso de barbechos mejorados con la selección de las especies arbóreas seleccionadas por los propios campesinos (Montagnini *et al.*, 1995b).

Los objetivos de ese trabajo son: a) realizar de un diagnóstico de la situación agrícola en Hocabá, Yucatán, con base en el conocimiento campesino y técnico para identificar los principales problemas que limitan las actividades agropecuarias; y b) la selección y evaluación de especies arbóreas con potencial de uso como barbechos mejorados.

MARCO TEÓRICO

PROCESOS BIOLÓGICOS EN EL PERIODO DE BARBECHO

El período de barbecho es la clave del funcionamiento exitoso del sistema r-t-q (Ewel, 1986). En su fase de reposo, los principales reguladores de la fertilidad del suelo son los procesos biológicos del ecosistema (Scholes *et al.*, 1994; Medina y Cuevas, 1996). Hasta ahora, éstos procesos todavía son muy poco entendidos por ecólogos, aun en sistemas naturales, y rara vez investigado por agrónomos, debido al éxito de los insumos tipo revolución verde, que efectivamente sobrepasan los procesos biológicos del suelo (Anderson e Ingram, 1993). No obstante, mucho se conoce sobre el papel fundamental de los árboles como mejoradores de suelos (Gizachew, 1992; Montagnini, 1992; Nair, 1993; Montagnini *et al.* 1995a; Young, 1995), y es por ésta razón que los barbechos mejorados son considerados importantes en los sistemas agroforestales (Sánchez y Palm, 1996; Sanginga, 1996).

Según Young (1995); Medina y Cuevas (1996), de todos los efectos de los árboles, el mantener niveles de materia orgánica vía la circulación de la biomasa (hojarasca y residuos de raíz), es la causa principal de mejoramiento de fertilidad del suelo, por medio del reciclaje de los nutrientes que se encuentran en la materia orgánica y en el suelo. Su flujo va del componente planta a residuos de planta (hojarasca); después, de la fauna y desintegradores del suelo a humus y a minerales liberados, desde el punto de vista de la nutrición de las plantas y su disponibilidad en el suelo. Estos nutrientes, por consiguiente, regresan a la planta por la raíz (Fassbender, 1993; Nair, 1993) y, de esta forma, es como se reciclan los minerales entre el suelo, la biomasa vegetal y la reposición de materia orgánica (Ruthenberg, 1980).

Al desprender la hojarasca de la biomasa, parte de los nutrientes se translocan hacia órganos perennes antes de tirar su follaje. Por esto, sus contenidos en hojas vivas son usualmente de mayor concentración que en la hoja-

rasca (Young, 1989). La translocación de nutrimentos de las partes de la planta senescente y el rápido consumo de nutrimentos por desintegradores, micorrizas y raíces, contribuyen a la alta productividad de éstos sistemas.

Aunque una relativamente elevada cantidad ciclan entre los árboles y el suelo, las pérdidas de nutrimentos del sistema son relativamente bajas (Myers *et al.*, 1994).

Kwesiga (1994), Myers *et al.*, 1994 y Mo *et al.*, (1995), mencionan que en ecosistemas naturales, existe una sincronización con respecto al crecimiento de la planta y la disponibilidad de nutrimentos de hojarasca, entradas atmosféricas e intemperización de las rocas, fuentes principales de entradas de elementos minerales. Una variedad de mecanismos o procesos contribuyen a esto y la extensión en que éstos mecanismos y procesos ocurren y resultan en sincronización depende de varios factores incluyendo el clima, tipo de suelo y el nutrimento en cuestiones (i.e, cuando se vuelven limitantes).

El sistema presenta un funcionamiento sostenido por el proceso de fotosíntesis, que hace posible compensar el incremento, la renovación y la respiración del ecosistema. La materia orgánica juega un papel importante dentro del mismo, ya que contribuye con los elementos nutritivos para su autosuficiencia adaptada a las condiciones de sitio respectivas (Fassbender, 1993). La materia orgánica y los elementos nutritivos son, pues, el "capital" de los ecosistemas tropicales y el punto de partida para su utilización por el hombre. Anderson e Ingram (1993) mencionan que la relevancia de enfocar en el ciclo de nutrimentos es principalmente para facilitar el seguimiento de los elementos a través de sus diferentes transformaciones, y un manejo efectivo requiere de un conocimiento detallado del contenido de nutrimentos que contiene la vegetación ya que la productividad es sostenida por la ajustada integración del sistema vegetativo con el sistema biológico del suelo con relación al ciclo de nutrimentos y la materia orgánica (Brown *et al.*, 1994; Myers *et al.*, 1994).

ÁRBOLES CON POTENCIAL DE USO EN BARBECHOS MEJORADOS

La cantidad de residuos vegetales que la planta adiciona al suelo, considerada como el puente de enlace entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema (Fassbender, 1993), determina la concentración de nutrimentos que se aportarán y esto depende de la especie arbórea específica (Young, 1989; Nair, 1993; Brown *et al.*, 1994). Cada uno de sus componentes (partes maderables y reproductoras, residuos de raíz y follaje) contiene una composición química específica (Fassbender, 1993; Williams-Linera y Tolome, 1996). Esta concentración de elementos nutritivos en los tejidos (biomasa) de los árboles varía de acuerdo a su disponibilidad en el suelo (fertilidad del sitio) que incluye su estado de desarrollo y sus propiedades físicas y químicas en el sitio (Bonham, 1989).

Si el material parental es rico en nutrimentos, permite el desarrollo de una vegetación exuberante, que al final produce mayor cantidad de biomasa, y por ende, de nutrimentos; pero si es de baja fertilidad inherente, los tejidos van a presentar un bajo contenido (Bruning y Sander,

1983). Esto significa que el contenido de nutrimentos en la biomasa es resultado de la cantidad acumulada durante el periodo de crecimiento (Nair, 1993; Montagnini y Sancho, 1994). Asimismo, el desarrollo de las diferentes especies dependen de los factores característicos de cada una de ellas, es decir, el requerimiento específico de cada especie (mecanismos de consumo), producto de factores morfológicos y fisiológicos como tasa de crecimiento inherente y madurez de la planta, de su adaptación (plantas leguminosas, plantas deciduas) y de las características del sitio (suelo, clima) durante su crecimiento (Gillespie, 1989; Fassbender, 1993; Medina y Cuevas, 1996; Medina, 1996).

No obstante, dentro de los ecosistemas existen especies que se adaptan a las condiciones y maximizan la utilización de los nutrimentos disponibles en el suelo. Árboles con alta concentración de elementos nutritivos en sus biomasa corresponden normalmente a especies que están caracterizadas por un número de factores intrínsecos: alta tasa fotosintética, rápido crecimiento, gran tamaño, corta madurez biológica, un lato mecanismos de consumo de nutrimentos, como de su fonología y requerimientos fisiológicos. Interacciones biológicas extrínsecas a los árboles también son importantes e incluyen competencia interespecífica baja, rápida descomposición de materia orgánica y la presencia de microorganismos simbióticos y mutualísticos (Medina, 1996). Esta habilidad de atrapar específicamente el recurso disponible (nutrimentos, incluyendo agua y luz) le dan la ventaja a éstas especies para ocupar mayor espacio, absorber un alto consumo de minerales y, consiguientemente, producir una elevada cantidad de biomasa (subterránea y/o aérea) (Medina y Cuevas, 1996). El componente arbóreo bajo el sistema de barbechos mejorados tiene la capacidad de producir por lo menos la misma cantidad de biomasa que la vegetación natural (Young, 1989; Nair, 1993).

Esto significa que aún en suelos con bajo contenido de nutrimentos, existen especies que selectivamente pueden acumular ciertos elementos minerales (Sánchez, 1995). De éste modo, en barbechos mejorados se prefieren árboles que sean de rápido crecimiento, con capacidad de fijar nitrógeno atmosférico y que desarrollen raíces profundas y produzcan gran cantidad de biomasa con un alto contenido de nutrimentos ya que, a través de esto, adicionarán mayor fertilidad al sistema (Sanginga, 1996).

NUTRIMENTOS DEL SUELO

De todos los nutrimentos, el C es el punto focal de los ecosistemas ya que al ser captados por las plantas (como CO₂ atmosférico), vía fotosíntesis, esta energía (luminosa) se convierte a energía química (glucosa) que, consiguientemente, es transformada (por la respiración) en productividad primaria (biomasa) requerido para crecimiento y desarrollo (Nair, 1993; Fassbender, 1993).

Los elementos nutritivos que los cultivos necesitan para su crecimiento son de los primarios (N, P, K), secundarios (Ca, Mg, S) y los micronutrimentos (Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Cl). Muchos suelos tropicales están empobrecidos de nutrimentos inorgánicos provenientes del material pa-

rental, por lo que dependen de los elementos minerales de la materia orgánica para mantener su fertilidad.

En estos suelos tropicales húmedos, el nitrógeno (N) es frecuentemente el más limitante (Young, 1989) y hay grandes áreas donde el N es el elemento limitante primario (Rao *et al.*, 1982; Arnason *et al.*, 1982; Ewel, 1986; Medina, 1996). Ambos elementos son de gran importancia tanto para la productividad de los ecosistemas, como de los cultivos (Ewel, 1986). Debido a que N no proviene de la reserva mineral del suelo (95% del N en el suelo está en forma orgánica) (Hagger *et al.*, 1993), en ecosistemas manejados, el ciclo del N es controlado normalmente con la aplicación de fertilizantes inorgánicos, cuando el nitrato es perdido por lixiviación o por sus varios productos gaseosos: desnitrificación y volatilización de amonio, debido a su alta movilidad (Caudle, 1984; Ewel, 1986; Myers *et al.*, 1994; National Soil Survey Centre, 1995).

La deficiencia del fósforo (P) comúnmente aparece después de algunos años de cultivo (Young, 1989), debido a que la mayoría del P que está disponible para las plantas se encuentra en la materia orgánica del suelo, y como el P es el único macronutriente que suministra el material parental exclusivamente (Buckman y Brady, 1991), su bajo grado de intemperización (que requiere de largos periodos) no permite tenerlo a disposición de la planta a tiempo.

Además, grandes cantidades de éste mineral solamente se encuentra en el suelo en formas químicas compuestas, no accesibles a la planta. Asimismo, éste elemento es muy inmóvil por lo cual las raíces de las plantas, facilitadas por micorrizas, tienen que crecer hacia ellas para obtenerlo (Ewel, 1986), por lo que la materia orgánica y los microorganismos son importantes eslabones en el ciclo crítico de éste elemento (Bruiling y Sander, 1983).

El potasio (K) es menos deficiente, excepto en suelos bajo la producción de cultivos de raíz. La falta de K aparece en donde está deficiente en el material parental del suelo o por los efectos de la quema (Fassbender, 1993). Por otro lado, la escasez de los micronutrientes, más seguro aparece en suelos donde la insuficiencia de elementos nutritivos es remediada con la aplicación de fertilizantes inorgánicos (Young, 1989).

En la Península de Yucatán, que contiene un suelo todavía en las primeras etapas de formación (SARH, 1988; Méndez, 1992), con apenas 63,000 años (Flores y Espejel, 1994), hace que predominen suelos pedregosos y calizos (Duch, 1995) alcanzando el 90% entre los que destacan los rendzinas y litosoles (extremadamente pedregosos) con un espesor somero y baja capacidad de retención de humedad (SARH, 1988). Esta roca calcárea, no es buena formadora de suelos ya que, al descomponerse, forma el 90% o más de CO₂, significando que sólo una pequeñísima parte pasa a formar parte del suelo (Aguilera, 1959 citado por Hernández *et al.*, 1995; Bautista y Estrada, 1998). No obstante, según Bautista *et al.*, (1998) los suelos neutros a alcalinos de Yucatán, a pesar de estar en condiciones de trópico, contienen altas cantidades de materia orgánica y N, con arcillas de carga fija y altos contenidos de fósforo total (pero con posibles problemas de disponibilidad). Debido a esto, el estado se caracteriza por ser una planicie ondulada y caliza con un bajo contenido

de fósforo aprovechable (SARH, 1988) y con una significativa variedad espacial de los suelos (Bautista *et al.*, 1999).

FUNCIONAMIENTO DEL BARBECHO MEJORADO

Se ha demostrado que con ésta técnica, la productividad del suelo, es decir, la cantidad de minerales que se consideran adecuados para los cultivos agrícolas que se van a establecer, se puede alcanzar en un período de 2 a 5 años (Caudle, 1984; Drechsel *et al.* 1991; Montagnini, 1992; Kwesiga y Coe, 1994; Kwesiga, 1994; Montagnini y Sáncho, 1994a). La forma acelerada de recuperación es la que hace a los barbechos mejorados que sean considerados importantes para la problemática de la milpa (Sánchez y Palm, 1996).

Varios estudios han demostrado la influencia positiva que tienen los árboles en la fertilidad del suelo (Young, 1989; Campbell *et al.* 1994; Montagnini y Sáncho, 1994b; Sanginga, 1996). De acuerdo a Kwesiga (1994), Myers *et al.* (1994) y Mo *et al.* (1995), existen dos principales fuentes de entrada de minerales a los ecosistemas: los nutrientes disueltos de la intemperización del material parental y de la mineralización de la materia orgánica que proviene de la hojarasca. No obstante, los nutrientes adicionados al ciclo que incrementan o aumentan en el sistema (Fig. 1) y alcanzan el uso sostenible del suelo en corto tiempo (Nair, 1993; Young, 1995), provienen de: a) la fijación simbiótica de N atmosférico (National Academy of Science, 1979; Sanginga, 1996); b) la extracción de nutrientes (P, K, Ca, Mg y los micronutrientes) por raíces profundas, liberadas del subsuelo como producto de la intemperización de las rocas (para P, es a través de raíces en asociación con hongos micorrizas) (Kwesiga, 1994), c) los nutrientes que se atrapan y se recobran (por la densa red de raíces profundas) en la solución del subsuelo o en su superficie (Caudle, 1984; Glover y Beer, 1987; Ewel, 1986; Young, 1989), que de otra forma se perderían por lixiviación (nitrato, cationes y los demás nutrientes); d) los elementos disueltos que provienen del lixiviado de follaje y tallos (troughfall, steamflow) contenidas en partículas de polvo y lluvia que se depositan en la superficie de las plantas (N, P, K, Ca, Mg, Na, S) (Bruning y Sander, 1983; Fassbender, 1993; Jensen, 1993; Medina, 1996) como también de la lixiviación en epífitas tales como líquenes (Bruning y Sander, 1983); e) como los árboles proporcionan hábitat para fauna silvestre, nutrientes son aportados a través de excrementos de la fauna avícola y animales terrestres (Medina, 1996) y f) de la transferencia de la biomasa subterránea (i.e. descomposición de las raíces extensivas y nódulos).

Las raíces juegan un papel fundamental en mantener la fertilidad del suelo ya que se están reemplazando constantemente de igual forma a la caída de hojarasca (Young, 1995).

En ecosistemas de climas secos, se ha encontrado que la biomasa de raíces es mayor que de bosques húmedos (Murphy y Lugo, 1986a). En dichos ecosistemas secos, estudios han reportado que la biomasa subterránea de los árboles han aportado hasta 50% de la biomasa aérea (Murphy y Lugo, 1986b). Sin embargo, Brown *et al.*,



(1994) y Sanford y Cuevas (1996) mencionan que en éstas regiones, su proporción es mucho más que la fitomasa aérea. Como no son removidos para forraje, leña, etc., significa que una considerable proporción de la producción primaria neta ocurre debajo de la tierra, por lo que juegan un papel central en mantener la materia orgánica, disponibilidad de nutrientes y las propiedades físicas del suelo (estabilidad de los agregados, capacidad de retención de humedad, aeración, permeabilidad, resistencia a erosión) (Glover y Beer, 1987; Anderson e Ingram, 1993; Young, 1995). Asimismo, rompen capas endurecidas y compactas del suelo (en caso de Yucatán, la coraza calcárea), por el cual aportan a la intemperización y formación de suelo (Nair, 1993; Young, 1995; citado por Hernández, *et al.*, 1995; Duch, 1995). Además, como son fijadoras de nitrógeno atmosférico son de importancia especial porque crecen en suelos deficientes de N y P y pueden restaurar su fertilidad por la materia orgánica y N que adicionan.

Las raíces profundas son importantes en suelos pobres debido a que incrementan su explotación en más volumen de suelo. En suelos con climas secos, los sistemas de raíces profundas son el único mecanismo de extraer los nutrientes que se encuentran lixiviados profundamente en el subsuelo. Debido a lo anterior, el subsuelo es probablemente más importante en la nutrición de los árboles y arbustos, que es para los cultivos de herbáceas (Ewel, 1986).

Al final del periodo de barbecho, los árboles son cosechados y la porción de la biomasa (ramas con hojas) que no es útil como leña/madera, se regresa al suelo contribuyendo a la fertilidad. De esta forma, esa estabilidad del ecosistema en la fase de descanso, que es considerada crítica para el éxito y la sostenibilidad de la práctica (Nair, 1993), se puede restablecer nuevamente demostrando su

viabilidad y eficacia como una alternativa en términos técnicos, ecológicos y sociales.

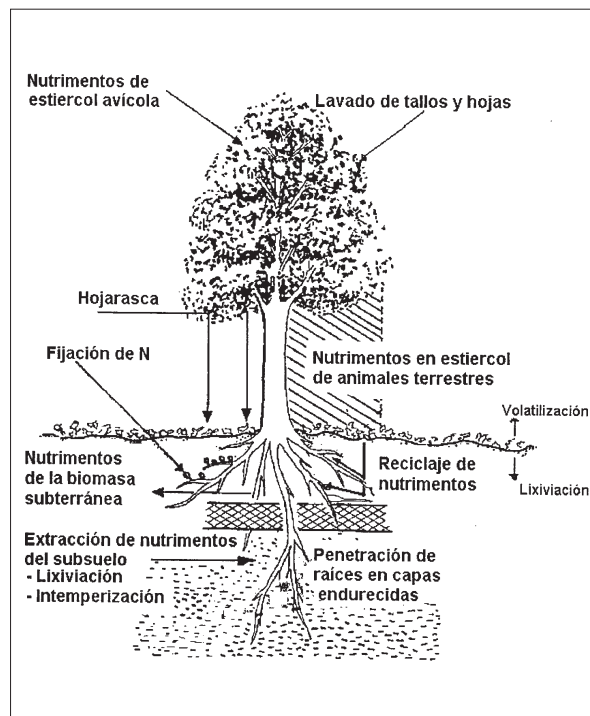


Figura 1. Representación esquemática de cómo los árboles mejoran la fertilidad del suelo (adaptado de Young, 1989).

MATERIALES Y MÉTODOS

El municipio de Hocabá se encuentra en la región central del estado de Yucatán a los 20° 49' de latitud norte y 89° 15' de longitud oeste al interior del paisaje geomorfológico definido como planicie estructural baja denudativa de hasta 10 m de altitud (Fig. 2) (Bautista *et al.*, 2003). El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano AW,(i')g (Orellana, 1999). El tipo de vegetación corresponde a selva baja caducifolia (Flores y Espejel, 1994).

DIAGNÓSTICO

En el diagnóstico se realizaron 55 encuestas a campesinos, con 26 preguntas abiertas y 27 cerradas, sobre aspectos agrícolas y sobre las características de los árboles para su utilización como barbechos mejorados (crecimiento, suelos, usos, etc.). La información campesina fue comparada con estudios realizados en la zona mediante una revisión bibliográfica y con análisis de agua y suelo.

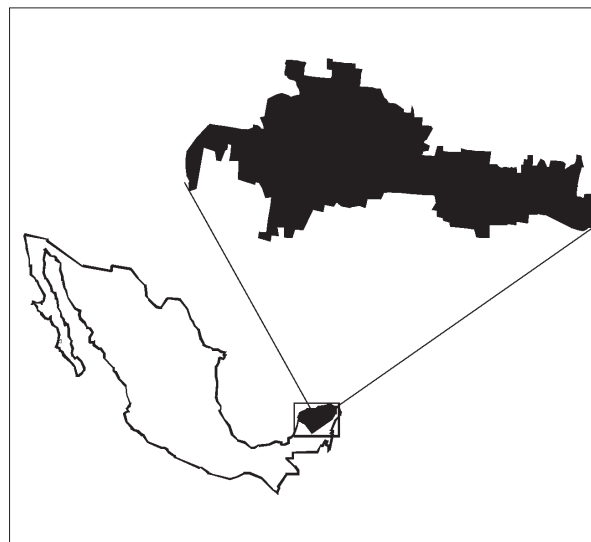


Figura 2. Localización de la zona de estudio.

Se tomaron 10 muestras de agua durante la época de seca de los pozos de monitoreo de la CNA en los siguientes municipios: Hocabá, Hochtún, Homun, Sanahcat, Seye, Tahmek y Xocchel. La calidad del agua se analizó con base en los iones solubles (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}) (APHA *et al.*, 1992), para determinar el carácter cálcico, magnésico, sódico, o mixto del agua; el carácter clorurado, sulfatado, bicarbonatado, carbonatado, o mixto; y el carácter de la mezcla de iones (González, 1994). Se calculó la salinidad efectiva y la salinidad potencial de acuerdo con Salgado *et al.*, (1999), así como la relación de absorción de sodio (RAS) y el carbonato de sodio residual (CSR) de acuerdo con Aguilera y Martínez (1996).

Se realizaron dos perfiles de suelo en cada una de las formas de terreno de la planicie ondulada: montículos y planadas. Los perfiles fueron descritos de acuerdo con FAO (1990). Las muestras de suelo se tomaron por horizonte para la realización de análisis físicos y químicos. Los análisis de las muestras de suelo fueron: color por comparación con las tablas *Munsell*; separación y medición de la tierra fina y grava; el porcentaje de grava por tamizado a 2 mm, textura por el método del densímetro de Bouyocus; pH por el método potenciométrico relación suelo:agua 1:2.5; carbonato de calcio equivalente por el método de titulación ácida; materia orgánica con dicromato de potasio; capacidad de intercambio de cationes y cationes intercam-

biales desplazados con acetato de amonio y medidos con espectroscopia de absorción atómica. Los suelos se clasificaron de acuerdo con Referencia Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1998).

BARBECHOS MEJORADOS

Las especies arbóreas con uso potencial de barbechos mejorados fueron seleccionadas por los campesinos. Las características de cada especie fueron comparadas con las recomendadas por Nair (1997) y Montagnini *et al.*, (1995b).

Se realizó un levantamiento de la vegetación en un *Hubche* de 5 años en las dos formas relieve: planada y montículo. La densidad, área basal y biomasa de la vegetación se realizó en parcelas de 5 x 20 m (100 m²), cuatro en el montículo y dos en la planada (Castellanos *et al.*, 1991). Se identificaron las plantas que presentaron un diámetro a la altura del pecho mayor a 1 cm y una altura de 1.4 m. Los ejemplares botánicos fueron identificados en el herbario de la Universidad Autónoma de Yucatán. Se midió la biomasa total y reciclable de las tres especies seleccionadas, así como su contenido de N, P y K según Anderson e Ingram (1993).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DIAGNÓSTICO

La precipitación pluvial

Los campesinos indicaron que el principal problema que afecta la producción agrícola es la dificultad de la predicción de la precipitación y la continuidad de la lluvias (Tabla 1). Mencionaron que las lluvias se pueden adelantar o atrasar, que llueve en lugares muy localizados o que no es pareja la lluvia y que cuando llueve cae mucha agua y luego tarda en volver a llover.

El análisis del climograma de la estación meteorológica más cercana revela que la precipitación anual promedio es de 998 mm con un coeficiente de variación del 16%, con un intervalo de 726 mm en el año más seco hasta 1334 mm en el año más lluvioso. La precipitación media mensual durante la época de lluvia es de 149 ± 70 mm en junio, 155 ± 64 mm en julio, 167 ± 73 mm en agosto, 183 ± 94 mm en septiembre y 99 ± 62 mm en octubre, con un coeficiente de variación del 47%, 41%, 44%, 52% y 62% para los mismos meses, respectivamente (Fig. 3).

El promedio anual de la precipitación pluvial puede calificarse como adecuado para cuestiones agrícolas e incluso la cantidad promedio durante la época de lluvia (753 mm) es suficiente para no tener problemas agrícolas; sin embargo, los coeficientes de variación arriba del 41% y

Tabla 1. Principales causas que afectan el rendimiento en la milpa.

Causas	Opinión de los campesinos (%)
Lluvia (periodicidad)	85
Historia y tiempo de uso del terreno	5
Malezas	3
Fertilidad del suelo	3
Tipo de suelo	1
Otros problemas	3

hasta del 62% durante los meses de la época de lluvia son dos indicadores de la dificultad de predicción y, por supuesto, de la planeación agrícola.

Ante esta situación, la estrategia campesina es la siembra de hasta tres veces en el mismo sitio, así como la siembra de pequeñas superficies en diversos lugares, con un consecuente aumento de trabajo por la pérdida de algunas milpas. También se menciona una mayor intensidad en la canícula y la presencia de vientos del norte (*Xamán* en maya) que traen agua salada durante las épocas de floración y fructificación, con una consecuente disminución del rendimiento agrícola.

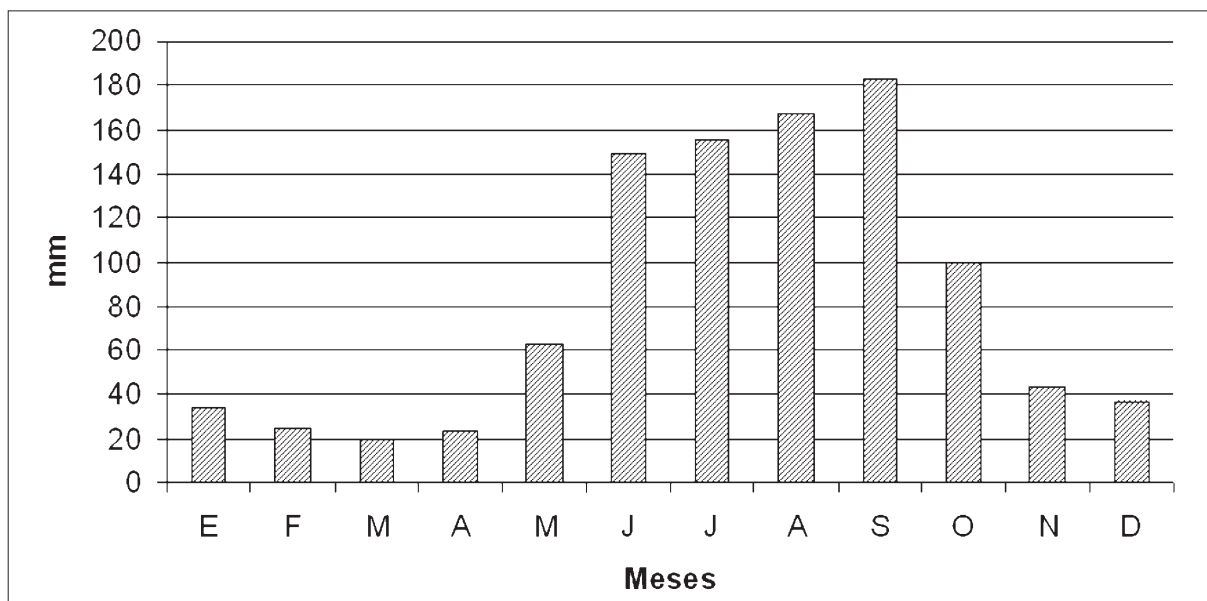


Figura 3. Precipitación pluvial promedio por mes con datos de 30 años.

La forma más común de solucionar el problema de la lluvia errática, en otras regiones del Estado y con campesinos organizados o productores de mayores recursos económicos, es mediante el establecimiento de sistemas de riego. Sin embargo, según los análisis del agua de pozo de la región, el agua es dura, salina y con un contenido de cloro que puede ocasionar problemas de toxicidad a las plantas. El agua no presenta problemas por el carbonato de sodio residual ni por la relación de absorción de sodio (Tabla 2).

Para el uso agrícola se recomienda ablandar el agua para que no propicie la precipitación de los fosfatos. Se recomienda la selección de una técnica de ablandamiento que no incluya el uso de sales de sodio para no ocasionar un daño mayor al suelo. El uso de agua tratada para cues-

tiones agrícolas obliga al uso eficiente de volúmenes pequeños de agua, como por ejemplo el riego por goteo.

El barbecho campesino

Según la experiencia campesina, el tipo de uso del terreno previo a la r-t-q para la implantación de la milpa, afecta a los rendimientos. Los terrenos provenientes de henequenerales abandonados (*Xlapach* en maya) son menos fértiles en comparación con los que provienen de otra milpa, debido a la intensidad de la explotación (20 a 25 años con henequén y de 2 a 4 años con milpa) y a que las raíces de la vegetación espinosa del *Xlapach* (*Pithecellobium albi-*

Tabla 2. Calidad del agua de pozo con fines de riego agrícola en municipios de la zona henequenera.

Municipio	Mezcla	Ca	Mg	Na	K	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CE	SE	SP	CSR	RAS
		mg L ⁻¹									dS m ⁻¹	meq L ⁻¹			
Hocabá	BI-CA	109	43	62	0	0	459	145	0	28	1.2	4	4	0	2
Hoctún	BI-CA	76	10	44	10	0	132	55	0	25	0.7	4	2	0	2
Homun	BI-CA	118	38	69	4	0	415	137	0	23	1.2	5	4	0	2
Sanahcat	BI-CA	112	28	55	9	0	427	127	0	2	1.1	4	4	0	2
Seye	BI-CA	109	39	60	0	0	425	153	0	25	1.1	4	5	0	2
Tahmek	BI-MIX	92	17	64	40	0	192	65	0	125	1.0	5	3	0	2
Xocchel	SU-MIX	64	17	30	23	0	144	70	0	100	0.6	3	3	0	1
Nivel crítico											0.25	3	3	1.25	10

BI-CA= Bicarbonatada cálcica; BI-MIX= Bicarbonatada mixta; SU-MIX= Sulfatada mixta; CE= Conductividad eléctrica; SE =Salinidad efectiva; SP =Salinidad potencial; CSR = Carbonato de sodio residual; y RAS = Relación de adsorción de sodio.

cans, *Mimosa bahamensis*, *Acacia spp.*, *Ceiba aesculifolia*) impiden el buen desarrollo de los cultivos de la milpa. También se dificulta el corte de los árboles (tumba) y el control de arvenses.

Los campesinos saben que la realización de la milpa en barbechos de cuatro años (*Hubché* en maya) se dificulta por la mayor densidad de la vegetación, lo cual ocasiona una mayor demanda de mano de obra. Los rendimientos de maíz llegan a fluctuar entre 125 y 500 kg ha⁻¹ dependiendo del clima y del manejo de las arvenses. Es por ello que bajo estas condiciones solo se cultiva por un año. Además no se obtiene madera, sólo un poco de leña.

En barbechos de 15 años (monte joven *Ta'ankenlem k'aax* en maya), es posible cultivar la milpa por dos años. La r-t-q no requiere de mucha mano de obra y se obtiene leña y algo de madera. La producción de maíz, cuando la precipitación es favorable, llega a ser de 1050 kg ha⁻¹ en el primer año y de 625 kg ha⁻¹ en el segundo, debido a la proliferación de arvenses y la disminución de la fertilidad del suelo.

En barbechos de más de 20 años (*Nuukush k'aax* en maya) la tumba de la vegetación (corte de árboles) se facilita, debido a que los árboles espinosos no presentan espinas en sus troncos a esas edades. Aún en casos de canícula intensa, el suelo retiene humedad y por esto es posible alcanzar una producción de maíz de 500 kg ha⁻¹. Los beneficios forestales son abundantes.

Las arvenses

Para los campesinos es claro que las arvenses influyen de manera negativa en la rentabilidad de la milpa, tan es así que solo cultivan por dos años, ya que al tercero, la proliferación de arvenses es tan alta que su control requiere mucho esfuerzo físico. Argumentan que las arvenses proliferan en los campos de cultivos con diversa intensidad, dependiendo del manejo y de la historia de uso de la parcela. Comienzan a ser un problema mayor en el tercer año en *Nuukush k'aax* y en el segundo año en *Hubché*.

En la región el uso de herbicidas es una práctica común, los herbicidas más utilizados son Paraquat dichloride y 2,4-D. El Glifosato comienza a promoverse.

Caamal *et al.*, (2001) recomiendan el uso de leguminosas como cultivos de cobertera para el control de arvenses, principalmente a *Mucuna deerenganum*. Los resultados de las investigaciones no publicadas y realizadas en el municipio y/o dentro de la misma zona agroecológica sugieren que es necesario un combate integral de las arvenses, mediante el uso alterno o combinado de cultivos de cobertera y los diversos tipos de herbicidas.

No es posible generar recetas ni paquetes tecnológicos para el manejo de las arvenses debido a las diversas situaciones que se presentan, como tiempo y tipo de barbecho, época de siembra, cultivos principales, cultivos acompañantes, precipitación pluvial errática, usos de cultivos de cobertera, uso de mantillos, etc.; sin embargo, se sugiere analizar cada caso en especial de acuerdo con sus circunstancias particulares lo cual ayudará a una mejor

toma de decisiones (Meelu, 1994). Por ejemplo, en el primer año de cultivo el control de arvenses mediante herbicidas puede llegar a ser el más adecuado; para el segundo o tercer ciclo de cultivo, dependiendo del tipo de barbecho proveniente, el uso de cultivos de cobertera es recomendable.

Las arvenses también pueden ser vistas como un recurso, ya que se han reportado 116 especies de herbáceas de uso forrajero para la zona geomorfológica en la que se localiza el municipio de Hocabá, de las cuales 59 son consumidas por el ganado bovino y 42 son leguminosas con potencial para la fijación biológica de nitrógeno molecular (Flores y Bautista, 2003).

La fertilidad del suelo

Los campesinos expresan que existe un claro "cansancio de la tierra" que puede traducirse como una disminución de la fertilidad, producto del menor tiempo de barbecho que ha disminuido, en promedio, de 26 a 15 años. Actualmente el 59% de los campesinos están utilizando vegetación de 6 a 15 años para la realización de la milpa (Tabla 3).

Tabla 3. Percepción campesina sobre el cambio en el tiempo de barbecho.

Años de barbecho	Antes (%)	Actualmente (%)
2 a 5	0	5
6 a 10	3	22
11 a 15	8	37
16 a 30	59	32
Mayor a 30	22	2
Desconocimiento	8	2
Promedio (años)	26	15

El argumento que los campesinos manejan para fundamentar sus aseveraciones está referido a la producción. Por ejemplo, en el pasado utilizando montes de 15 años y lograban 1500 kg ha⁻¹ en el primer año y 850 kg ha⁻¹ en el segundo; hoy la producción es de 700 y 500 kg ha⁻¹ respectivamente.

En el ambiente técnico, se han reportado problemas de fijación de P, disponibilidad de K y con una baja capacidad de retención de humedad, debido a las condiciones calcáreas, al desbalance de cationes intercambiables y a las características hidrófobas de la materia orgánica, respectivamente (Weisbach *et al.*, 2002).

Investigaciones no publicadas y no definitivas, revelan que la fracción ligera (FL) de la materia orgánica se incrementa de un año a otro por el crecimiento de las arvenses, con lo que se aumenta el contenido de carbono en el suelo y la relación C/N, lo cual hace suponer la disminución de la mineralización del nitrógeno contenido en la FL, con una consecuente disminución de la fertilidad.



Tabla 4. Criterios de selección del terreno para la milpa.

Criterio de selección	Campesinos entrevistados (%)
Presencia de árboles grandes	82
Tipo de suelo	32
Ausencia de pasto	11
Vegetación verde (Ya'ax ka'áax)	5
Buena cosecha en la milpa anterior	3
Cercanía al pueblo	3

Se han realizado experimentos que demuestran la efectividad de la adición de N, P y K (Mariaca *et al.*, 1995), también se ha probado que el uso de leguminosas como cultivos de cobertera y mantillos aumenta la producción del maíz (Caamal *et al.*, 2001) y mejora algunas propiedades del suelo pero no en todos los casos ni con la misma intensidad (Amaya *et al.*, 2003). El empleo de leguminosas herbáceas fijadoras de nitrógeno como cultivos de cobertera son una opción de mejoramiento de la fertilidad además de la adición de materia orgánica y de la conservación de la humedad; sin embargo, los efectos benéficos potenciales de las diversas plantas utilizadas como cultivos de cobertera deben ser evaluados técnicamente y de manera integral (Muraoka *et al.*, 2002).

Los suelos y la heterogeneidad espacial

Por otro lado, la zona de estudio se encuentra al interior de una planicie ondulada, con alternancia de montículos y planadas, con suelos muy diferentes, formando un mosaico en superficies menores a una hectárea (Bautista *et al.*, 2003). En esta zona, el 100% de los campesinos reconoce, de manera general, dos grupos asociados al mesorelieve; *Boxlu'um* en maya (Leptosol) en montículos y *Kankab* en maya (Luvisol) en planadas. Los campesinos reconocen otras clases de tierra pero de extensiones no mayores a 400 m² y que se encuentran de manera ocasional.

El grupo Leptosol presenta las siguientes restricciones de manejo: escasa cantidad de tierra fina, dificultad de enraizamiento, imposibilidad de laboreo mecánico, problemas en la nutrición vegetal por el exceso de calcio asimilable y escasa retención de humedad por la baja cantidad de tierra fina (Tabla 5). La unidad Luvisol presenta una profundidad efectiva variable, de buena a muy buena, con problemas de compactación en la parte baja del perfil, sin problemas fuertes de fertilidad química, sin problemas para el laboreo mecánico y, de manera general, de buena aptitud agrícola (Tabla 6). La principal desventaja radica en la fragmentación en parches que varían de 100 m² a 900 m² de superficie.

Bautista *et al.*, (2004) realizando un estudio de las formas de relieve y los suelos en el municipio de Hocabá y encontraron cuatro tipos de catenas a nivel de grupos de

Tabla 5. Descripción de un Leptosol hiperesquelético localizado en los montículos del karst reciente de Yucatán.

Horizonte	Descripción
A	0-1 cm de profundidad, color en seco 7.5YR2.5/1, estructura granular muy fina estabilidad media, arena 70.6%, arcilla 15.7% y limo 13.74% y clase textural de migajón arenoso; piedras 30%, gravas 50.1, 12.4 carbonato de calcio, con pH= 8.0, 45.0% de MO, 66.2 de CIC, 54.0 Ca, 1.8 Mg, 0.1 Na, 3.3 K, (Cationes y CIC en cmol(+) kg ⁻¹) y 100% de saturación de bases.
Ak/C	1-45 cm de profundidad, color en seco de 7.5YR3/1, estructura granular muy fina estabilidad baja, arena 58.8%. arcilla 17.6%, limo 23.5%, clase textural de migajón arenoso, 67.2% de grava, 25% de piedras, 4% de carbonatos, pH= 8.0, 36.4% de materia orgánica, CIC de 19, 19.2 Ca, 5.4 Mg, 0.4 Na, 3.1 K (Cationes y CIC en cmol(+) kg ⁻¹) y 100% de saturación de cationes.

Tabla 6. Descripción de un Luvisol localizado en las planadas del karst reciente de Yucatán.

Horizonte	Descripción
A	0-14 cm de profundidad, color en seco 5YR4/4, estructura bloques subangulares finos de estabilidad alta, arena 47.0%, arcilla 20.6% y limo 32.4% y clase textural de migajón; sin piedras, sin gravas, sin carbonato de calcio, con pH= 7.9, 12.3% de MO, 39.5 de CIC, 35.2 Ca, 8.3 Mg, 0.1 Na, 3.7 K, (Cationes y CIC en cmol(+) kg ⁻¹), 100% de saturación de bases.
Bt1	14-34 cm de profundidad, color en seco 5YR4/5, estructura de bloques subangulares muy finos y estabilidad media, arena 39.2%, arcilla 30.4% y limo 30.4%, clase textural de migajón arcilloso, sin piedras, sin gravas, sin carbonato de calcio, con pH= 6.8, 5.1% de MO, 11.6 de CIC, 13.0 Ca, 1.4 Mg, 0.1 Na, 1.3 K, (Cationes y CIC en cmol(+) kg ⁻¹) y 100% de saturación de bases.
Bt2	34-50 cm de profundidad, color en seco 5YR4/5, estructura de bloques angulares muy finos de estabilidad media, arena 42.2%, arcilla 32.3%, limo 25.5%, clase textural de migajón arcilloso, sin piedras, sin grava, sin carbonato de calcio, con pH= 6.8, 4.2% de materia orgánica, 20.6 de CIC, 23.4 Ca, 0.7 Mg, 0.2 Na, 0.6 K, (Cationes y CIC en cmol(+) kg ⁻¹) y saturación de bases del 100%.
Bt3	50-80 cm de profundidad, color en seco 5YR4/3, estructura de bloques angulares muy finos con estabilidad media, arena 37.3%, arcilla 37.2%, limo 25.5%, clase textural de migajón arcilloso, sin piedras, sin grava, sin carbonato de calcio, con pH= 6.9, materia orgánica de 3.6%, CIC de 24.4, 19.1 Ca, 0.7 Mg, 0.1 Na, 0.4 K, (Cationes y CIC en cmol(+) kg ⁻¹) y saturación de bases de 86%.

suelo: a) LP-LP; b) LP-CM; c) CL-CM; y d) LP-LV de acuerdo con las formas de relieve Montículo-Planada y en áreas menores a una hectárea, lo cual confirma las observaciones de los campesinos.

El reconocimiento de la heterogeneidad del suelo debe ser considerada en la realización de planes de desarrollo ya que para los campesinos es muy claro que las plantas responden a las condiciones particulares de cada grupo de suelo. Por ejemplo, los campesinos, desde hace siglos asocian al maíz una mayor diversidad de cultivos en los parches de *Kankab* que en los de *Boxlu'um*, realizando así agricultura de precisión o de sitio específico, como se le denomina actualmente. A nivel técnico y con base en el conocimiento campesino, Illsey (1995); Levy y Hernández (1995) encontraron diferencias claras entre la estructura de la vegetación, las especies maderables y las arvenses entre suelos de diferentes formas de relieve.

Bautista *et al.*, (2000, 2003) han diseñado metodología fácil, rápida y económica para la elaboración de mapas parcelarios, con base en el color, pedregosidad y rocosidad superficial.

La política agrícola en el municipio de Hocabá

Actualmente, por razones económicas (necesidad de otro empleo) y políticas agrícolas del gobierno (PROCAMPO), los campesinos están cultivando los *Hubches* y los *Ta'ankenlem k'aax* solamente por un año (Tabla 1), obteniendo una producción de maíz que muchas veces no alcanza para pagar la mano de obra que se requiere para la r-t-q, que es de \$ 50 dólares por hectárea.

Otra razón de la utilización de *Hubches* en la milpa, radica en el programa PROCAMPO. El programa tiene en cuenta únicamente la superficie cultivada y no considera el tiempo de barbecho, ni mucho menos, la cantidad de semilla cosechada. Esta situación ocasiona que los campesinos quemen los *Hubches* y siembren, sabiendo que no obtendrán nada de cosecha. Cuando el campesino ha

tumbado *Ta'ankenlem k'aax* y *Nuukush k'aax* muchas veces ya no lo cultiva para el segundo año debido a que el PROCAMPO solo apoya milpas de primer año. El 30% de los entrevistados recibe apoyos de PROCAMPO.

Cano (2003) encontró que de 1991 a 1995 la superficie con henequén disminuyó de 4179 a 2155 ha, aumentó la superficie con vegetación secundaria de 6548 a 8272 ha, la de milpa de 530 a 609 ha, el uso pecuario de 112 a 264 ha y la superficie con cítricos de 47.8 a 91.5 ha. Este estudio corrobora las opiniones de los campesinos, es decir, existe un aumento de la superficie de *Xlapach*, que se está convirtiendo en milpa y que puede llegar a convertirse en *Nuukush k'aax*.

Los campesinos preferirían tener *Nuukush k'aax*, mayor superficie de *Kankab* y escasa presencia de arvenses para tener mejores cosechas; sin embargo, la realidad es que la cercanía de los terrenos de cultivo con relación al pueblo es un factor que está determinando la selección del terreno, por la razones antes mencionadas.

Los barbechos mejorados

Las tres especies con potencial de uso como barbechos mejorados, seleccionadas por los campesinos fueron: *Lysiloma latisiliquum* (*tzalam*), *Piscidia piscipula* (*habin*) y *Pithecellobium albicans* (*chucum*). Además, *Gymnopodium floribundum* (*ts'itsil che*), *Mimosa bahamensis* (*sak-katzim*) y *Acacia gaumeri* (*Boscatzim*) también lograron altos porcentajes de preferencia (Tabla 7).

Los campesinos identifican que *P. piscipula* es una planta forrajera de importancia en la alimentación de ovinos y bovinos; durante la floración es fuente de néctar para las abejas; aún cuando produce mucho humo, los campesinos la utilizan como leña y en la producción de cal (que- ma del carbonato de calcio) debido a que no se apaga rápido; sus hojas son utilizadas en la preparación de alimentos; es un típico árbol de sombra; cuando sus vainas se revientan (en mayo) es un indicador de la pérdida de la

Tabla 7. Usos de las especies con potencial de barbechos mejorados.

Usos	<i>P piscipula</i>	<i>P albicans</i>	<i>L latisiliquum</i>	<i>L leucocephala</i>
Forraje	X	P	X	X
Leña	X	X	X	P
Carbón	N	X	X	N
Construcción	P	X	X	N
Producción de cal	X	X	X	N
Cocina	X	N	N	N
Sombra	X	N	X	N
Curtir	N	X	X	N
Tintes	N	X	X	N
Medicinal	N	N	N	X
Total	5	6	8	2

X= se utiliza, N = no se utiliza, P= poco utilizada.



humedad y es la señal que los campesinos reconocen para la realización de la quema; crece principalmente en Leptosoles.

L. latisiliquum es una árbol de madera ligera (baja densidad) muy utilizada como leña, en la producción de cal y carbón; este árbol no tira las hojas en la época seca y como es consumida por ovinos y bovinos es un excelente forraje en la época más crítica, es un árbol de sombra; se le encuentra en ambos tipos de suelo pero se piensa que crece mejor en Leptosoles.

P. albicans es un árbol utilizado como material de construcción por la duración de su madera (mayor a los 50 años); presenta cualidades para ser utilizado como leña y en la producción de cal ya que se consume seco y en verde; existe controversia entre los campesinos en cuanto a su uso como forraje; se le encuentra en suelos del grupo Leptosol y Luvisol, prefiriendo este último; se dice que es una especie indicadora de la fertilidad del suelo.

Entre las ocho especies dominantes en la vegetación, que sumaron el 60% de VIR, se encuentran *G. floribundum*, *M. bahamensis*, *L. xuul* y *P. albicans*. Por el contrario, *P. piscipula* y *L. latisiliquum* presentan valores bajos de VIR; sin embargo, es posible que fueran seleccionadas debido a la altura y a la presencia de hojas durante la sequía, respectivamente. Ambas características de estas plantas tienen que ver con el uso campesino ya que *P. piscipula* y *L. latisiliquum* son especies forrajeras y fuente de combustible, además de muy evidentes. De las seis especies seleccionadas por los campesinos, cuatro son de las más altas *M. bahamensis*, *L. xuul*, *P. albicans*, y *P. piscipula*; sin embargo, sólo tres se encuentran entre las más densas *G. floribundum*, *M. bahamensis* y *L. xuul* (Tabla 8).

La biomasa reciclable fue de 18.8 t ha⁻¹ de *P. albicans*, 15.7 t ha⁻¹ de *P. piscipula* y de 5.9 t ha⁻¹ de *L. latisiliquum*. En cuanto a la calidad química, *L. latisiliquum* presenta mayores contenidos de nitrógeno en ramas en ambos suelos que *P. albicans* y *P. piscipula*; sin embargo, en cuanto a fósforo ocurre lo contrario (Tabla 9).

Tabla 8. Levantamiento de vegetación en un *hubche* de cinco años.

Especie	Familia	Densidad	Área basal (cm ²)	Altura promedio (m)	VIR (%)
<i>G. floribundum</i>	Polygonaceae	75	431.0	3.1	10.3
<i>C. espicata</i>	Polygonaceae	55	487.3	3.7	9.5
<i>B. pulchra</i>	Boraginaceae	53	445.0	4.0	9.0
<i>M. bahamensis</i>	Leguminosae	77	319.4	3.4	8.6
<i>L. xuul</i>	Leguminosae	73	255.3	3.3	8.4
<i>B. divaricata</i>	Leguminosae	61	181.1	3.5	6.4
<i>C. glabellus</i>	Euphorbiaceae	50	107.3	2.9	4.7
<i>P. albicans</i>	Leguminosae	6	236.0	4.6	4.0
<i>D. verae-crusis</i>	Ebenaceae	15	65.9	3.1	3.1
<i>P. sartorianum</i>	Myrtaceae	22	31.5	2.7	2.8
Desconocida		8	136.8	4.4	2.8
<i>B. simaruba</i>	Burseraceae	8	68.9	3.4	2.5
<i>H. baruensis</i>	Sterculiaceae	26	67.6	3.0	2.4
<i>C. greggii</i>	Rhamnaceae	17	35.3	3.3	2.3
<i>C. barbadensis</i>	Polygonaceae	10	66.4	2.7	2.2
<i>P. piscipula</i>	Leguminosae	5	42.3	3.6	1.7
<i>S. mombin</i>	Anacardiaceae	7	47.3	3.7	1.5

Tabla 9. Calidad química de las ramas y hojas de las especies seleccionadas por unidad de suelo durante la época de seca (marzo).

Especie	Tejido	C (%)	N (%)	P (%)	C/N	C/P
Leptosol		X±s	X±s	X±s		
<i>L. latisiliquum</i>	ramas	43±0.3	1.22±0.01	0.07±0.0	35.2	614.3
	hojas	40±2.0	3.48±0.01		11.5	
<i>P. albicans</i>	ramas	46±0.4	1.17±0.01	0.13±0.001	39.3	353.8
<i>P. piscipula</i>	ramas	40±2.9	1.16±0.01	0.18±0.001	34.5	222.2
	flores	46±3.2	3.22±0.01	0.19±0.001	14.3	242.1
Luvisol						
<i>L. latisiliquum</i>	ramas	36±0.5	1.21±0.00	0.074±0.001	29.8	514.3
<i>P. albicans</i>	ramas	46±0.5	1.14±0.01	0.067±0.07	40.4	657.1
	frutos	61±1.9	2.30±0.01	0.19±0.001	26.5	321.1

CONCLUSIONES

La lluvia es la causa más importante que limita la agricultura en el municipio de Hocabá en el estado de Yucatán, según el 85% de los campesinos entrevistados, lo cual se explica por las características de la precipitación pluvial derivadas de la estacionalidad y la frecuencia durante el periodo lluvioso. El barbecho o la historia y tiempo de uso de la tierra es la segunda causa (5%), que se debe al tipo y tiempo de barbecho. En tercer lugar se encuentra la proliferación de arvenses (3%), y en cuarto la fertilidad del suelo y el tipo de suelo (3%).

En la utilización del agua del acuífero con fines de riego, debe considerarse su ablandamiento y formas de aplicación en bajos volúmenes. El control de las arvenses puede realizarse de manera integral, considerando el uso

de herbicidas y cultivos de cobertera. El uso agrícola y continuo del suelo requiere de adiciones de nutrimentos (N, P y K) que se pueden realizar mediante fertilizantes en fórmulas completas (N, P y K), abonos y cultivos de cobertera. La heterogeneidad espacial debe ser considerada en la realización de planes agropecuarios a diversas escalas.

Las tres plantas más importantes que los campesinos identifican con uso potencial como barbechos mejorados son *L. latisiliquum*, *P. piscipula* y *P. albicans*. Por la cantidad y calidad de la biomasa reciclable de las tres especies, así como por sus usos y presencia en barbechos cortos, se concluye que son especies con uso real como barbechos mejorados.

AGRADECIMIENTOS

Al *Interamerican Institute for Global Change Research* y al Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (B-1-99 / 014) y al CONACYT (R-31624-B) por el financiamiento del proyecto. El primer autor (JG) agradece a la secretaria de Relaciones Exteriores del gobierno mexicano la beca de estudios. Se agradece a la comisión nacional del agua los datos proporcionados.

REFERENCIAS

- Aguilera, M. y R. Martínez, 1996. Relaciones agua suelo planta atmósfera. Universidad Autónoma de Chapingo. Edo. de México, México.
- Amaya, M., F. Bautista y J. Castillo F., 2005. Dinámica de la calidad del suelo de la milpa con el uso de leguminosas como cultivos de cobertera. En: Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán. F. Bautista y G. Palacio-Aponte (Eds). EPOMEX-UADY. Campeche, México. 282 p.
- Anderson, J. y J. Ingram, 1993. *Tropical soil biology and fertility: a hand book of methods*. CAB International, Wallingford, UK.
- APHA, AWWA, WPCF, 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18ª Edición. Washington D.C., USA.
- Arias, L., 1995. La producción milpera actual en Yaxcaba, Yucatán. En: Hernández E., E. Bello y S. Levy (Eds). La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 1. Colegio de Postgraduados.
- Arnason, T., J. D. M. Lambert, J. Gale, J. Cal and H. Vernon, 1982. Decline of soil fertility due to intensification of land use by shifting agriculturalists in Belize. Central America. Agro-ecosystems.8: pp. 27-37.
- Barrera-Bassols, N. y A. J. Zinck, 2000. Ethnopedology in a worldwide perspectives: an annotated bibliography. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. Enschede, The Netherlands.
- Bautista-Zuñiga, F. y M. H. Estrada, 1998. Conservación y Manejo de los Suelos. Ciencias. 50: pp. 50-55.
- Bautista-Zuñiga, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro, E. Naranjo, A. Caamal, I. Sohn, C. Delgado, H. Estrada, R. Barriento y J. Gómez, 1998. Efecto de las leguminosas en la materia orgánica, fauna y microclima del suelo de la milpa en la zona henequenera de Yucatán, México. Informe. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. p. 110.
- Bautista-Zuñiga, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro y C. Delgado, 1999. Caracterización de los Suelos Someros de la Zona Henequenera de Yucatán.
- Bautista, F., H. Estrada-Medina, C. Delgado-Carranza y M. Sosa-Padilla, 2000. Propuesta metodológica para el levantamiento de terrenos en zonas cársticas de la Península de Yucatán. *Jaina*, 10(1): pp. 7-9.
- Bautista F., E. Batllori-Sampedro, M. A. Ortiz-Pérez, G. Palacio-Aponte y M. Castillo-González, 2005. Geoformas, agua y suelo en la Península de Yucatán. En: Naturaleza y sociedad en el área maya. A. Larque y P. Colunga (Eds). Academia Mexicana de Ciencias y Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán. Yucatán, México.
- Bautista, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro-Alberto, A. Manu y R. Lozano, 2003. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra*. 21: pp. 1-11.
- Bautista, F., H. Estrada-Medina, J. Jiménez-Osornio y J. González-Iturbe, 2004. Relación entre relieve y suelos en zonas cársticas. *Terra. Latinoamericana* 22(3): 243-254.
- Bonham, C. D., 1989. Measurements For Terrestrial Vegetation. A John Wiley-Interscience Publication. p. 338.
- Brown, S., J. M. Anderson, P. L. Wooster, M. J. Swift and E. Barrios, 1994. Soil biological processes in tropical ecosystems. En: The Biological Management of Tropical Soil Fertility. (Editores Wooster, P. L. and Swift, M. J.). A Wiley-Sayse Publication. pp. 15-45.
- Bruning, E. F. and N. Sander, 1983. Ecosystem structure and functioning: some interactions of relevance to agroforestry. En: Plant Research and Agroforestry. (Editor Huxley, P. A.). pp. 221-247.
- Buckman, H. O. and N. C. Brandy, 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. UTCHA y Grupo Noriega Editores. México. 590 p.



- Caamal, A., J. Jiménez, A. Torres y A. Anaya, 2001.** The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agronomy Journal*, 93:27-36.
- Campbell, B. M., P. Frost, J. A. King, M. Mwanza And L. Mhlanga, 1994.** The influence of trees on soil fertility on two contrasting semi-arid soil types at matopos, Zimbabwe. *Agroforestry Systems*. 28: 159-172.
- Cano, L., 2003.** Cambio de uso de suelo en el municipio de Hocabá, Yucatán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 2(1): 45.
- Castellanos, J., M. Mass y J. Kummerow, 1991.** Root biomass of a dry deciduous tropical forest in México. *Plant and soil*, 131: 225-228.
- Caudle, N., 1984.** Tropsoil the First Three Years. Department of Agriculture Communications. North Carolina State University. pp. 38-39.
- Cruz, R., V. Volke, A. Turren y D. Pájaro, 1998.** Clasificación de tierras campesinas para la generación y transferencia de tecnología agrícola entre pequeños productores: caso del maíz en la región central de Veracruz. *Terra*, 16(1): 1-10.
- Drechsel, P., B. Glaser And W. Zench, 1991.** Effect of four multipurpose tree species on soil amelioration during tree fallow in Central Togo. *Agroforestry Systems*. 16: 193-202.
- Duch, G. J., 1995.** Los suelos, la agricultura y vegetación en Yucatán. *En: La Milpa en Yucatán: un Sistema de Producción Agrícola Tradicional*. Tomo 1. (Editores Hernández-X. E.; Baltasar, E. B. y Levy, T. S.). Colegio de posgraduados. pp. 97-107.
- Ewel, J. J., 1986.** Designing agricultural ecosystems for the humid tropics. *Annual Review of Ecological Systems* 17: 245-211.
- FAO, 1990.** Guidelines for soil profile description. 3er (revised) ed. FAO Rome/ISRIC. Wageningen, The Netherlands.
- Fassbender, H. W. 1993.** Modelos Edafológicos de Sistemas Agroforestales. Segunda Edición. Serie de Materiales de Enseñanza No. 29. CATIE. Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, Turrialba, Costa Rica. pp. 493.
- Flores, J.S. y I. Espejel, 1994.** Tipos de Vegetación de la Península de Yucatán. *Etnoflora Yucatanense*. Fascículo 3. Universidad Autónoma de Yucatán. Sostenibilidad Maya. pp. 135.
- Flores, J.S. y F. Bautista, 2005.** Inventario de plantas forrajeras utilizadas por los mayas en los paisajes geomorfológicos del estado de Yucatán. *En: Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán: implicaciones agrícolas, pecuarias y ambientales*. F. Bautista y G. Palacio (Eds.). EPOMEX-UADY. Campeche, México. 282 p.
- Gillespie, R. A., 1989.** Modelling nutrient flux and interspecies root competition in agroforestry interplantings. *Agroforestry Systems*. 8: 257-265.
- Gizachew, L., 1992.** Leucaena in Etiopía, five years results from Bako Research Centre. *Agroforestry Today*. 4: 7-8.
- Glover, N. and J. Beer, 1987.** Nutrient cycling in two traditional central american agroforestry systems. *Agroforestry Systems*. 4: 77-87.
- González, J., 1994.** Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicane: exemple dans la "Comarca Lagunera". ORSTOM. Paris, Francia.
- Hagger, J. P., E. V. Tanner, J. W. Berr and D. C. Klass, 1993.** Nitrogen Dynamics of biological agroforestry and annual cropping systems. *Soil Biology & Biochemistry*. 25(10): 1363-1378.
- Hernández-X., E., 1985.** La agricultura en la península de Yucatán. Xolocotzia. Obras de Efraim Hernández Xolocotzi. Tomo 1. Universidad Autónoma de Chapingo, México. pp 371-409.
- Hernández-X., E., T. S. Levy y E. B. Baltasar (Eds.), 1995.** La roza-tumba-quema en Yucatán. La Milpa en Yucatán: un sistema de Producción Agrícola Tradicional. Tomo 1. Colegio de Postgraduados. pp. 35-86.
- Illsey, 1995.** Vegetación y milpa en el ejido de Yaxcabá, Yucatán. La milpa en Yucatán: un sistema de producción tradicional. Tomo 1. E. Hernández, E. Bello y S. Levy. (Compiladores). Colegio de Posgraduados. Edo de México, México.
- Jensen, M. 1993.** Productivity and nutrient cycle of a javanese home-garden. *Agroforestry Systems*.
- Kwesiga, F., 1994.** Rotational Agroforestry Systems. Training Course on Agroforestry Research For Development. Lecture handout-Module II. 9-27 May, 1994. Nairobi Kenya. Sequential Agroforestry Technologies. ICRAF. pp. 1-24.
- Kwesiga, F. and R. Coe, 1994.** The effects of short rotation Sesbania sesban planted fallows on maize yield. *Forest Ecology & Management*. 64: 199-208.
- Levy, S. y E. Hernández, 1995.** Aprovechamiento forestal tradicional de los hubches en Yucatán. La milpa en Yucatán: un sistema de producción tradicional. Tomo 1. E. Hernández, E. Bello y S. Levy. (Compiladores). Colegio de Posgraduados. Edo de México, México.
- Mariaca R., E. Hernández, A. Castillo, E. Moguel, 1995.** Análisis estadístico de una milpa experimental de ocho años de cultivo continuo bajo roza, tumba y quema en Yucatán, México. *In: Hernández E., E. Bello y S. Levy. La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional*. Tomo 1. Colegio de Postgraduados. Edo de México, México.
- Martínez, J.F. y C. Ortiz, 1992.** Cartografía campesina de tierras en Villa Hidalgo, Zacatecas y su comparación con la carta edafológica. *Terra*, 10(2): 140-150.
- Meelu, O.P., 1994.** Green manuring for soil productivity improvement. World soil resources report # 76, FAO. Rome, Italy.
- Medina, E., 1996.** Biodiversity and nutrient relations in savannah ecosystems: interactions between primary producers, soil micro-organisms and soils. *Ecological Studies*. 121:45-57.
- Medina, E. And E. Cuevas, 1996.** Biomass production and accumulation in nutrient-limited rainforest: implications for responses to global change. *Amazonian Deforestation and Climate*. pp. 221-238.
- Méndez, R. M., 1992.** La fertilidad del suelo en la milpa bajo r-t-q en Yucatán. *En: La Modernización de la Milpa en Yucatán: Utopía o Realidad*. (Editores Zizumbo, D.; Ramussen, C.; Arias, L. M. y Terán, S.). pp. 215-226.
- Mo, J., S. Brown, M. Lenart, and G. Kong, 1995.** Nutrient dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB reserve of subtropical China. *Biotropica*. 27(3): 290-304.
- Montagnini, F., 1992.** Experiments with native trees in Costa Rica and Argentina. *Agroforestry Today*. 4(3): 4-5.
- Montagnini, F. and F. Sancho, 1994a.** Nutrient budget of young plantations with native trees: Strategies for sustained management. *Forest Resources and Wood Based Biomass Energy as Rural Development Assets*. Winrock International an Oxford and I. B. H. Publishing Co. New Dehli. pp. 213-233.
- Montagnini, F. and F. Sancho, 1994b.** Net nitrogen mineralization in soils under 6 indigenous tree species, an abandoned pasture and a secondary forest in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Plant and Soil*. 162: 117-124.
- Montagnini, F., A. Fanzares and S. G. Da Viña, 1995a.** The potentials of 20 indigenous tree species for soil rehabilitation in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil. *Journal of Applied Ecology*. 32: 841-856.
- Montagnini, F., A. Fanzares y S. Guimaraes, 1995b.** The potentials of 20 indigenous tree species for soil rehabilitation in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil. *Journal of applied ecology*. 32:841-856.
- Muraoka, T., E.J. Ambrosano, F. Zapata, N. Bortoletto, A.L. Martins, P.C. Trivelin, A.E. Baoretto y W.B. Scivittaro, 2002.** Eficiencia de abonos verdes (Crotalaria y mucuna) y urea, aplicados solos o juntamente, como fuentes de N para el cultivo de arroz. *Terra* 29(1): 17-23.
- Murphy, P. G. And A. E. Lugo, 1986a.** Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecological Systems*. 17: 67-88.
- Murphy, P. G. And A. E. Lugo, 1986b.** Structure and biomass of a subtropical dry forest in Puerto Rico. *Biotropica* 18(2): 80-96.
- Myers, R. J., C. A. Palm, E. Cuevas, I. U. N. Gunatilleke and M. Brossard, 1994.** The synchronization of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. *En: The biological Management of tropical Soil Fertility*. (Editores Woormer, P. L. and Swift, M. J.). A Wiley-Sayce Publication. Pp. 81-116.

- Nair, P. K. R., 1993.** An Introduction to Agroforestry. Kluwer Academic Publishers in cooperation with ICRAF. Netherlands. pp. 449.
- Nair, R., 1997.** Agroforestería. UACH. Edo. Méx. México.
- National Academy of Science, 1979.** Tropical Legumes: Resources for the future. Washington. D.C. pp. 329.
- National Soil Survey Centre, 1995.** Soil Survey Laboratory Information Manual. National Soil Survey Centre, Soil Survey Lab., Nebraska. Soil Survey Investigation Report No. 45. Version 1.0. May, 1995. pp. 29.
- Orellana, L.R. (Ed.), 1999.** Evaluación climática. In: Chico P. P. (Ed.). Atlas de procesos territoriales de Yucatán. Universidad Autónoma de Yucatán. Yucatán, México.
- Rao, M. R., C. S. Kamara, F. Kwesiga and B. Dugama (s/f), 1982.** Methodological issues for research on improvement fallows. Agroforestry Field Experiments. pp. 8-12.
- Ruthenberg, 1980.** Farming Systems in the Tropics. 3rd ed. Clarendon Press. England. pp. 424.
- Sánchez, P. A., 1995.** Soil productivity and sustainability in agroforestry system. Agroforestería para el desarrollo. IV Curso Internacional de Entrenamiento. 4-23 de septiembre de 1995. Vol. 1. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad de Chapingo, México. pp. 104-107.
- Sánchez, P. A. and C. Palm, 1996.** Nitrogen and phosphorus in African soils- what role for Agroforestry? Agroforestry Today. 8(4): 14-16.
- Salgado, S., D. Palma y J. Cisneros, 1999.** Manual de procedimientos para el muestreo de suelos, plantas y aguas e interpretación en cultivos tropicales. ISPROTAB y Colegio de Postgraduados. Tabasco, México.
- Sandoval, J.J. y L.M. Martínez, 1995.** Clasificación de tierras para el manejo del suelo y agua en la subcuenca de Cuzamala, Sierra Manantlan, Jalisco. *Terra*, 13(3): 216-230.
- Sanford, R. L. and E. Cuevas, 1996.** Root growth and rhizosphere interactions in tropical forests. In: Tropical forest Plant Ecophysiology. (Editores Mulkey S. S.; Chazdon R. L. And Smith a. P.). Chapman & Hall, International Thomson Publishing Company, New York. Chapter 10. pp. 268-300.
- Sanginga, N., 1996.** Nitrogen fixation by trees and the contribution to the nitrogen status of soil on associated crops. In: Amazonian Deforestation and Climate. (Editors Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M. and Victoria, R. L.). John Wiley and Sons. pp. 14-32.
- SARH, 1988.** Primera revisión Científica Forestal y Agropecuario. Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Yucatán. 17 y 19 de Oct. 1988.
- Scholes, M. C., M. J. Swift, O. W. Heal, P. A. Sánchez and J. S. Y. Ingram, 1994.** Soil fertility research in response to the demand for sustainability. In: The Biological Management of Tropical Soil Fertility. (Editores Woomer, P. L. and Swift, M J.). A Wiley-Say Publication. United Kingdom. pp. 1-14.
- Toledo, V., 2000.** Indigenous knowledge on soils: an ethnoecological conceptualization. En: Ethnopedology in a worldwide perspectives: an annotated bibliography. N. Barrera-Bassols y J. A. Zinck. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science. Enschede, The Netherlands.
- Weisbach, C., H. Tiessen, J. Jiménez-Osornio, 2002.** Soil fertility during shifting cultivation in the tropical karst soils of Yucatán. *Agronomie*, 2: 253-263.
- Williams-Linera, G. and J. Tolome, 1996.** Litterfall, temperate and tropical dominant trees and climate in a Mexican lower montane forest. *Biotropica*. 28(4b): 649-656.
- WRB, 1998.** Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. FAO-SICS-ISRIC, Rome, Italy.
- Young, A., 1989.** Agroforestry for Soil Conservation. ICRAF. Science and Practice of Agroforestry 4. CAB International. pp. 276.
- Young, A., 1995.** 10 hypothesis for soil agroforestry research. Agroforestería para el Ecodesarrollo. IV Curso internacional de Entrenamiento. 4-23 de septiembre de 1995. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad de Chapingo, México. (1): 123-126.

INVENTARIO DE PLANTAS FORRAJERAS UTILIZADAS POR LOS MAYAS EN LOS PAISAJES GEOMORFOLÓGICOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Salvador Flores¹ y Francisco Bautista²

¹Departamento de Botánica, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán

²Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en 27 comunidades mayas de la Península de Yucatán, como parte del programa Etnoflora Yucatanense de la Universidad Autónoma de Yucatán. El objetivo fue la obtención de la información de las plantas utilizadas como forrajeras. Se colectaron muestras de las especies forrajeras, se tomó toda la información florística y etnobotánica. En las comunidades mayas se utilizan, 191 especies de las cuales 139 son herbáceas, 17 arbustos, 35 árboles y dos palmas. Son consumidas tanto por ganado bovino, porcino, equino y caprino así como por aves de corral (pavos, gallinas, patos y palomas). Las plantas forrajeras nativas constituyen una alternativa para el desarrollo agropecuario en las comunidades rurales, así como para la región ganadera peninsular.

ABSTRACT

The work was carried out in 27 Mayan communities of the Yucatan Peninsula as a part of "Etnoflora Yucatanense" project of the Autonomous Yucatan University. The aim was to recuperate information about plants used as forage. Samples of forage plants were taken, with their floristic and ethnobotanic information. The Mayan communities used 191 species: 139 herbaceous, 17 shrubs, 35 trees and two palms. The plants are eaten by cows, pigs, horses, lambs, turkey, chickens, ducks and pigeons. The use of native forage plants are an agriculture option for rural communities and also for animal production in the Yucatan Peninsula.

INTRODUCCIÓN

La palabra forraje según la Real Academia (2001), se deriva del francés *fourage* que significa cualquier sustancia vegetal, excepto los granos, que sirven para alimentar animales. Font y Quer (1965) elaboraron un concepto más amplio al respecto, definiendo la palabra forraje como cualquier parte de una planta o la planta entera que sirve como alimento de animales, en este sentido, cualquier parte de la planta desde la flor hasta la raíz es una planta forrajera.

Este concepto es importante ya que la herbivoría estaría en este contexto, pues son animales los que efectúan este acto de gran valor en la circulación de energía en los ecosistemas vegetales; quedando así incluidos todas las plantas que son consumidas por animales herbívoros, incluyendo a las abejas que pecorean el néctar de las flores y que arrastran el polen y néctar de las mismas, siendo así un forraje importante en la apicultura.

En una forma más usual las plantas forrajeras han sido consideradas solo aquellas utilizadas para alimentar al ganado bovino, equino, caprino y porcino; sin embargo, Acosta *et al.* (1998) estudiando las plantas forrajeras en las comunidades mayas encontró que usan diversas plantas en la alimentación de sus animales de traspatio, los cuales provienen del huerto familiar, la milpa y el monte. Es por esto que se considera que la planta forrajera en la Península de Yucatán, es un recurso importante para el manejo de animales domésticos o de traspatio y para la sobrevivencia de las comunidades humanas de la región (Flores, 1999, 2001, y 2002).

En la Península de Yucatán existen tres grandes áreas dedicadas a la ganadería; 1) Oriente del estado de Yucatán sobre Leptosoles con problemas de profundidad efectiva, fertilidad, proliferación de arvenses, además de la precipitación errática y canícula impredecible; 2) En el su-

roeste de Campeche con Gleysoles que presentan serios problemas de drenaje interno; 3) En el suroeste de Quintana Roo con predominancia de Leptosoles, así como la presencia de Gleysoles y Vertisoles (Suelos pesados). En estas regiones la carga animal varía de 0.5 a 0.8 animales por hectárea en las tres zonas.

La ganadería extensiva por la conversión de selvas en pastizales artificiales, ha sido responsable de gran parte de la deforestación. La transformación gradual de bosques a pasturas y tierras agrícolas ha tenido profundos impactos ecológicos por el cambio de la composición de las especies de comunidades animales y vegetales, perturbando las funciones de los ecosistemas, alterando la estructura del hábitat, aislando y fragmentando hábitats naturales (Harvey, 2001).

El aumento de la productividad de la ganadería y la conservación de los ecosistemas son dos razones que alientan la búsqueda de nuevas formas de producción. Los sistemas silvopastoriles representan la posibilidad para mejorar la productividad y la estabilidad de los sistemas de los usos de la tierra, son sistemas que se caracterizan por su diversificación y beneficios económicos y ambientales ampliamente demostrados (Giraldo *et al.*, 1995); sin embargo, su establecimiento depende del conocimiento y manejo de suelos y plantas de cada localidad en los que se deseen implantar, ya que cuando se utilizan plantas exóticas y no se tienen en cuenta los suelos, las posibilidades de fracaso aumentan.

En este sentido, el objetivo de este trabajo es presentar un listado de plantas forrajeras de acuerdo al conocimiento de las comunidades mayas de la región, con el fin de que este conocimiento sirva de base para el diseño de sistemas de producción de forraje de menor afectación a los ecosistemas de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó al cabo en 27 comunidades mayas de la península de Yucatán (Fig. 1) durante el período de 1989 a 1999. Se realizaron 20 entrevistas por comunidad, lo cual hizo un total de 540 entrevistas. Los entrevistados fueron: adultos de más de 25 años; jóvenes de 10 a 25 años; y niños de 7 a 10 años (pastores).

Con base en una ficha de encuesta diseñada por el Programa Etnoflora Yucatanense (PEY) con la cual es posible explorar varios campos del uso de las plantas, como por ejemplo, su ciclo de vida con su forma de crecimiento reproducción, la parte de uso y su cosecha, la forma de uso y manejo, así como algunos datos de los entrevistados y sus ocupaciones. La ficha esta conformada por los siguientes campos: Nombres (con dos campos: maya y común en castellano), tipos de uso (35 campos), usos potenciales, parte usada (14 campos), en caso de ser de uso alimentario por humanos y animales se describe la forma de preparación (16 campos), evaluación de la información (cuatro campos), forma de reproducción (cinco

campos), periodo de floración (seis campos), periodo de caída de hojas (seis campos), grado de manejo (seis campos), tipo de manejo (siete campos), origen del material (11 campos), tipos de la fuente de información (nueve campos), localidad, municipio, estado, entrevistador, fecha y observaciones generales (BADEPY-INEREB, 1985).

La información se completa considerando la familia, el nombre científico, la forma de vida (tres campos), el animal que la consume (seis campos) y el pasiaje geomorfológico en el que se localiza la planta, de acuerdo con la comunidad en la que se realizó la entrevista (Fig. 1) (Bautista *et al.*, 2003).

Todas las plantas colectadas se depositaron en el herbario de la UADY. La información botánica se incluyó en la "Base de datos etnobotánicas de la Península de Yucatán" (BADEPY) de la Licenciatura en Biología, del Campus en ciencias biológicas y agropecuarias de la Universidad Autónoma de Yucatán.

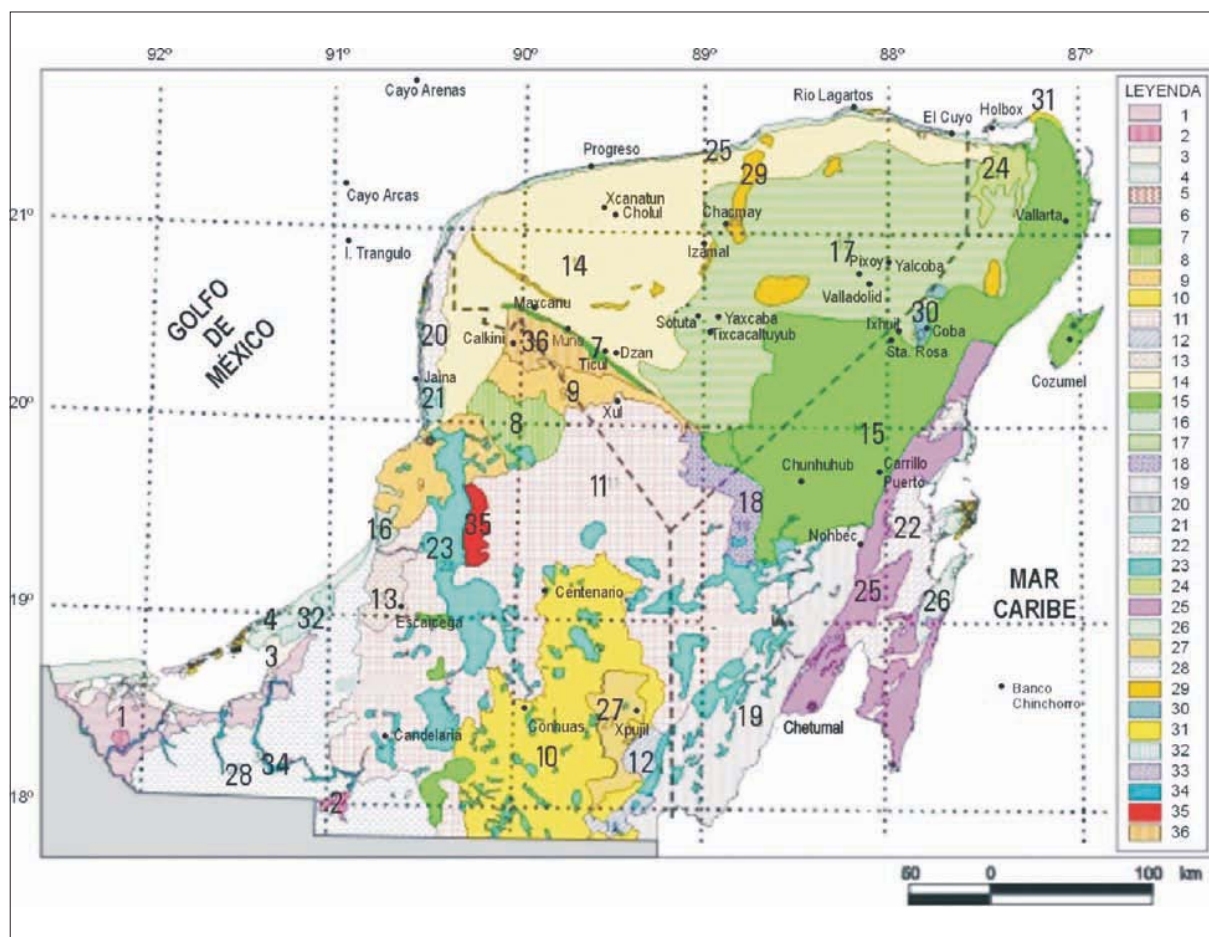


Figura 1. Paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán y localidades en las que se realizaron las encuestas etnobotánicas (Modificado de Bautista *et al.*, 2003)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Península de Yucatán, se usan como forraje 191 especies nativas, destacando las familias Leguminosae y Gramineae con 70 y 29 especies, respectivamente; seguidas de las familias Convolvulaceae (8 spp), Solanaceae (7 spp); y Compositae, Malphigaceae, Malvaceae y Nyctaginaceae con seis especies. Otras familias presentan menos de seis especies (Tabla 1).

Arellano (2003) calcula que la flora de la Península de Yucatán está constituida por 2200 especies, por lo que basados en este dato y en nuestros resultados, podemos decir que 8.6% son forrajeras y utilizadas por las comunidades mayas, especialmente para animales de traspato que incluyen: ganado equino, bovino, porcino y AC. Este resultado es importante ya que la cantidad de plantas forrajeras nativas usadas es diversa y abundante, corresponden principalmente a la familia Leguminosae con 70 especies, Gramíneas con 29; en segundo término a las familias Convolvulaceae con ocho, Malphigaceae con seis y Solanaceae con siete, Nyctaginaceae seis y Verbenaceae con cinco.

De las 191 especies, 139 son plantas herbáceas (72%); 17 arbustos (10%), 35 árboles (17%) y dos palmas (1%); este hecho es muy importante ya que el 72% de ellos son herbáceas y por lo tanto son de crecimiento rápido (anuales), lo cual potencialmente constituye un gran recurso para el desarrollo agropecuario, más si consideramos que la mayoría corresponden a la familia de las leguminosas, la cual según algunos autores como Standley (1937); Sousa *et al.* (1983); Sosa *et al.* (1985) y Flores *et al.* (1999), la consideran la más numerosa e importante de la flora Yucatanense.

De los árboles, arbustos y palmas que pueden ser utilizados en la alimentación animal, se puede aprovechar sus partes aéreas (tallo, hojas, yemas y flores); 33 son árboles que pueden tener además otros usos, como madera, leña, sombra, cercos vivos, medicinales, etc.

En estas últimas décadas las plantas forrajeras silvestres, están siendo tomadas muy en cuenta por instituciones que se dedican a estudios agropecuarios en el trópico:

Tabla 1. Lista de plantas forrajeras ordenadas alfabéticamente por familia con datos etnobotánicos y el grupo de animales que lo consume.

Especies	Nombre maya	Paisaje geomorfológico	Forma de vida	Parte usada	Animal
Amaranthaceae					
<i>Amaranthus dubius</i> Mart.	Chak te'es	7,8,11,14,15,16	H	Fl, Fr, Y	AC, E
<i>Amaranthus greggii</i> S. Watson	Te'es	11,14,15,16	H	Fl, Fr, Y	AC
<i>Amaranthus hybridus</i> L.	Te'es	7,8,11,14,15	H	Fl, Fr, Y	AC
<i>Amaranthus spinosus</i> L.	K'i'ixtes	9,10,11,13,14, 15,17	H	Fl, Fr, Y	AC
Araceae					
<i>Xanthosoma yucatanense</i> Engler	Kukut mak'al	16,17	H	T	P
Bromeliaceae					
<i>Ananas sativus</i> Schultes	Salbay	17	H	Fr	B
Burseraceae					
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg	Chaka'	1,2,3,4,5	A	Ho, Y	E, B, P
Caricaceae					
<i>Carica papaya</i> L.	Chich puut	1 a 25	A	T, Ho, Fr	E, B
<i>Jacaratia Mexicana</i> DC.	Puut ch'i'ich	14,15	A	T, Ho, Fr	E, B, P
Compositae					
<i>Calea urticifolia</i> (Miller.) DC.	Xikin	14,17	H	Ho, Y	C
<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsley) A. G.	Chak su'um	11,14,15,16,17	Ar	Ho	E, B
<i>Tithonia rotundifolia</i> (Miller.) Blake	Tsuum	14,17	Ar	Ho	E, B
<i>Viguiera dentata</i> (Cav.) Spreng	Thá	9,11,14 al 20	H	Ho	E
<i>Wedelia hispidula</i> HBK.	Sajum	14,17	H	Ho, Y	E
<i>Zexmenia hispida</i> (HBK.) A. Grey	Chacksink	14,17	H	Ho	C
Convolvulaceae					
<i>Ipomoea carnea</i> Jacq.	Chok' o kaat	25	H	Ho, Y	E, B
<i>Ipomoea crinita</i> S. Moore	Is ak'il	9,14,15,17	H	PA	E, B
<i>Ipomoea nil</i> (L.) Roth	Tso' ots k'abil	10,14,15,17	H	PA	E, B
<i>Ipomoea tricolor</i> Cav.	Uulum ja'	10,14,15,16	H	PA	P
<i>Merremia aegyptia</i> (L.) Urb.	Ka'ak	15,17	H	PA	E, B
<i>Merremia cissoides</i> (Lam) Hallier	K'i'ix lool aak	25	H	PA	P
<i>Quamoclit coccinea</i> (L.) Moench	Xkaal p'uul	9,11,14,17	H	PA	C, B
<i>Quamoclit hederifolia</i> (L.) G. Don.	Chak lool	14,15,17	H	Ho, Y	E, B
Cucurbitaceae					
<i>Cucurbita mixta</i> Pung.	Xka'	10,14,15,17	H	Fr	AC, E
<i>Cucurbita moschata</i> Duch.	K'uum	10,14,15	H	Fr	E, B
<i>Cucurbita pepo</i> L.	Ts'ol	9,11,14	H	Fr	AC
<i>Ibervillea millspaughii</i> (Cogn.) C.J.	Tu'ka'anil	10,11,14,17	H	H	C, E
Dioscoriaceae					
<i>Dioscorea floribunda</i> Marth & Gal.	Makal'k'uuch	11,14,15	H	Tu	E, P

Ar = Arbusto; A = Árbol; H = Hierba; P = Palma; Ho= Hoja, PA= Parte aérea; Fl= Flor; Fr= Fruto, T= Tallo, Y= Yema;
 S= Semilla; E= Equino= B= Bovino; P= Porcino= C= Cabra; Co= Conejo; AC= Aves de corral; FS= Fauna Silvestre;
 Ca= Canino; AD= Animales domésticos.



Tabla 1(Continuación). Lista de plantas forrajeras ordenadas alfabéticamente por familia con datos etnobotánicos y el grupo de animales que lo consume.

Especies	Nombre maya	Paisaje geomorfológico	Forma de vida	Parte usada	Animal
Gramineae					
<i>Saccharum officinarum</i> L.	*	7,11	H	T	E, P, B
<i>Panicum bartlettii</i> Swallen	*	14	H	Ho	E, C
<i>Sorghum bicolor</i> Moench	*	15	H	Ho, T	E, P, B
<i>Cenchrus brownii</i> Roem. & Schult	X'mul	14,15,16,17	H	PA	B
<i>Paspalum caespitosum</i> Flugge	*	11,14,17	H	PA	E, B
<i>Pennisetum ciliare</i> L. Link	*	11,14,17	H	PA	E, B
<i>Eragrostis ciliaris</i> (L.) Br.	Sak su'uk	11,14,17	H	Ho	E, B
<i>Digitaria ciliaris</i> (Petz.) Koel	*	11,14,17	H	Ho	E, B
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	K'an suk	11,14,17	H	PA	E, B
<i>Lasiacis divaricata</i> (L.) Hitch.	Siit	11,14,17,20	H	Ho	E, B, C
<i>Leptochloa domingensis</i> (Jacq) Trin	*	11 al 15	H	Ho	B
<i>Brachiaria fasciculata</i> (Swart.) P.	K'aan chiim	11 al 15	H	PA	E, B, P
<i>Gouinia guatemalensis</i> (Hack.) Swartz	Chak su'uk	11,14,15,17	H	Ho	E, B, C
<i>Sorghum halapense</i> (L.) Pers.	Ak'il su'uk	11,13,14,15,17	H	PA	E, B, P
<i>Panicum hirsutum</i> Swartz.	*	11, 13 al 17	H	PA	E, B, C
<i>Eleusine indica</i> L. Gearth.	Yook maas	10 al 16	H	Ho	E, B, AC
<i>Digitaria insularis</i> (L.) Mez	Nej boob	8	H	PA	E, B
<i>Panicum maximum</i> Jacq.	*	9 al 17	H	Ho	E, B, C
<i>Zea mays</i> L.	Naal	13 al 17	H	Completa	AC, E, B
<i>Paspalum notatum</i> Flugge	*	9 al 17	H	Completa	B, AC
<i>Cenchrus pilosus</i> H B & K.	Xmul	1,11,20,21	H	PA	B
<i>Pennisetum purpureum</i> Schumach	*	2,6,11	H	Ho,T	E, B
<i>Spartina spartinae</i> (Trin) Merr	Ko'axol ek'	2,6,11	H	PA	E, B
<i>Aristida ternipes</i> Cav	Chak su'uk	2,6,11	H	PA	B
<i>Panicum trichoides</i> Swartz.	*	2,6,11	H	PA	E, B
<i>Paspalum vaginatum</i> Sw.	*	9 al 14	H	Completa	E, B
<i>Chloris virgata</i> (L.) Beauv	Ne'ex nuxib	1 al 11	H	PA	E, B
<i>Leptochloa virgata</i> (L.) Beav	Chac zuuc	1 al 15	H	Ho	E, B, C
<i>Olyra yucatanica</i> Chase	Ya'ax tok	1 al 15	H	Ho	E, B, C
Iridiaceae					
<i>Cipura paludosa</i> Aublet.	Kukut ch' com	9,10,19	H	Bulbo	E, B
Labiatae					
<i>Ocimum micranthum</i> Willd.	Kakaltun	14 al 17	H	Ho	C
<i>Hyptis suaveolens</i> Pait	Cholte xnuuk	14 al 19	H	Ho	AC
Leguminosae					
<i>Aeschynomene americana</i> L.	Kabal pich	14 a 17	H	Ho	E, C, AC
<i>Mucuna andreana</i> Michelli.	Ich kejj	10 al 14	H	PA	B
<i>Centrochloa angustifolium</i> (H.B. & K.) Benth	*	14,16,17,27	H	PA	E, B, C
<i>Macroptilium atropurpureum</i> (S. & M.) U.	Bu'ul cho'	7,14,16,17	H	Ho	AC, B

* No se reportó nombre maya

Ar = Arbusto; A = Árbol; H = Hierba; P = Palma; Ho= Hoja, PA= Parte aérea; Fl= Flor; Fr= Fruto, T= Tallo, Y= Yema;
 S= Semilla; E= Equino= B= Bovino; P= Porcino= C= Cabra; Co= Conejo; AC= Aves de corral; FS= Fauna Silvestre;
 Ca= Canino; AD= Animales domésticos.

Tabla 1(Continuación). Lista de plantas forrajeras ordenadas alfabéticamente por familia con datos etnobotánicos y el grupo de animales que lo consume.

Especies	Nombre maya	Paisaje geomorfológico	Forma de vida	Parte usada	Animal
Leguminosae					
<i>Senna atomaria</i> (L.) I. & B.	Kaanlol	14,15,16,17	H	Ho, Y	E, B
<i>Calliandra belizensis</i>	Kabul	19,20	H	Ho, Y	B
<i>Cajanus bicolor</i> DC.	*	14	H	Ho, Fr	B
<i>Crotalaria cajanifolia</i> (H.B. & K)	*	14	H	Ho, Y	B
<i>Diphysa carthagenensis</i> Jacq.	Ka'an lol	14 al 17	A	Ho	E, B
<i>Tephrosia cinerea</i> (L.) Pers	Ix buul	14,15	H	T, Ho	P
<i>Acacia collinsii</i> Safford	Subin	14 al 17	Ar	H	E, B, C
<i>Swartzia cubensis</i> (B. & W.) Standley	K'attaal oox	15,16	A	Ho, Fr	B, P
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) G.	Piich	14 al 17	A	Fr	E, P
<i>Chamaecrista diphylla</i> (L.) Greene	Kaanlol xiw	14,15,16	H	Ho, Fr	B
<i>Desmodium distortum</i> (Aubl.) Mc.Briade	Kintaj	14 al 17	H	Ho	E, B
<i>Bauhinia divaricata</i> L.	Ps'unibtook'	9 al 14	Ar	Ho, Tr	P
<i>Vigna elegans</i> Piper	*	14	H	Ho, Fr	B, P
<i>Sesbania emerus</i> (Aubl.) Urban.	Kaanbal piich	10 al 14	Ar	Ho	P
<i>Canavalia ensiformis</i> L. (D. P)	*	14	H	Ho	B, P
<i>Pachyrhizus erosus</i> (L.) Urban.	Chiikam	14,15	H	PA	P
<i>Aeschynomene fascicularis</i> S. & S.	Kabal pich	14 al 17	H	Ho	E, B, C
<i>Nissolia fruticosa</i> Jacq.	Box ac	14,15	H	PA	E
<i>Centrosema galeotti</i> P.R. Frantz	Libcho'	14 al 17	H	PA	E, B, C
<i>Dalbergia glabra</i> (Miller.) Standley	Aj mukj	10, 14 al 17	Ar	PA	E, B
<i>Desmodium glabrum</i> (Miller) DC.	Kiinta	14,15,16	H	Ho	E, B, P
<i>Chamaecrista glandulosa</i> (L.) Urb.*	Misib kok	14,15	H	PA	E, B
<i>Sesbania grandiflora</i> (L.) Pers*	Pico flamenco	14,19	A	Ho	B, E
<i>Cracca greenmanii</i> Benth.	Chi'ikam t'u'ul	14,15,16	H	Ho	E, P
<i>Lonchocarpus guatemalensis</i> Benth.	Ja'abin	10 al 14	A	Ho	E, B
<i>Stylosanthes hamata</i> (L.) Kuntze	Chiichi bej	9,13	H	PA	E, B
<i>Bauhinia herrerae</i> (B & R) S. & S.	K'ibix	11,17	Ar	Ho	E
<i>Lonchocarpus hondurensis</i> Benth.	Ya'ax ja'abin	4,14,15,16	A	Ho	E, B
<i>Calliandra houstoniana</i> (Miller.) Standl.	Xa'ax	10	Ar	Fl y Ho	E, B
<i>Crotalaria incana</i> L.	K'iinil ooch	20,21,24,25	H	Ho, Y	E, B
<i>Desmodium incanum</i> DC.	K'iintaj	14,15	H	Ho	E, P
<i>Indigofera indica</i> L.	Cho'oy	14,20	H	PA	E
<i>Prosopis juliflora</i> DC.	Box ka'atsim	24,25	A	Ho	E
<i>Macroptilium lathyroides</i> (L.) Urban.	Bu'ul ch'o'	14	H	PA	
<i>Pasheolus lathyroides</i> L.	Bu'ul ch' o	14	H	PA y Fr	B, P
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) De Witt	Waaxin	9,10,14,15,17	A	H y Fr	AC, C, P
<i>Rhynchosia minima</i> (L.) DC.	Libch'o	14,15,17	H	PA	AC, E
<i>Chamaecrista nictitans</i> Moech.	Canlol xiw	14,15	H	PA	E, B
<i>Stylobium niveum</i> Kuntze	Xpiika bu'ul	14	H	Ho, T	E, B

* No se reportó nombre maya

Ar = Arbusto; A = Árbol; H = Hierba; P = Palma; Ho= Hoja, PA= Parte aérea; Fl= Flor; Fr= Fruto, T= Tallo, Y= Yema; S= Semilla; E= Equino= B= Bovino; P= Porcino= C= Cabra; Co= Conejo; AC= Aves de corral; FS= Fauna Silvestre; Ca= Canino; AD= Animales domésticos.



Tabla 1(Continuación). Lista de plantas forrajeras ordenadas alfabéticamente por familia con datos etnobotánicos y el grupo de animales que lo consume.

Especies	Nombre maya	Paisaje geomorfológico	Forma de vida	Parte usada	Animal
Leguminosae					
<i>Senna occidentalis</i> (L.) I. & B.	Bataban	9 al 14	H	Ho, Fr	E
<i>Senna pallida</i> (Vahl) I & B.	kaalol	14,15	H	Ho	B
<i>Cracca panamensis</i> Fydb.	Jak'che'	14,15	H	Ho	E, B, P
<i>Acacia pennatula</i> (Schlecht & Cham)	Chimay	9 al 17	A	Ho	B, C
<i>Centrosema plumieri</i> Benth.	Libcho'	14,15	H	PA	E, B, C
<i>Desmodium procumbens</i> (Mill.) Hitchc.	K'iintaj	14 al 16	H	PA	AD, E
<i>Stizolobium pruriens</i> (L.) Medic.	Chi'ikam	14 al 16	H	T, Ho	E, B
<i>Caesalpinia pulcherrima</i> G. Don.	Chak sikin	14	Ar	Ho, Fr	AC
<i>Crotalaria retusa</i> L.	*	9,11,12,13	H	PA	AC, B
<i>Acacia riparia</i> Bert. ex Spreng.	Yaax. katsin	9 al 17	Ar	Ho	E, B, C
<i>Lonchocarpus rugosus</i> Benth.	Choy che'	14	A	Ho	B
<i>Centrosema sagittatum</i> (H.B.K) T.S.B	Libcho'	14,15,16	H	PA	E, B
<i>Pithecellobium saman</i> (Jacq.) Benth.	algarroba	14	A	Fr	B, P
<i>Chaetocalyx scandens</i> (L.) Urban.	K'ayab yuk	9,10,12	H	Ho, T	E, Co
<i>Centrosema schottii</i> K. Schum.	Bu'ul beech'	14 al 16	H	PA	E, B, C
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Steud.	Sak ya'ab	14,15	A	Fr	AC
<i>Galactia striata</i> (Jacq.) Urb.	Bu'ul baach	14,15	H	PA	E, P
<i>Rhynchosia swartzii</i> (Vail.) Urban.	Mejen beech	14,15	H	PA	E, B, C
<i>Desmodium tortuosum</i> DC.	Bu'ul ka'aax	14,15	H	Ho	E
<i>Senna undulata</i> (Benth.) I. & B.	Bu'ul kaax	14,15	Ar	H	B, E
<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp.	Nux xpeelon	14	H	Ho, Fr	B, P
<i>Vigna vexillata</i> (L.) A. Rich	*	14	H	Ho, Fr	B, P
<i>Desmanthus virgatus</i> (L.) Willd.	Bu'ul ka'aax	14 al 16	H	PA	E, B, C
<i>Centrosema virginianum</i> (L.) Benth	Bu'ul ak'	9 al 15	H	Completa	P
<i>Chamaecrista yucatanensis</i> Britton & R.	Tamarindo xiw	14,12	H	Ho	E, P
<i>Rhynchosia yucatanensis</i> Grear	Libcho'	14,12	H	PA	E, Ca
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i> Pittier	Ba'al che'	14 al 16	A	Ho	B
Malpighiaceae					
<i>Byrsonima bucidaefolia</i> Standley	Sak paj	14,26	A	Fr	B, P
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) H.B. & K	Chi'	14 al 16	A	Fr	E, P
<i>Malpighia glabra</i> (L.)	Box'wayarkte'	14	Ar	Fr	E, P
<i>Bunchosia glandulosa</i> (Cav.) DC.	Siipche'	14,17	Ar	Ho, Fr	B, P
<i>Malpighia lundellii</i> Morton.	Wayakte'	17,19	Ar	Fr	P, E
<i>Malpighia punicifolia</i> L.	Uste'	14,17	Ar	Ho, Fr	E, B, FS
Malvaceae					
<i>Sida acuta</i> Burm.	Chichibej	9,11,10,14,25,17	H	PA	E
<i>Wissadula amplissima</i> (L.) Fries.	Sak xiw	13,9,10,14,15,17	H	PA	E, C
<i>Gayoides crispum</i> (L.) Small.	Sakte'	9,10,13,14,15	H	PA	E, C

* No se reportó nombre maya

Ar = Arbusto; A = Árbol; H = Hierba; P = Palma; Ho= Hoja, PA= Parte aérea; Fl= Flor; Fr= Fruto, T= Tallo, Y= Yema;
 S= Semilla; E= Equino= B= Bovino; P= Porcino= C= Cabra; Co= Conejo; AC= Aves de corral; FS= Fauna Silvestre;
 Ca= Canino; AD= Animales domésticos.

Tabla 1(Continuación). Lista de plantas forrajeras ordenadas alfabéticamente por familia con datos etnobotánicos y el grupo de animales que lo consume.

Especies	Nombre maya	Paisaje geomorfológico	Forma de vida	Parte usada	Animal
Malvaceae					
<i>Anoda cristata</i> (L.) Scheleht.	Sakte'	10,13,14,15	H	Ho	E
<i>Abutilon gaumeri</i> Standley	Kan jool	16,17	H	Ho	E
<i>Sida rhombifolia</i> L.	Chichib tux'	14 al 17	H	Ho	E, C
Moraceae					
<i>Brosimum alicastrum</i> Swartz.	Ox'	10,14,9,15,16	A	Ho, S, Fr	E y B
<i>Artocarpus communis</i> J.R. & G. F.	*	14	A	Fr	P
<i>Ficus cotinifolia</i> H. B. & K.	Ju'um	14-15-16-17	A	H0, Fr	E, B
<i>Ficus yucatanensis</i> Standley	Akum	14 al 16	A	Fr	P
Musaceae					
<i>Heliconia latispatha</i> Benth.	Platanillo	14,15	H	PA	E, B, P
<i>Musa paradisiaca</i> L.	*	14	H	T, Ho, Fr	E, B, P
<i>Musa sapientum</i> L.	*	14	H	T, Ho y Fr	E, B, P
Myrtaceae					
<i>Psidium guajava</i> L.	Pichi	14,15,17	A	Fr	P
Nyctaginaceae					
<i>Boerhavia caribaea</i> Jacq.	Chakil xiw	14,16,24	H	PA	P, AC
<i>Boerhavia coccinea</i> Miller	*	14,16	H	PA	P, AC
<i>Boerhavia erecta</i> L.	Sak xiw	14 al 17	H	PA	P, AC
<i>Mirabilis jalapa</i> L.	Tutsuy xiw	14,15	H	PA	P, AC
<i>Mirabilis violacea</i> (L.) Heimerl.	Pak'umpak	14,15	H	PA	P, AC
Olacaceae					
<i>Ximenia americana</i> L.	Napalche	9,10,11,14,15	H	PA	E
Orchidaceae					
<i>Oncidium ascendens</i> Lindl.	Ajoche'	10,11,12,14	H	Ho	E, B
<i>Catasetum integerrimum</i> Torr.	Chiit ku'uk	17,16	H	Ho	E
Oxalidaceae					
<i>Oxalis berlandieri</i> Torr.	*	14 al 16	H	PA	E, P
<i>Oxalis yucatanensis</i> (Rose) Standley.	Ch'oj chak'am	14,16	H	PA	E, P
Palmae					
<i>Bactris balanoidea</i> (Oerst.) Wendl.	Jawate'	26,19,27	P	Fr, S	E, P
<i>Sabal mexicana</i> Mart	Bon xa'an	11 al 14	P	Fr, S, Ho	E, P, B
Passifloraceae					
<i>Passiflora foetida</i> L.	Poch'il	14,16	H	PA	E, B
Piperaceae					
<i>Piper auritum</i> H.B. & K	Makulam	14,7,26	Ar	Ho	E, P
Polygonaceae					
<i>Neomillspaughia emarginata</i> (Grod.) B.	Sajiitsa'	14,17	Ar	Ho	E, B

* No se reportó nombre maya; Ar = Arbusto; A = Árbol; H = Hierba; P = Palma; Ho= Hoja, PA= Parte aérea; Fl= Flor; Fr= Fruto, T= Tallo, Y= Yema; S= Semilla; E= Equino= B= Bovino; P= Porcino= C= Cabra; Co= Conejo; AC= Aves de corral; FS= Fauna Silvestre; Ca= Canino; AD= Animales domésticos.



Tabla 1(Continuación). Lista de plantas forrajeras ordenadas alfabéticamente por familia con datos etnobotánicos y el grupo de animales que lo consume.

Especies	Nombre maya	Paisaje geomorfológico	Forma de vida	Parte usada	Animal
Portulacaceae					
<i>Portulaca halimoides</i> L.	Ts'ayoch	14,34	H	PA	P
<i>Portulaca oleracea</i> L.	Kabal'chunup	14,17,15	H	PA	AC
<i>Talinum triangulare</i> (Jacq.) Willd.	Xukul	14	H	PA	P
Rhamnaceae					
<i>Colubrina arborescens</i> (Mill.) Sarg.	Xlu'um che'	9-11-14-15	A	Ho	E, B
<i>Colubrina greggii</i> S. Watson	Box ooch	14,15	A	Ho	E, B
<i>Ziziphus yucatanensis</i> Stand.	*	10,14	A	Fr	P
Rubiaceae					
<i>Borreria ocimoides</i> (Burm) DC.	Sac sajum	14 al 16	H	Ho	C, E
<i>Borreria verticillata</i> (L.) Meyer	Sac sajum		H	Ho	C, E
Simaroubaceae					
<i>Simarouba glauca</i> DC.	Pa'asaak'	14 al 16	A	Ho, Fr	P
Solanaceae					
<i>Solanum americanum</i> Miller	Xtu'ja'abil	14,17	H	Fr	AC
<i>Solanum hirtum</i> Vahl.	Put balaam	10,14,15	H	Fr	E
<i>Solanum niidepannum</i> Dunal	Uukuch	10,15		Ho	AC, P
<i>Physalis pubescens</i> L.	Pajab kaan	14,15	H	PA	AC
<i>Solanum torvum</i> Swartz.	Che'eliik	14 al 16	H	Ho	E
<i>Solanum umbellatum</i> Miller	Uk'uche	14 al 16	H	Ho, Y	E
<i>Solanum verbascifolia</i> L.	Toom paap	14,15	H	Ho, Y	E
Sterculaceae					
<i>Waltheria americana</i> L.	Sak xiw	14,15,16,17,20	H	Ho	E, B, P
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Piixoy	14,15,17,26	A	Ho, Fl, Fr	B
Tiliaceae					
<i>Corchorus siliquosus</i> L.	Chi'ichibe	14	H	Ho	P
Ulmaceae					
<i>Trema micrantha</i> (L.) Blumer	Sak piixoy	10,14,15	A	Fr	AC
Verbenaceae					
<i>Callicarpa acuminata</i> H.B. & K	Puk'in	14,15	Ar	Ho	FS
<i>Lantana camara</i> L.	Ich cho'	14, 15, 16	H	Ho	E, B
<i>Vitex gaumeri</i> Greenman	Yax nilk	14 al 17	A	Ho, Fr	E, B, FS
<i>Duranta repens</i> L.	Jonbonil che'	14,15	Ar	Fr	E, B
<i>Petrea volubilis</i> L.	Oop tsiimin	14	H	Ho	E, B
Zygophyllaceae					
<i>Kallstroemia maxima</i> (L.) T & Gray	Xukul	14	Ar	PA	AC

* No se reportó nombre maya; Ar = Arbusto; A = Árbol; H = Hierba; P = Palma; Ho= Hoja, PA= Parte aérea; Fl= Flor; Fr= Fruto, T= Tallo, Y= Yema; S= Semilla; E= Equino= B= Bovino; P= Porcino= C= Cabra; Co= Conejo; AC= Aves de corral; FS= Fauna Silvestre; Ca= Canino; AD= Animales domésticos.

entre éstas, la National Academy of Science, y la National Research Council quienes han hecho estudios de este tipo en diversos lugares del trópico y las han registrado como importantes para el desarrollo agropecuario tropical (NAS, 1979) y (NRC, 1989).

Al comparar el aprovechamiento de las plantas forrajeras en las diferentes zonas productivas de la península de acuerdo al uso del suelo se encontró que la diversidad de las plantas usadas como forrajeras contrariamente de lo que debería ser no se da en el área ganadera (Oriente del Estado de Yucatán, parte central de Quintana Roo y suroeste de Campeche). Donde si bien se practica la ganadería extensiva e intensiva, solo se usan 6 ó 7 especies de pastos africanos tales como son: *Cynodon nlemfuensis* (pasto estrella), *Hyparrhenia rufa* (zacate paragua), *Panicum maximum* (Zacate guinea), *Pennisetum ciliare* (zacate buffel), *Pennisetum purpureum* (Zacate elefante), *Sorgum jalapense* (Zacate Jonson), *Stenoptarum secundatum* (Zacate San Agustín); los cuales sólo constituyen el 3.6% del total de plantas forrajeras encontradas. Esto difiere de la diversidad de plantas que se usan como forraje en la crianza de animales de traspatio, especialmente en la parte norcentral de la península que comprende parte de la zona henequenera, frutícola y milpera lo cual concuerda con autores como Barrera *et al* (1976), Acosta (1998), Herrera (1994), Sánchez (1993) y Flores (1999, 2001 y 2003), quienes han planteado que el conocimiento tradicional sobre el uso de las plantas y la diversidad de uso se concentra en las comunidades mayas de las zonas mencionadas.

Las cinco especies vegetales de mayor representación en los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán, utilizadas para el alimento de los animales domésticos fueron: *Carica papaya* L. (25), *Leptochloa virgata* (15), *Olyra yucatanensis* Chase (15), *Byrsonima bucidifolia* (13) y *Chloris virgata* (11).

En el paisaje geomorfológico denominado “planicie estructural baja denudativa” (14) que correspondiente al sistema de karst reciente, predominan suelos del grupo Leptosol que por sus características de baja profundidad efectiva, baja retención de humedad y escasa cantidad de tierra fina por las fases líticas y esqueléticas, constituyen restricciones extremas para el crecimiento vegetal (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003); sin embargo, en este paisaje geomorfológico se presentó la mayor cantidad de especies forrajeras, con 140 plantas, las cuales constituyen una oportunidad para el diseño de sistemas agroforestales en una de las condiciones más desfavorables para el cultivo al interior de la Península de Yucatán.

Dieciséis especies arbóreas más 11 especies de arbustos, pueden ser utilizadas en el diseño de sistemas silvopastoriles para la producción de forraje para bovinos, las especies arbóreas son: *Bursera simaruba*, *Jacaratia Mexicana*, *Diphysa carthagenensis*, *Swartzia cubensis*, *Sesbania grandiflora*, *Lonchocarpus guatemalensis*, *Lonchocarpus hondurensis*, *Acacia pennatula*, *Lonchocarpus rugosus*, *Lonchocarpus yucatanensis*, *Brosimum alicastrum*, *Ficus cotinifolia*, *Colubrina arborescens*, *Colubrina greggii*, *Guazuma ulmifolia* y *Vitex gaumeri*.

Los arbustos que son utilizados por las comunidades mayas para la alimentación de bovinos son: *Tithonia diversifolia*, *Tithonia rotundifolia*, *Acacia collinsii*, *Bauhinia divaricata*, *Dalbergia glabra*, *Calliandra houstoniana*, *Acacia*

riparia, *Senna undelata*, *Bunchosia glandulosa*, *Malpighia puniceifolia* y *Neomillspaughia emarginata*.

Actualmente ya están siendo utilizadas, en la producción de forraje para bovinos, *Brosimum alicastrum* y *Guazuma ulmifolia*, o al menos se conocen las propiedades químicas de *Bursera simaruba*, *Sesbania grandiflora*, *Lonchocarpus guatemalensis*, *Acacia pennatula*, (Ayala y Sandoval, 1995; Solorio y Solorio, 2002). Otras especies como *Lysiloma latisiliquum*, *Gliricidia sepium* y *Acacia gaumeri* también presentan cualidades químicas para ser utilizadas como forraje (Mizrahi *et al.*, 1998; Llamas *et al.*, 2003).

En el caso de la producción porcina, las especies arbóreas de uso potencial para la cría de cerdos son: *Bursera simaruba*, *Jacaratia Mexicana* y *Swartzia cubensis*. *B. simaruba* presenta valores de importancia ecológica altos en barbechos de 12 y 26 años. *Bauhinia divaricata*, *Bunchosia glandulosa*, *Sesbania emerus* y *Piper auritum* son cuatro arbustos que son consumidos por el ganado porcino. Las dos primeras se encuentran en la vegetación natural, en los barbechos de mayores de 12 años y se presentan con valores de importancia ecológica altos (Mizrahi *et al.*, 1997).

Considerando que el Estado de Yucatán es el cuarto productor de carne de cerdo en el país y que el alimento para la cría de los mismos se importa, esta información podría ser utilizada para la elaboración de suplementos alimenticios con base en las especies mencionadas.

En cuanto a las especies herbáceas existe una gran cantidad que es utilizada por los mayas para la alimentación de sus animales, lo cual constituye una gran oportunidad de investigación en cuanto a las características químicas, físicas y biológicas, además de estudios sobre la asimilación del alimento por los animales y sus características agronómicas. Sin embargo, la mayoría de ellas se encuentran durante la época de lluvias, cuando el forraje abunda. Las oportunidades de estudio estriban en la conservación de la calidad del forraje de las especies herbáceas.

Por otro lado, en la Península de Yucatán se encuentran suelos muy heterogéneos (Bautista *et al.*, 2002), por lo que también es importante conocer tanto las características de los suelos, así como su distribución, para diseñar correctamente un manejo agropecuario de las plantas forrajeras por paisajes geomorfológicos.

El manejo de las selvas para el establecimiento de sistemas silvopastoriles permitirá reducir el costo de establecimiento y mantenimiento de la actividad ganadera, da la posibilidad de mejorar la dieta de las familias campesinas al tener acceso a alimentos de origen animal, principalmente leche y sus derivados.

Este estudio es un ejemplo de que la inclusión del conocimiento de los campesinos-productores es de suma importancia en la generación de propuestas de uso de los recursos naturales. Este conocimiento debe ser considerado como una opción en los nuevos programas agropecuarios de la región, especialmente en el área ganadera, en donde en los potreros no sólo no se usan estas plantas sino que se están destruyendo.



CONCLUSIÓN

En la Península de Yucatán los campesinos mayas manejan 191 especies forrajeras, siendo leguminosas y gramíneas las principales familias, con 70 y 29 especies, respectivamente. En segundo término las familias Convolvulaceae con 8, Malphigiaceae con seis y Solanaceae con siete, Nyctaginaceae seis y Verbenaceae con cinco especies.

Las especies forrajeras representan un gran potencial de uso para el mejoramiento de las actividades pecuarias en los diversos niveles de producción, desde campesinos hasta grandes ganaderos.

REFERENCIAS

- Acosta B., L. E., J. S. Flores, y A. Gómez-Pompa, 1998.** Uso y manejo de plantas forrajeras para la cría de animales dentro del solar en una comunidad maya en Yucatán. Fascículo No. 14. Etnoflora Yucatanense. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. UADY. 128 p.
- Arellano, R., J.S., J.S. Flores y J. Tun-Garrido, 2003.** Nomenclatura forma de vida, uso, manejo y distribución de las especies vegetales de la península de Yucatán. Fascículo No. 20. Etnoflora Yucatanense. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. UADY. 320 p..
- Ayala, A., y S. Sandoval, 1995.** Establecimiento y producción temprana de forraje de ramón (*Brosimum alicastrum* S.) en plantaciones a altas densidades en el norte de Yucatán, México. *Agroforestería de las Américas*, (7):10-21.
- BADEPY-INEREB, 1985.** Banco de datos etnobotánicos de la Península de Yucatán. INEREB. Veracruz, México.
- Barrera Marín, A., A. Barrera-Vazquez, y R. M. López-Franco, 1976.** Nomenclatura Etnobotánica Maya. Una interpretación Taxonómica. Colección científica 36 Etnología, Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D. F. 537 p.
- Bautista, F., E. Batllori-Sampedro, M. A. Ortiz-Pérez, G. Palacio-Aponte, y M. Castillo-González, 2005.** El medio físico en la Península de Yucatán I: origen del medio físico y su manejo por los mayas. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds). Caracterización y manejo de suelos. UAC-UADY. 282 p.
- Bautista, F., E. Batllori-Sampedro, M. A. Ortiz-Pérez, G. Palacio-Aponte, y M. Castillo-González, 2005.** El medio físico en la Península de Yucatán II: el conocimiento actual y su integración. En: Caracterización y manejo de suelos. En: F. Bautista y G. Palacio (Eds). Caracterización y manejo de suelos. UAC-UADY. 282p.
- Bautista, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro-Alberto, A. Manu, y R. Lozano, 2003.** Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra*, 21: 1-11.
- Flores, J. S., 1999.** Etnobotánica de las leguminosas de la Península de Yucatán: Uso y manejo entre los mayas. Tesis profesional para obtener el grado de doctor en ciencias (Biológicas). Facultad de Ciencias UNAM.
- Flores, J. S., 2001.** Leguminosae (Florística, Etnobotánica y Ecología). Fascículo No. 18. Etnoflora Yucatanense. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. UADY. 320p.
- Front y Quer P., 1965.** Diccionario de Botánica. Ediciones Península. S. a. Barcelona. 1244 p.
- Giraldo V., I. A., Botero, A. Saldarriaga, y P. David, 1995.** Efecto de tres densidades de árboles en el potencial forrajero de un sistema silvopastoril natural, en la región atlántica de Colombia. *Agroforestería de las Américas*, 8: 14-19.
- Harvey, C., 2001.** La conservación de la biodiversidad en sistemas silvopastoriles. Simposio Internacional sobre Sistemas Silvopastoriles y Segundo Congreso sobre Agroforestería y Producción de Ganado en América Latina, San José, Costa Rica, 2001. En: <http://www.lead.virtualcentre.org/es/ele/conferencia3/articulo2.htm>
- Herrera Castro, N. D., 1994.** Los huertos familiares mayas en el oriente de Yucatán. Fascículo. No. 9 de Etnoflora Yucatanense. Universidad Autónoma de Yucatán. 169 p.
- Llamas, E., J. Castillo, C. Sandoval, y F. Bautista, 2003.** Producción y calidad de follaje de árboles forrajeros establecidos en minas de cal abandonadas. Caracterización y manejo de suelos en la Península de Yucatán. EPOMEX-UADY. Campeche, México.
- Mizrahi, P.A., L. Ramírez, J. Castillo, y P. Pool, 1998.** Sheep food assessing the nutrient content of fodders trees in Yucatán, México. *Agroforestry today*, 10(4): 11:13.
- National Academic Science (NAS), 1979.** Tropical legumes: resources for the future national. Academic Science. Washington D. C.
- National Research Council (NRC), 1989.** Lost crops of the Incas. National Academy Press Washington D. C, USA.
- Real Academia de la Lengua, 2001.** El pequeño Larousse Ilustrado. Larousse. Barcelona. España.
- Sánchez González, C., 1993.** Uso y manejo de la leña en X-uilub, Yucatán. Etnoflora Yucatanense, Fascículo. No. 8. Universidad Autónoma de Yucatán. 117 p.
- Solorio, F., y B. Solorio, 2002.** Integrating fodder trees into animal production systems in the tropics. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 1(1): 1-11.
- Sosa, V., J. S. Fl, V. Rico Gray, R. Lira, y J. J. Ortiz, 1985.** Lista florística y sinonimia maya. Etnoflora Yucatanense Fascículo. No.1. INIREB, Xalapa, Veracruz, México.
- Sousa, M., y C. Cabrera, 1983.** Listado florístico de México II. Flora de Quintana Roo. Instituto de Biología, UNAM. México.
- Standley, P. C., 1937.** Flora of Yucatan, Field Museum of Natural History. USA.

LAS PERSPECTIVAS DE LAS UNIDADES DE PRODUCCIÓN CAMPESINAS TRADICIONALES EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN: UN ESTUDIO DE CASO

Heriberto E. Cuanalo¹ y Genovevo Ramírez²

¹*Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados, Unidad Mérida. IPN*

²*Campo Experimental Mocochá. INIFAP. Mocochá, Yuc.*

RESUMEN

La Península de Yucatán tiene una superficie cercana a 140 mil km² y una población de cerca de 4 millones de habitantes. La península ha sufrido profundos cambios durante los últimos años, la población se ha incrementado de una manera dramática, se han desmontado grandes áreas para plantar pastos y la reciente ejecución de las reformas neoliberales han originado una fuerte disminución del potencial de producción del campesino maya. En la península, las unidades de producción campesina constituyen más de 95% de un total de 170 000 unidades agropecuarias. Estas son aproximadamente 160 mil familias campesinas que comprenden más de 800 mil habitantes. La unidad campesina típica tiene una producción diversificada que proviene de ganadería de traspatio, un pequeño jardín con hortalizas y árboles frutales, y de 2 a 4 ha de milpa. La milpa es el área en donde se produce maíz (*Zea mays* L.), ibes (*Phaseolus lunatus* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y calabaza (*Cucurbita pepo* L.), en el sistema de roza- tumba- quema. En la actualidad las familias campesinas de Yucatán no están produciendo los alimentos suficientes para satisfacer sus requerimientos mínimos, por lo que el ingreso tiene que ser complementado con venta de mano de obra como jornaleros en las ciudades. Nuevas plagas y enfermedades han tenido un efecto adverso en la ganadería y en las hortalizas, los precios de las variedades locales han disminuido por la introducción de variedades mejoradas y, los rendimientos de la milpa han disminuido debido a la reducción del periodo de barbecho, del sistema roza- tumba- quema. Este escrito presenta los resultados, en términos financieros, obtenidos en solo una unidad de producción campesina en Hecelchakán, Campeche. Los resultados sugieren que si las unidades de producción campesinas diversificadas son innovadas correctamente, pueden producir los alimentos requeridos por las familias y, simultáneamente, generar empleos productivos e ingresos. Los resultados indicaron incrementos en la producción de maíz, ganadería de traspatio y frutales. Se encontró que en este caso, la unidad fue financieramente viable y alcanzó una producción sostenida, sin aparentemente alterar la organización social en la que se desarrolla.

ABSTRACT

The Yucatán Peninsula located in the Southeastern part of Mexico, has an area of about 140,000 km² and nearly 4 million inhabitants. The dramatic increase in population, the deforestation of large areas to establish pastures, and lately the implementation of neo-liberal economic reforms, have brought about a rapid decline of the production capabilities of the traditional Maya farmer. Traditional farms account for more than 95 % out of a total of about 170,000 agricultural production units in the peninsula. This translates into approximately 160,000 nuclear families, estimated to have over 800,000 people. The typical farm has a diversified production arising from small livestock holdings, a vegetable garden, an orchard, and 2 to 4 ha of "milpa". Milpa is the area where maize (*Zea mays* L.), lima beans (*Phaseolus lunatus* L.), beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and squash (*Cucurbita pepo* L.) are produced using shifting cultivation. Currently, the traditional farmer in Yucatan is not producing enough food for himself and his family. Farm income is complemented by off-farm income from jobs as laborers in the cities. New pests and diseases have had an adverse impact on livestock and vegetables, prices of local varieties have decreased due to the introduction of new varieties and the yields of milpa have been decreased because of the shortening of fallow periods in their shifting cultivation system. This paper presents in financial terms the results obtained only in one traditional farm in Hecelchakan, Campeche. These results suggest that if properly improved, a traditional farm can provide the basic food requirements for the farmers and their families, while increasing both productive activities and income. The results showed increases in the production of maize, livestock and fruits. It was found that in this case the improved traditional farming was financially sound, and had achieved a sustainable production with no noticeable disruption of its actual social organization.

INTRODUCCIÓN

La Península de Yucatán se localiza en el sureste de la República Mexicana, tiene una superficie cercana a 140 mil km² y una población de aproximadamente 4 millones de habitantes. De esta población, mas de 800 mil personas dependen de la producción lograda en las unidades de producción familiar campesina. La unidad campesina típica tiene una producción diversificada que proviene de la ganadería de traspasto, el huerto mixto o diversificado (con diferentes frutales, forestales, hortalizas y medicinales) y 2 a 4 hectáreas de milpa. La milpa es el área donde se produce maíz (*Zea mays*), ibes (*Phaseolus lunatus* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y calabaza (*Cucurbita pepo* L.), en el sistema de roza – tumba – quema (Hernández X, 1959).

La Península de Yucatán a sufrido grandes cambios durante los últimos años, la población se ha incrementado de manera dramática, se han desmontado grandes áreas para el establecimiento de pastos y una agricultura mecanizada, además de la reciente ejecución de las reformas neoliberales, en términos de una reducción a los subsidios (Baños, 1996) y nulo apoyo financiero al campo han originado una fuerte disminución del potencial de producción del campesino maya y que la actividad agrícola tienda a desaparecer. En la península de Yucatán las unidades de producción familiar campesina constituyen más del 95 % de un total de 174 mil unidades agropecuarias.

En la actualidad las familias campesinas de la Península de Yucatán no están produciendo los alimentos suficientes para satisfacer sus requerimientos mínimos, por lo que el ingreso tiene que ser complementado con la venta de mano de obra como jornalero en las ciudades. Además nuevas plagas y enfermedades afectan negativamente a la avicultura y a la ganadería en general, así como a las hortalizas, los precios de las variedades locales disminuyen por la introducción de variedades mejoradas y los rendimientos de la milpa disminuyen como resultado de la reducción del periodo de barbecho en el sistema roza-tumba-quema. Estos aspectos indudablemente tienen efectos negativos en la sustentabilidad de los recursos naturales y el desarrollo rural.

En la actualidad, las políticas del gobierno neoliberal tienden a favorecer los intereses de los grandes productores, los cuales se dedican principalmente a la actividad ganadera, eliminando grandes áreas de selva para establecer pastos. Los grandes productores son aproximadamente 5 mil y representan menos del 5 % de las unidades agropecuarias (Del Río, 1993). Este tipo de productores cada año quema las áreas de pastizales para regenerar los pastos y controlar plagas, con la consecuente disminución de la biodiversidad y el incremento de la desertificación. Estas unidades de producción son manejadas generalmente por capataces que son gente de confianza del dueño y son ellos quienes organizan la producción y trabajan la tierra, recibiendo a cambio un sueldo bajo. Una proporción importante de estos ranchos en la actualidad no se trabajan y están a la venta (Beltrán, 1958;1959)

La perspectiva no es optimista. Con la implementación del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) se baja el precio del maíz, disminuyendo a su vez los ingresos del pequeño productor a menos de la mitad de lo que obtenía anteriormente. Por otro lado la inmensa mayoría de los grandes productores de la península de Yucatán, cuyo principal interés de inversión esta en el comercio y la industria, no son los productores de los ranchos. La tendencia actual muestra que los productores agropecuarios tradicionales están cada vez más mas pobres y la alternativa que tienen es emigrar a las ciudades, donde ya de por sí los sectores industrial y servicios tiene sobreoferta de mano de obra. Tres características de los productores tradicionales deben resaltarse: a) su conocimiento se basa en la agricultura tradicional, b) no están capacitados para trabajar en la industria y los servicios y c) cuando encuentran empleo, generalmente se ven obligados a aceptar los trabajos mal pagados. Esta situación hace que los productores agrícolas tradicionales, cuando se ven obligados a emigrar a las ciudades, desempeñan los trabajos peor pagados, cuando los encuentran.

ANTECEDENTES

La investigación continua y sistemática agrícola y forestal se inició, en la península de Yucatán, en el decenio de los cincuenta con los trabajos de Beltrán (1958; 1959). En la obra: Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento, se describen y analizan las características y posibilidades de la producción agrícola y silvícola de esa zona. Más tarde comienza a examinarse el proceso de producción agrícola, así como sus principales limitantes, y en el decenio de los setenta se estudia la tecnología agrícola tradicional en varias partes de México, en especial Yucatán. Estos enfoques de investigación se contraponían a los que puso en boga la llamada revolución verde.

En la Península de Yucatán las investigaciones se basaron en el proyecto "Dinámica de la milpa" 1977 (Hernández *et al.*, 1995), cuyas características más relevantes, para efectos de este trabajo, son los siguientes:

1) La categoría básica de estudio fue la unidad de producción campesina en su conjunto y no la parcela, la ganadería de traspacio o el huerto mixto en forma desarticulada. Aunque la milpa constituía el eje central de la unidad, los otros componentes estaban íntimamente vinculados, incluyendo la venta estacional de mano de obra.

2) Las innovaciones tendrían que provenir del mejor entendimiento de los principios empíricos desarrollados por los productores mayas y no de otra región.

En este entorno se llevó a cabo el proyecto "Sistemas Modulares de Producción Agropecuaria y Forestal para la Península de Yucatán" el cual se realizó por parte del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de México y el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) de Canadá (Cuanalo, 1990a; 1990b). En el proyecto se pusieron en operación seis unidades de producción modelo de tipo experimental y el objetivo ha sido incorporar a las unida-

des agropecuarias y forestales los conocimientos y las tecnologías de producción disponibles, considerando las circunstancias tanto social, como económica, así como ambiental y de manejo actuales de la Península de Yucatán.

El proyecto somete a prueba de manera experimental, la viabilidad financiera de las microempresas campesinas tradicionales, de bajo nivel de inversión de la península de Yucatán a las cuales se les han incorporado nuevos componentes. Se tomaron como base los sistemas de producción tradicionales que han sido desarrollados empíricamente por miles de años, a los que se les incorporaron los últimos resultados de la investigaciones científicas, tratando de hacer rentable la sustentabilidad de la producción agrícola tradicional. En México el concepto de sustentabilidad tiene sus raíces en el conocimiento empírico y ancestral de la tecnología agrícola tradicional. Los avances más recientes son producto de ese saber y del mayor entendimiento de la lógica de producción de la economía campesina, al igual que de los principios de funcionamiento de los agroecosistemas tropicales, en especial en lo que atañe a la diversidad de especies y al uso de plantas perennes.

La aplicación de esos resultados para lograr la reconversión de la agricultura debería ser inmediata, especialmente en la Península de Yucatán, cuya producción agrícola tiene una rentabilidad muy baja, como se muestra en otros estudios. Con este objetivo también se incorporan algunos métodos de análisis recientes del Banco Mundial, a fin de evaluar la rentabilidad financiera de las unidades de producción diversificada.

A continuación, se presenta el prototipo de una microempresa campesina de producción diversificada en la región de Hecelchakán, Campeche, que es viable financieramente, socialmente aceptable y de producción sostenida.

METODOLOGÍA

Los productores tradicionales viven en comunidades rurales compactas. Una comunidad representativa fue seleccionada en cada una de las seis regiones (Cuanalo, 1991). El diseño de la microempresa de producción agropecuaria y forestal se basó en una unidad modelo que, a su vez surgió de la siguiente metodología: se seleccionó una comunidad representativa de productores, luego se identificaron las unidades de producción existentes, y por último se eligió, junto con los miembros de la comunidad, a una de las que tenían un nivel de inversión bajo, así como la evidencia del interés del productor por incorporar innovaciones a su unidad de producción. La unidad seleccionada se sometió a un detallado análisis de inversión, incluyendo a los sistemas de producción que maneja, los costos de los insumos y de la mano de obra, así como los precios de venta de los productos. Con esta información, más el conocimiento de las tecnologías disponibles, los investigadores y

el productor seleccionaron las inversiones y tecnologías más apropiadas.

Las innovaciones se formularon con base en un proyecto de inversión, que contempla un financiamiento proveniente de un préstamo proporcionado a los productores por el proyecto y con el asesoramiento de investigadores familiarizados con las tecnologías seleccionadas. El análisis financiero se realizó antes de instrumentar las innovaciones para prever, en la medida de lo posible, los requerimientos de mano de obra, el incremento de la producción y, sobre todo, la inversión requerida. El productor proporcionó la información relativa a los ingresos y costos rurales de los productos y de la mano de obra. Las innovaciones se analizaron con los productores, en especial los requerimientos de mano de obra y de capital, así como la viabilidad comercial de los productos y sus precios de mercado.

A cuatro años de la puesta en marcha del proyecto, los resultados de las inversiones en la formulación experimental de las innovaciones se presenta como proyecto de inversión con base en la metodología de "Análisis de Ingresos e Inversión" del Instituto de Desarrollo Económico del Banco Mundial (1984). Ésta comprende a todos los subsistemas de producción de la unidad. El análisis considera en primer lugar los recursos de tierra, cultivos perennes, ganado y mano de obra disponible; a partir de ahí se estiman los activos de la unidad de producción en términos de sus costos de oportunidad. Con base en los ingresos y

gastos obtenidos antes de las inversiones se estima una serie de indicadores de desempeño, como el valor neto de la producción, las ganancias de la unidad y el superávit o déficit.

Con los datos de producción, inversiones y rendimientos antes de la aplicación del proyecto se estimaron, los principales indicadores financieros solicitados por los bancos: tasa interna de rendimiento del capital, valor actualizado neto y relación costo/beneficio.

RESULTADOS

ANÁLISIS FINANCIERO

El prototipo de empresa campesina se presenta como un proyecto de inversión. Este se inicia con un inventario de la unidad de producción y de los subsistemas agrícolas, pecuarios y forestales, costos de mano de obra y otros, que desarrolla el productor. En la Tabla 1 se presentan sus principales características. Dispone de una dotación de tierra de 20 hectáreas, de las cuales cerca de cuatro tienen suelos profundos (tres hectáreas de riego y una de temporal) y las 16 restantes son tierras con roca caliza, que solo se utilizan para recolectar madera para construcción. La mano de obra disponible esta formada por el productor y su padre, la esposa y tres niños menores de 8 años.

Los datos de producción de la finca antes y después de las innovaciones se presentan en la Tabla 2. El análisis de inversión es de once años; en el primero se realizan las inversiones y a partir del segundo se inician los incrementos de producción. La Tabla 2 muestra que la producción sin proyecto es insuficiente para atender las necesidades fundamentales de alimentación de la familia, siendo esta la razón por la cual una gran proporción de los productores emigran en la época de secas buscando empleo e ingresos en otro lugar. En el segundo año y después de hechas las inversiones, la producción y la rentabilidad empiezan a crecer. Nótese que a partir del segundo año el hijo no tiene que buscar empleo fuera de la unidad de producción.

El proyecto de inversión prevé básicamente el incremento de la cosecha de maíz de grano a partir del primer año y después del segundo el uso de los excedentes para alimentar dos cerdas y dos vaquillas para venta de carne y leche en el mercado local. La producción de algunos frutales anuales a partir del segundo año como el plátano y papaya y perennes como cítricos, mango, mamey y chicozapote entre otros a partir del quinto año.

Las proyecciones del flujo de caja de la microempresa y sus indicadores financieros se presentan en la Tabla 3.

Estos indicadores altamente satisfactorios para el desarrollo del proyecto. Así con un financiamiento de alrededor de seis mil pesos y un periodo de gracia de tres años,

Tabla 1. Antecedentes de la Unidad de Producción Hecelchakán, Campeche.

Concepto	Cantidad
Utilización de la tierra (ha)	19.52
Ciclo P-V (ha)	2.04
Maíz (ha)	2.00
Cacahuete (ha)	0.04
Ciclo O-I (ha)	1.08
Maíz (ha)	0.04
Tomate (ha)	1.00
Otras hortalizas (ha)	0.04
Perennes (ha)	16.40
Frutales (ha)	1.40
Forestales (ha)	15.00
Inventario Pecuário	22
Cerdos (núm.)	2
Lechones (núm.)	7
Aves de corral (núm.)	13
Mano de obra (Jornales)	703.00
Agricultor (Jornales)	300.00
Hijo (Jornales)	300.00
Contratada (Jornales)	103.00
Capital de la finca	
Activo	13,929.00
Tierra acahual	1,600.00
Tierra agrícola	5,530.00
Edificios	3,000.00
Equipo	1,156.00
Ganado	770.00
Inventarios	1,873.00
Pasivos	2,305.00
Préstamo Bancario	1,133.00
Préstamo de la SDR	1,172.00
Activo Neto	11,642.00

P-V= Primavera y Verano.

O-I = Otoño e Invierno.

SDR = Secretaría de Desarrollo Rural del Gob. de Campeche.



Tabla 2. Producción del desarrollo de la Unidad de Producción en Hecelchakán, Campeche

Concepto	Sin Proyecto	Con Proyecto				
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5 a 11
Ventas	1365	1365	3070	5840	10460	17600
Maíz en grano	715	715	1430	0	0	0
Maíz en elote	0	0	0	0	1000	1000
Frutales	80	80	80	2400	2400	6400
Hortalizas	320	320	1040	1040	1040	1040
Lechones	250	250	400	0	2000	3000
Cerdos engorda	0	0	120	1600	800	800
Becerras	0	0	0	800	1600	3200
Leche	0	0	0	0	1620	2160
Autoconsumo	2040	2040	4234	6235	6235	6235
Maíz en grano	1430	1430	2324	3595	3595	3595
Maíz en elote	50	50	50	50	50	50
Frutales	40	40	40	80	80	80
Hortalizas	40	40	160	160	160	160
Lechones	100	100	200	100	100	100
Cerdos engorda	200	200	200	200	200	200
Leche	0	0	1080	1620	1620	1620
Aves	130	130	130	330	330	330
Huevo	50	50	50	100	100	100
Ingresos externos	4500	4500				
Inversiones	0	5896	0	0	0	0
Injertos	0	384	0	0	0	0
Hijuelos	0	192	0	0	0	0
Vacas	0	3000	0	0	0	0
Cerdos mejorados	0	520	0	0	0	0
Molino de grano	0	900	0	0	0	0
Construcciones	0	900	0	0	0	0
Costos de Operación	4608	4608	6791	9215	13409	13409
Maíz* TMF Es. P-V	2256	2256	1106	0	0	0
Maíz TMF Mc. P-V	0	0	1477	1477	1477	1477
Maíz BMF Mc. O-I	0	0	852	2556	2556	2556
Maíz BMF Mc. P-V	0	0	0	0	1584	1584
Hortalizas	1008	1008	480	1488	1696	1696
Gallinas	377	377	377	957	957	957
Cerdos	967	967	1633	1451	3230	3230
Bovinos	0	0	966	1286	1909	1909

*T= Temporal; M=Semilla mejorada; F=Fertilizante químico; B=Riego de bombeo; Es=Espeque; Mc=Mecanizado; P-V=Ciclo Primavera-Verano; O-I=Ciclo Otoño-Invierno.

Tabla 3. Poyección del flujo de caja de la Unidad de Producción en Hecelchakán, Campeche.

Concepto	Sin Proyecto	Con Proyecto					
		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5 a 11	Año 11
Entradas	3405	3405	5644	12075	16695	23835	30134
Ventas	1365	1365	3070	5840	10460	17600	17600
Autoconsumo	2040	2040	2574	6235	6235	6235	6235
Valor Residual	0	0	0	0	0	0	6299
Salidas	4608	11377	7760	9205	13409	13409	13409
Inversiones	0	5896	0	0	0	0	0
Capital incremental	0	873	970	0	0	0	0
Costos de operación	4608	4608	6791	9205	13409	13409	13409
Beneficio Neto ADF							
Total	(1203)*	(7972)	(2177)	2860	3286	10426	16724
Incremental		(6769)	(913)	4063	4489	11629	17925
Indicadores Financieros*	TIR = 59.78 % VAN = 19304 REL. B/C = 1.64						
Financiamiento	0	5590	1961	0	0	0	0
Prestamos recibidos	0	5590	1961	0	0	0	0
Refaccionario	0	4717	0	0	0	0	0
Avío	0	873	1961	0	0	0	0
Servicio de deuda		0	1404	3757	1404	1404	1404
Refaccionario		0	0	1404	1404	1404	1404
Avío		0	1404	2353	0	0	0
Beneficio Neto DDF							
Total	(1023)	(2382)	(1203)	(897)	1882	9022	15720
Incremental	0	(1179)	0	306	3085	10225	16523
Indicadores Financieros	TIR = 118.80 % VAN = 1 9304 REL. B/C = 1.54						

* Parentesis indican valor negativo

ADF= Antes del financiamiento; DDF= Despues del financiamiento; TIR=Tasa Interna de Rendimiento del Capital;

VAN=Valor Actualizado Neto; REL. B/C= Relación Costo/Beneficio

se tiene una tasa interna de rendimiento de capital de 118 %, un Valor Actualizado Neto de 19 mil pesos y una relación costo/beneficio de 1.54.

LAS INNOVACIONES

Las principales innovaciones en la unidad de producción campesina son:

Milpa. La producción de maíz se ha innovado en varios aspectos: empleo más eficaz de herbicidas para controlar las plantas arvenses y los rebrotes de tocones y

raíces; fertilización química para incrementar los nutrientes de los suelos, y uso de variedades mejoradas para elevar la producción (Estrada y Morales 1990; Acosta *et al.*, 1990a; 1990b). Las innovaciones del componente milpa más que duplicar su productividad, lo que ha permitido es disponer de excedentes de maíz para atender la ganadería de traspatio.

Ganadería de traspatio. La producción de porcinos y bovinos se innovó mediante la construcción de instalaciones rústicas; la introducción de razas menos rústicas, con mayor potencial de producción; el empleo de vacunas y otros medicamentos para prevenir la alta mortandad de este tipo de ganado, y el empleo de complementos alimenticios con mayor contenido pro-



teínico. Las innovaciones del componente ganadería de traspatio han disminuido la mortandad y más que duplicado la productividad al hacer más efectiva la mano de obra de la esposa y los hijos.

Hortalizas, frutales y maderables de traspatio. La producción de traspatio se intensificó de modo considerable gracias a que se dispone de agua para riego y de la mano de obra familiar. Las innovaciones en las hortalizas comprenden la construcción de eras (espacios de tierra limpia y firme) y siembras de productos menores como cilantro (*Petroselinum hortenses* Hoffm.), colinabo (*Brasica rapa* L.), calabaza (*Cucurbita angiosperma* Hort.), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.). También se han empleado varios plaguici-

das, sin embargo no se ha logrado acabar con la mosquita blanca, transmisora del complejo viral denominado "chino". Los frutales se han innovado mediante injertos y empleando algunos agroquímicos para el control de plagas y enfermedades, así como plantando especies que tienen diferentes períodos para su cosecha. Los maderables se emplean como linderos de parcelas y cortinas rompevientos o se plantan en suelos muy pedregosos.

Sobre estas bases se ha sistematizado el desarrollo de nuevos huertos, reordenándose los existentes. Las innovaciones en el componente hortalizas, frutales y maderables de traspatio también muestra un incremento considerable de productividad gracias al empleo de la mano de obra familiar.

DISCUSIÓN

Los componentes milpa y ganadería y cultivos de traspatio muestran un alto incremento de producción y productividad. Esto obedece al empleo de la mano de obra familiar campesina, al financiamiento para la compra de ganado, equipo y agroquímicos, así como a la construcción de corrales y zahúrdas rústicas.

De las unidades de producción de la Península de Yucatán, 85% son campesinas tradicionales, esto es, en 80 000 de ellas obtienen su sustento y trabajo cerca de 400 000 mexicanos (alrededor de 35% de la población de esa zona).

Matus y Puente (1992, 1993) han mostrado que el potencial de producción y la rentabilidad de la agricultura de la Península de Yucatán tienen desventajas en comparación con otras regiones del país. Sin embargo, si esos resultados se analizan desde el punto de vista de las unidades de producción diversificada —que son la generalidad—, se concluye que la producción agropecuaria y forestal puede ser rentable, con la ventaja de ser socialmente

aceptable y sobre todo de producción sostenida. Ello es así porque la interacción de los cultivos con la producción pecuaria y forestal estabiliza la producción y ésta, lo mismo que el trabajo, se distribuye durante todo el año.

La reconversión de la agricultura de la Península de Yucatán se llevará a cabo en un entorno de venta de parcelas y de una acelerada migración de familias campesinas a las ciudades. Una gran cantidad de problemas de empleo, saturación de los servicios de las ciudades, y sobre todo, de sufrimiento de población campesina pueden evitarse con las innovaciones. Sólo se precisa que a una parte importante de las unidades de producción campesina se le brinde la oportunidad de transformarse en microempresas agropecuarias y forestales mediante inversiones, vía préstamos, del orden de los 6 000 a 8 000 pesos, además de un programa de capacitación intensa para el productor y sus familias así como el compromiso de desarrollar una gran cantidad de trabajo familiar.

CONCLUSIÓN

Los resultados experimentales muestran que las innovaciones, las inversiones y la asesoría pueden dotar de viabilidad financiera a las unidades de producción

agropecuarias y forestales, convirtiéndose así en verdaderas microempresas campesinas, financieramente rentables, socialmente viables y de producción sostenida.

REFERENCIAS

Acosta D., E., S. J. Rodríguez, G. D. Reyes, y P. H. Torres, 1990a. Guía para producir maíz y frijol de relevo en suelos Chac-luum en Yucatán, SARH-INIFAP, CIFAP-Yucatán-CE, Uxmal, Yucatán, 17 p.

Acosta D., E., P. H. Torres, G. D. Reyes, y S. J. Rodríguez, 1990b. Como sembrar los maíces V-527, V-528 y V-532 en los suelos Chac-Luum y K'ankab de la milpa caña en Yucatán, SARH-INIFAP-CIFAP Yucatán-CE, Uxmal, Yucatán. 1 p.

Banco Mundial, 1984. Análisis de Ingresos de Inversión. Instituto de Desarrollo Económico.

Baños R. O., 1996. Neoliberalismo, Organización y Subsistencia Rural. El caso de la Zona Henequenera de Yucatán. 1980 – 1992. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yuc. 244 p.

Beltrán, E. (ed.), 1958. Los Recursos Naturales del Sureste y su Aprovechamiento. Instituto Mexicano de Recursos Naturales. México, D. F. Vol. 2. 326 p.

Beltrán, E. (ed.), 1959. Los Recursos Naturales del Sureste y su Aprovechamiento. Instituto Mexicano de Recursos Naturales. México, D. F. Vol. 1, 2 y 3

Cuanalo de la C., H. E., 1990a. Proyecto de Investigación "Sistemas Modulares de Producción para la Península de Yucatán. SARH. INIFAP. CIFAP-Campeche. pp. 1-26.

Cuanalo de la C., H. E., 1990b. Proyecto Sistemas Modulares de la Producción Agropecuaria y Forestal para la Península de Yucatán, Primer Informe Anual. Exp. Núm. 3-p-88-0287, SARH-INIFAP, Campeche, Camp. Inédito.

Cuanalo de la C., H. E., 1991. Proyecto Sistemas Modulares de la Producción Agropecuaria y Forestal para la Península de Yucatán, Segundo Informe Anual. Exp. Núm. 3-p-88-0287, SARH-INIFAP, Campeche, Camp. Inédito.

Del Río P. J., 1993. El impacto del Tratado de Libre Comercio en el Sector Agropecuario de Yucatán. En: C. A. Rodríguez y T. J. Flores, (eds.). Memorias del Foro: La Agricultura de Yucatán ante el Tratado de Libre Comercio. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. pp. 47-53.

Estrada V., E., y A. Morales L., 1990. Efecto de los sistemas de labranza en la producción de maíz de temporal en suelos rojos de Campeche. Segunda Reunión Científica Forestal y Agropecuaria. CIFAP-Campeche. Campeche, Camp. p. 176.

Hernández X, E., 1959. La agricultura en la Península de Yucatán. En: E. Beltrán (ed.). Los Recursos Naturales del Sureste y su Aprovechamiento. Vol. 3. Instituto Mexicano de Recursos Naturales. México, D. F. pp. 3-57.

Hernández X, E., y R. A. Ramos, 1977. Metodología para el estudio de agroecosistemas con persistencia de tecnología agrícola tradicional. En: X. E. Hernández (ed.). Agroecosistemas de México: Contribuciones a la Enseñanza, Investigación y Divulgación. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Edo. de México. pp. 321 – 333.

Hernández X, E., T. S. Levy, y B.E. Bello, (eds.), 1995. La roza – tumba – quema en Yucatán. En: La Milpa en Yucatán: Un Sistema de Producción Tradicional. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México. pp. 35 – 86.

Matus G., J.A. y A. Pente G., (Coordinadores), 1992-1993. Análisis Estatales de los Efectos de la Política Económica y Bases de la Estrategia para la Conversión de la Agricultura. Estados de Yucatán, Campeche y Q. Roo. Reportes no publicados. Secretaría de Agricultura-Dirección General de Política Agrícola. Colegio de Postgraduados-Centro de Economía. Varios volúmenes.

Ramírez J. G., y M., F. J. Gallegos, 1990. Análisis Financiero del Módulo Cultivo Consecutivo – Ganadería de Traspasío en D'zitnup, Camp. Segunda Reunión Científica Forestal y Agropecuaria. CIFAP-Campeche. Campeche, Camp. p. 195.

Shaefer Kehnert, W., 1981. Metodología de Análisis de los Inversiones en Explotaciones Agrícolas. Materiales de Capacitación del Instituto de Desarrollo Económico. Banco Mundial. Washington, D. C. USA. pp. 1-31.

DINÁMICA DE LA CALIDAD DEL SUELO DE LA MILPA CON EL USO DE LEGUMINOSAS COMO CULTIVOS DE COBERTERA

Manuel Amaya¹, Francisco Bautista² y José Castillo²

**¹Maestría en Ciencias en Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales,
FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán**

**²Departamento de manejo y conservación de recursos naturales tropicales,
FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán**

RESUMEN

La causa de la baja producción de maíz en el sistema de roza-tumba-quema aun no está debidamente identificada, así como tampoco lo está la disminución de la misma cuando se cultiva por un mayor tiempo en el mismo sitio. Se ha propuesto que existe una disminución de la fertilidad del suelo y que la proliferación de arvenses influyen en la disminución de la productividad. Ante este problema agronómico, la introducción de leguminosas de cobertera al sistema de producción de maíz, es una opción que puede elevar la fertilidad de los suelos, para lo cual es necesario evaluar el impacto de cada especie de leguminosa sobre la fertilidad y calidad de los suelos. El objetivo del trabajo fue identificar la leguminosa con mayor capacidad para aumentar tanto la calidad del suelo como del maíz, a través de: 1) Cambios en la calidad del suelo y del maíz y el reciclaje de nutrimentos en una estación agrícola; y 2) La dinámica de la evolución de CO₂ y mineralización potencial anaerobia de N (MPAN) utilizados como indicadores de la calidad del suelo (ICS) durante un año. El experimento se desarrolló en un Luvisol ródico (LVro) y un Leptosol réndzico (LPrz), bajo un diseño de bloques al azar; se incluyeron cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Luego de un ciclo de cultivo, la asociación maíz/mucuna (*Mucuna deeringiana*) aumentó la calidad del suelo (relación C/N 14.3). Las leguminosas utilizadas no aumentaron el contenido nutrimental del grano de maíz (N, P y K); la asociación maíz/ib grande recicló la mayor cantidad de nutrimentos al sistema (27, 1.2 y 24.8 kg ha⁻¹ de N, P y K respectivamente). La mucuna aumentó la calidad del LVro debido a que permite una mayor mineralización del C y con esto un mayor reciclaje de nutrimentos, mientras que en el LPrz se tuvo la menor evolución de CO₂ evitando una pérdida mayor de C (materia orgánica), ayudando así a disminuir el tiempo de degradación del suelo (pérdida de la fertilidad). La MPAN muestra clara asincronía entre la mayor capacidad de suministrar N disponible para los cultivos (marzo) y la etapa de mayor demanda de parte de las plantas (julio) de cerca del 40% en ambos suelos.

ABSTRACT

The cause for low yield in maize crop in the slash and burn system is not identified yet, neither the decreasing of the yield when it is cultivated for a long time in the same place. It is been hypothesized that a decrease of the soil fertility is due to the weed competence for nutrients and this produces a decrease in productivity. As a solution to this agronomic problem, it is considered the introduction of legumes as cover crops into corn production systems as an option that could maintain or increase the soil fertility. For this, it is necessary evaluate the impact of each legume species on soil quality and fertility. The objective of this work was to identify the capacity of legumes to increase both soil and corn quality, using the: 1) Changes in soil and corn quality, and the recycling of nutrients in a cropping season, and 2) The dynamic of the soil CO₂ evolution and nitrogen anaerobic mineralization potential (MPAN) as indicators of soil quality (ISQ) in a season. The experiment was carried out on two types of soil: Rodic Luvisol (LVro) and rendzic Leptosol (LPrz) using randomized block design including five treatments and four replicates. After a cropping season the association corn/mucuna (*Mucuna deeringiana*) increased the soil quality (C/N 14.3). The nutrient content (N, P y K) of corn grain was not increased by the legumes, the corn/bean (*Phaseolus lunatus*) recycled the highest nutrient quantity into the system (27, 1.2 y 24.8 kg ha⁻¹ of N, P and K respectively). Mucuna increased the quality of LVro because it allowed a higher mineralization of C producing the nutrients cycle, but the LPrz had the lowest CO₂ evolution and at the same time can avoid a greater of C (organic matter) loss, helping to diminish the time for soil degradation (loss of fertility). The MPAN showed an asynchrony between the high capacity of N supply for crops and the stages of highest demand of plants of about 40% in both soils.

INTRODUCCIÓN

El sistema agrícola de roza, tumba y quema (r-t-q) es practicado a nivel mundial por alrededor de 300 millones de campesinos, en 36 millones de km², lo que representa más del 10% de la población humana y el 30% de los suelos cultivables en el mundo (Hernández-X *et al.*, 1995). En México se practica sobre una superficie de 5 millones de ha, de las cuales 500 mil están en cultivo y las restantes en descaso (Hernández-X *et al.*, 1995). En la Península de Yucatán se cultiva el maíz bajo este sistema, produciendo alimento para más de un millón de campesinos. En el estado de Yucatán, cada año se cultivan 170,000 ha bajo este sistema con rendimientos de 0.994 t ha⁻¹ durante el primer año de uso del terreno (INEGI, 2001).

Aún no se ha entendido por completo la causa de la baja producción de maíz y su disminución de un año a otro, pero se piensa que la abundancia de arvenses (Caamal-Maldonado *et al.*, 2001) y la disminución de la fertilidad del suelo son las causas principales (Mariaca, 1992; Tiessen *et al.*, 1992). Ante este problema agronómico, la introducción de leguminosas de cobertera al sistema, es una opción para mantener o aumentar la fertilidad del suelo, debido a que teóricamente las leguminosas tienen el potencial de fijar el N de la atmósfera, mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo, controlar la erosión, aumentar la actividad biológica del suelo, controlar las malezas y plagas del suelo y algunas tienen usos como alimento o forraje.

Las diversas especies de leguminosas que pueden ser utilizadas como cultivos de cobertera, deben ser evaluadas en cuanto a la competencia interespecífica, producción de biomasa, su papel en el reciclaje de nutrientes y en la calidad del suelo, entre otras cosas.

La utilización de leguminosas como cultivos de cobertera implica el mejoramiento de la calidad y el aumento de la cantidad de la materia orgánica del suelo (MOS) considerando que es un componente clave debido a su influen-

cia sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas que definen su productividad (Granatstein y Bezdicsek, 1992) y calidad (Doran y Parkin, 1994); sin embargo, no existen estudios de caso en la región en los que se evalúe la influencia de los cultivos de cobertera en la dinámica de la calidad del suelo, ni su participación en el reciclaje de nutrientes con un enfoque ecosistémico.

Los estudios tradicionales de fertilidad del suelo no han puesto atención a la dinámica de la MOS aún cuando el manejo de la fertilidad y de la calidad es de tipo biológico. Se requiere un mejor entendimiento de este fenómeno, utilizando indicadores de la calidad del suelo (ICS) relacionados con la actividad microbiológica que de manera indirecta arrojen datos sobre la calidad y cantidad de los aportes de hojarasca y sobre la pérdida de MOS.

La calidad del suelo es la capacidad del suelo de funcionar dentro de los límites de un ecosistema y sostener la productividad biológica, manteniendo la calidad del ambiente y promoviendo la salud de las plantas (Arshad y Coen, 1992; Doran y Parkin, 1994); para Karlen *et al.*, (1997) es la capacidad del suelo de funcionar para regular la productividad agrícola y biológica, los flujos de agua y nutrientes, y como amortiguador ambiental, entre otros.

Los nutrientes disponibles mediante procesos biológicos en el suelo, dependen en gran medida de los procesos de descomposición y mineralización de la MOS (Barrios *et al.*, 1996). Por esto en los sistemas agrícolas en los que se realiza un manejo biológico de la fertilidad se requiere una adecuada medida de la calidad y dinámica de la MOS, a través de los ICS.

La velocidad de la mineralización de la MOS es afectada por diversos factores, entre los que están: a) la cantidad y calidad de la hojarasca; b) el ambiente (contenido de humedad y la temperatura); c) propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Por que la actividad de las enzimas

es mayor a valores de pH alcalinos y es dependiente del tipo y cantidad de los coloides del suelo (McBride, 1989; Drinkwater *et al.*, 1996) y la macrofauna regula la mineralización de la MOS (Lavelle *et al.*, 1993).

Los retos que la investigación sobre la mineralización de la materia orgánica del suelo presenta pueden manejarse controlando los factores ambientales en condiciones de laboratorio; las propiedades del suelo con un diseño experimental que incluya la variabilidad; los aportes y la calidad de hojarasca así como el proceso de descomposición pueden ser incorporados de manera general al estudiar solamente la calidad del suelo.

La hipótesis del trabajo estriba en probar que los cultivos de cobertera como la mucuna (*Mucuna deeringiana*), los íbes (*Phaseolus lunatus*) y el frijol xcolibuul (*P. vulga-*

ris), aumentan la calidad del suelo y de los cultivos (mayor concentración de nutrimentos) en los sistemas agrícolas de maíz/leguminosa.

El objetivo de este trabajo es la identificación de la leguminosa con mayor capacidad como cultivo de cobertera para aumentar la calidad del suelo y de los cultivos. Para lo cual se requirió la caracterización de las condiciones iniciales del sitio experimental, la evaluación de los cambios químicos en el suelo y en el material vegetal en un ciclo agrícola y la evaluación de la dinámica de la calidad del suelo a lo largo de un año.

MARCO TEÓRICO

CALIDAD DEL SUELO

Fertilidad es la cualidad que permite a un suelo proporcionar los compuestos apropiados, en las cantidades debidas y en el balance adecuado para el crecimiento de las plantas específicas cuando otros factores tales como la luz, temperatura y condiciones físicas del suelo son favorables (Olson *et al.*, 1982).

La calidad del suelo está representada por un conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que juntas: 1) proporcionan un medio de soporte para las plantas y la actividad biológica; 2) regulan el flujo de agua y su almacenamiento en el medio ambiente; y 3) sirven como un amortiguador ambiental en la formación y destrucción de compuestos ambientalmente peligrosos (Karlen *et al.*, 1997).

Los Indicadores de la Calidad del Suelo (ICS) miden las propiedades que influyen sobre la capacidad del mismo para tener una producción de cultivos o funciones ambientales (Acton y Padbury, 1993). Existen muchas propiedades del suelo que cambian en respuesta a las diferentes prácticas de manejo y uso de la tierra, muchas de ellas son más sensibles, mientras que otras no lo son tanto (Granatstein y Bezdicsek, 1992). Los ICS deben:

- Correlacionarse con los procesos del ecosistema.
- Integrar las propiedades físicas, químicas y biológicas y ser un punto básico para estimar las propiedades o funciones del suelo más difíciles de medir directamente.
- Medirse fácilmente en campo tanto para especialistas como para productores.
- Ser sensible a las variaciones climáticas y de manejo.

Los ICS son herramientas de análisis que sirven para medir procesos que a través de sus índices identifican problemas en el área productiva, para realizar estimaciones

reales en la producción de alimentos y para conocer el funcionamiento de procesos importantes de la mineralización del C y N, por ello se recomienda que los ICS se utilicen en una base de datos. Entre los índices más importantes están la evolución de CO₂ y la mineralización de N.

a) Evolución de CO₂

La evolución de CO₂ refleja la degradación de los compuestos de C orgánico del suelo, como los residuos de las plantas, los exudados de las raíces, la materia orgánica, las adiciones de C orgánico y la degradación de micro y macro-organismos (Parkin *et al.*, 1996) y varía ampliamente con la disponibilidad del sustrato y la humedad y temperatura del suelo.

La degradación de los compuestos de C orgánico medidos a través de la evolución de CO₂ es un indicador de dos procesos importantes: a) Pérdidas de C del suelo y b) El reciclaje de nutrimentos. Por tanto, la evolución de CO₂ es un indicador sensible de la respuesta del componente biótico al manejo tal como la adición de residuos de plantas, abono animal, labranza, etc. (Parkin *et al.*, 1996).

b) Mineralización potencial anaerobia de N (MPAN)

Casi todo el N en la superficie del suelo está presente en forma de compuestos orgánicos, que las plantas no pueden usar directamente. El N disponible para el crecimiento de los cultivos depende en gran medida del tipo de suelo (Stanford y Smith, 1972), del manejo a largo plazo (Beauchamp *et al.*, 1986), de las adiciones de material orgánico (Bonde *et al.*, 1988; Boyle y Paule, 1989), de la labranza (Carter y Rennie, 1982) y de la fertilización con N (El-Haris *et al.*, 1983).

La mineralización biológica del N del suelo medido a través del NH₄⁺ refleja la cantidad de N disponible para las plantas. La cantidad de N convertido de formas orgánicas a minerales (mineralización) en un lapso de tiempo, varía de acuerdo con la historia de manejo, las variaciones cli-

máticas y las propiedades inherentes del suelo (Drinkwater *et al.*, 1996).

La capacidad del suelo de suministrar N disponible para la planta es un indicador de la calidad del suelo (ICS).

El procedimiento de incubación anaerobia fue propuesto por primera vez por Waring y Bremer (1964) como una alternativa simple y rápida a la incubación aerobia. Esta incubación anaerobia elimina la necesidad de mantener las condiciones de humedad durante la incubación y evita la formación de NO_3^- y su medición, así todo el N mineralizable es convertido, durante la incubación, a la forma de NH_4^+ .

CULTIVOS DE COBERTERA, UNA OPCIÓN PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS

Los cultivos de cobertera son plantas que se siembra para cubrir el suelo con su follaje previniendo la erosión de la capa fértil del suelo ocasionada por efecto de la lluvia y viento y ayudan en el control de malezas, incluye plantas sembradas entre las calles de huertos frutales o durante el periodo de un cultivo y otro, con el objetivo de proteger el suelo de la erosión y lixiviación (Buckles y Barreto, 1996; CIDICCO, 1996).

Las plantas más utilizadas como cultivos de cobertera son: *Mucuna spp.*, *Dolichos lablab*, *Vicia faba*, *Phaseolus coccineus*, entre otros muchos (CIDICCO, 1996).

Los cultivos de cobertera son considerados como opción agroecológica debido a que son capaces de contribuir a aliviar las necesidades humanas básicas de alimento, manteniendo la calidad del ambiente y conservando los recursos naturales (Kleinman *et al.*, 1994).

Los cultivos de cobertera no son la única manera para mantener la calidad de los suelos, constituyen una forma de hacer un uso más eficiente de los recursos existentes, deben combinarse con otras opciones de conservación y enriquecimiento de los suelos como el uso de los nutrientes generados en el propio terreno y el uso moderado de fertilizantes inorgánicos (CIDICCO, 1996).

Leguminosas

Las leguminosas son las plantas más utilizadas como cultivos de cobertera; están distribuidas por todo el mundo, por lo que pueden adaptarse a diferentes condiciones de clima, vegetación y geografía (Binder, 1997; Díaz y Padilla, 1998). Además de controlar las arvenses, pueden aportar N a través del proceso de fijación y, en algunos casos, pueden utilizarse como forraje o alimento debido a que sus semillas secas contienen entre 20 y 48% de proteína, el follaje entre 14 y 18% de proteína cruda. Comparativamente las semillas de cereales contienen entre 8 y 10 % de proteína (Messiaen, 1979). Por otro lado, pueden mejorar la calidad del suelo y el desarrollo de algún cultivo principal de varias maneras como:

- Competir contra las arvenses. La competencia por nutrientes comienza desde que la semilla germina, después la competencia se vuelve por luz y agua; el resultado es la disminución de arvenses (Bunch, 1994; Binder, 1997; Caamal-Maldonado *et al.*, 2001).
- Elevar la cantidad de N del suelo. A través del proceso de fijación las leguminosas pueden llegar a aportar grandes cantidades de N al suelo. En algunos casos la fijación puede comenzar incluso desde los primeros días después de la germinación de la semilla y hasta la etapa de floración (Díaz y Padilla, 1998).
- Ocasionar cambios microclimáticos. Al momento en que las leguminosas comienzan a desarrollar su follaje y a tirar sus primeras hojas generan un microambiente en la superficie del suelo, así reducen la temperatura y evaporación en los lugares que abarca su cobertura (Buckles y Barreto, 1996).
- Proteger al suelo contra la erosión. Debido a las grandes cantidades de hojarasca que aportan éstas llegan a representar una capa de varios centímetros que impide el impacto directo de la lluvia con el suelo disminuyendo también los efectos negativos de los vientos (Binder, 1997).
- Aportar nutrientes al suelo a través de la descomposición de su hojarasca. Las leguminosas toman a través de sus raíces los nutrientes necesarios para su desarrollo; cuando estas mueren, dichos nutrientes (ahora en formas orgánicas) se liberan lentamente a través del proceso de descomposición (Azam *et al.*, 1993).
- Aportar hojarasca de fácil descomposición. Al ser fijadoras de N, la mayoría poseen una baja relación C/N (<25), lo que las hace un recurso fácilmente degradable por la fauna edáfica y los organismos desintegradores (Bunch, 1994; Binder, 1997).
- Elevar la cantidad de MOS. La mayoría de las leguminosas son grandes productores de biomasa y su acumulación produce cambios en las propiedades del suelo, tales como, mejoramiento de la estructura, aumento de la capacidad de intercambio de cationes, aumento de la retención de humedad, entre otros (Binder, 1997; Dyck *et al.*, 1995).
- Entre las desventajas que han sido reportadas están:
- Competencia con el cultivo principal. Se ha reportado que los cultivos compiten por el agua y nutrientes con el cultivo principal, provocando la disminución de la producción durante el primer año de establecimiento (Bunch, 1994; Binder, 1997).
- Proliferación de fauna dañina y plagas. Se ha observado la proliferación de ratas y serpientes venenosas, así como de plagas producto de la implementación del cultivo de cobertura. En estos casos el cultivo provee condiciones o representa un recurso para estos animales (Bunch, 1994; BaierAlter-Tec, 1994).
- Dificultad de eliminación. Una vez que el cultivo de cobertura se ha establecido puede ser difícil eliminarlo del terreno, por lo que no hay que descuidar su manejo (Bunch, 1994).

A continuación se da una breve descripción de las leguminosas usadas en este estudio:

Mucuna deeringian. Leguminosa anual, trepadora, se desarrolla bien en zonas con lluvias desde 650 mm, altitudes desde el nivel del mar hasta 2,100 m y suelos con pH de 4.5-7.7. Se distribuye en las zonas tropicales de África, Asia, América y el Caribe.

Las raíces son superficiales y gruesas tiene hojas trifoliadas, anchas, con folíolos angostos y lanceolados. La inflorescencia está agregada en un racimo axilar colgante, con muchas flores grandes, de color púrpura. Las vainas son de 5-8 cm, con pubescencia negra, aterciopelada y negra, con 4-6 semillas de forma globular. Su lugar de origen es China. Sus semillas se utilizan para la alimentación animal y humana aunque contienen sustancias tóxicas, pero cambiando el agua en que están en remojo varias veces, y después cociéndolas, desaparece su toxicidad (Monegat, 1991).

Las sinonimias con las que se conoce son: *M. pruriens*, *Stizolobium deerengianum*, *M. deerengianum cochinchinensis*, *M. deerengianum nivea*, *Stizolobium pruritum*, *Dolichos pruriens*, *M. deerengianum esquiroii*, *M. deerengianum prurita*, localmente conocidas como nescafé, frijol terciopelo o mucuna.

Phaseolus lunatus. Las variedades silvestres y los cultivos de tipo enredadera son hierbas perennes, de tipo trepador, con grandes raíces; hojas trifoliadas, folíolos ovalados, acuminados, generalmente con pequeños pelos por debajo. Inflorescencia en un racimo axilar, con muchas flores generalmente de color verde pálido (NAS, 1979).

Su lugar de origen es América tropical. Generalmente la cosecha puede realizarse a los 5 meses de la siembra, pero las condiciones de crecimiento pueden ocasionar que varíe de 3 a 9 meses. La planta es valorada en la restauración de la fertilidad del suelo; durante su crecimiento, de despoja de sus hojas, las cuales se pudren fácilmente y enriquecen al suelo (NAS, 1979; Monegat, 1991). Local-

mente se le conoce como íb grande o íb chico (dependiendo del tamaño de las semillas) o xnuç íb y xmejen íb respectivamente.

Phaseolus vulgaris. Es el frijol común, el cual es un alimento muy consumido en México y otras partes del mundo. Hierba anual. No está adaptado a los trópicos húmedos, pero puede crecer bien en áreas de precipitación media de los trópicos de las regiones templadas. La lluvia excesiva causa que las flores se caigan y aumenta la incidencia de enfermedades. Se requiere algo de lluvia para los periodos críticos de floración y establecimiento. Pueden crecer tanto en suelos arenosos como arcillosos y también en suelos de turba. Son sensibles a altas concentraciones de Mn, Al y B. Las pronunciadas raíces primarias crecen rápidamente a una profundidad de 1 m y tienen un crecimiento de raíces laterales principalmente confinadas a los primeros 15 cm de suelo. Sus hojas son alternas, trifoliadas, a menudo algo peludas. Las inflorescencias son racimos laxos, axilares, con pocas flores, usualmente más cortos que las hojas, con flores en o cerca de los ápices del pedúnculo. Las vainas son delgadas, de 8-20 x 1-15 cm, usualmente con 4 a 6 semillas por vaina pero hay cultivares con hasta 12 semillas por vaina. Las semillas varían en color, forma y tamaño, con forma de riñón oblongas o globulares; hilio usualmente blanco; endospermo ausente (NAS, 1979). Conocida localmente como frijol común o xcolibuul.

Existen algunos estudios acerca de las leguminosas en el sistema milpa en la Península de Yucatán, como control de arvenses (Rodríguez, 2001; Caamal-Maldonado, *et al.*, 2001), como mejoradoras de la calidad del suelo (Estrada, 1997; Bautista-Zúñiga *et al.*, 1999) por medio del fraccionamiento de la materia orgánica (Hernández, 2000), su relación con la fauna edáfica (Delgado-Carranza, 1988), su evaluación económica (Mendoza, 1997), siendo la mucuna y canavalia las más evaluadas. Las especies de leguminosas locales usadas en este trabajo, cuentan con escasos estudios técnicos, que reporten el papel que desempeñan sobre la calidad del suelo en el sistema milpa y sus contenidos nutrimentales.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

Este estudio se realizó en la Escuela de Agricultura Ecológica (EAE) Uyits Ka'an ("Rocío del cielo") localizada en el kilómetro dos de la carretera Maní-Dzán al sur del estado de Yucatán a 89° 23' 18" N y 20° 33' 2" W. La zona geomorfológica corresponde a una estructura baja denudativa de karst reciente. Los suelos predominantes de la zona son Luvisoles y Leptosoles.

El clima de la zona de estudio, es de tipo Aw₀ (i')gw", cálido subhúmedo, siendo el más seco de los cálidos subhúmedos, con un cociente precipitación/temperatura de 43.2, lluvias en verano y marcada sequía en medio verano (canícula); el promedio de precipitación anual es 1300 mm; la temperatura media es mayor a 22°C y la del mes

más frío de 18°C; la oscilación térmica fluctúa entre 5 y 7°C y la marcha anual de la temperatura es de tipo Ganges, o sea un máximo antes del solsticio de verano (García, 1983).

La selva mediana subcaducifolia es la vegetación predominante en la región donde se encuentra la EAE. Está constituida por árboles cuya altura promedio oscila entre 10 y 20 m en el estrato superior; del 50 al 75% de las especies eliminan sus hojas en la época seca del año y se encuentran muchos elementos representativos de la flora de Centroamérica (Flores y Espejel, 1994). Las especies dominantes son: *Acacia pennatula*, *Caesalpinia gaumeri*, *Caesalpinia platyloba*, *Lysiloma latisiliquum* y *Enterolobium cyclocarpum* entre otros.

ESTABLECIMIENTO DEL PROYECTO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Este estudio formó parte del proyecto "Evaluación de leguminosas para intensificar la milpa en Yucatán", el cual comprendió tres ciclos continuos de cultivos de maíz asociados a leguminosas a partir de mayo de 1999. Dicho proyecto tiene como objetivo, identificar las especies de leguminosas promisorias para ser incorporadas en la milpa, seleccionando aquéllas con un mejor desarrollo para intensificar dicho sistema agrícola.

La meta final de este proyecto es la adopción de estas especies por parte de los campesinos involucrados en el mismo.

Para el establecimiento de los cultivos, se eligió un sitio con una vegetación con talle de 6 a 8 m de altura y edad aproximada de 10 años de descanso. Se siguieron las prácticas tradicionales, es decir, la r-t-q de la vegetación natural. En los años siguientes, se eliminó la práctica de la quema de los residuos de los cultivos anteriores.

La siembra de las leguminosas y el maíz se realizó al inicio de la época de lluvias durante el mes de mayo, cuando la humedad del suelo favoreció la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas (Fig. 1). La distancia de siembra fue para las leguminosas de 1 x 0.5 m; para el maíz de 1 x 1 m, utilizando una variedad de maíz local denominada Naal Xoy, maíz mejorado por el técnico agrícola Rufino Chí de la comunidad de Xoy del municipio de Peto, Yucatán.

El control de las arvenses se realizó a 30 días de la siembra mediante deshierbes manuales. La cosecha del grano y la biomasa de las leguminosas se realizó de acuerdo con la maduración de éstas. Además se realizaron evaluaciones agronómicas de arvenses (Rodríguez, 2001) y productividad de los cultivos (Castillo-Caamal *et al*, 2002).

Se asignaron parcelas de 6 x 5 m. Los tratamientos fueron las siguientes especies: 1) maíz (*Zea mays*); 2) maíz/ib grande (*Z. mays/Phaseolus lunatus*); 3) maíz/xco-libuul (*Z. mays/P. vulgaris*); 4) maíz/mucuna (*Z. mays/Mucuna derengiana*); y 5) maíz/ib chico (*Z. mays/P. lunatus*).

El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar y se incluyeron cinco tratamientos asignados a cuatro bloques, para un total de 20 parcelas experimentales. El modelo matemático aplicado fue:

$$Y_{ij} = m + B_j + T_i + e_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = variables de respuesta (pH, C, N, etc.)

m = media general

B_j = efecto del j-ésimo bloque

T_i = efecto del i-ésimo tratamiento

e_{ij} = error experimental

El análisis estadístico de las variables de respuesta (pH, C, N, etc.) se realizó a través del procedimiento de análisis de varianza (Steel y Torrie, 1985). Las diferencias entre las medias de los tratamientos se determinaron por la prueba de Duncan.

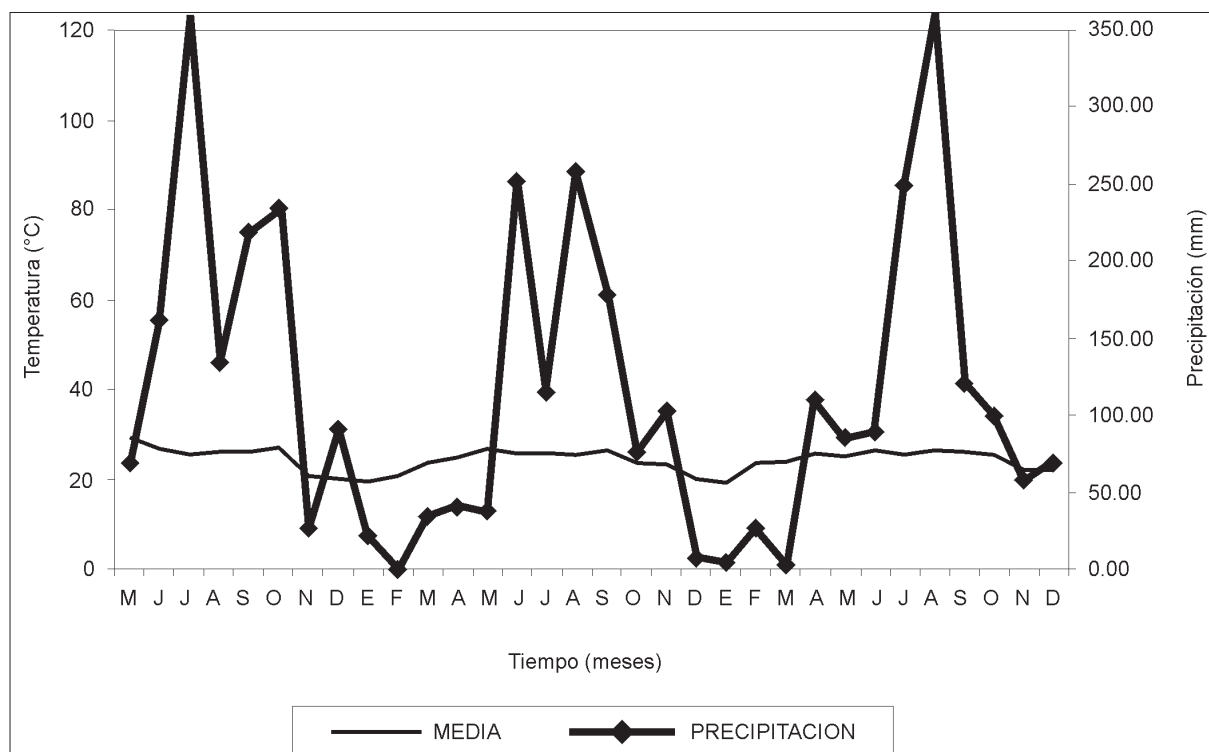


Figura 1. Diagrama ombrotérmico de Oxkutzcab, Yucatán. Mayo 1999 - diciembre 2001. (Comisión Nacional del Agua).

ESTRATEGIA UTILIZADA DE ACUERDO CON LOS OBJETIVOS DE ESTE ESTUDIO

Condiciones iniciales del sitio experimental

Para caracterizar las condiciones iniciales del sitio, se describieron dos perfiles de suelo (Siebe *et al.*, 1996) y se clasificaron los suelos de acuerdo con la "Base de referencia mundial del recurso suelo" (WRB, 1999) y la clasificación de suelos "Soil taxonomy" propuesta por USDA (1999).

El muestreo de suelos se realizó en mayo de 1999, luego de la quema. Se obtuvieron 20 muestras compuestas, determinando pH en agua relación 1:2.5 por el método potenciométrico (Houba *et al.*, 1988; ISP, 1988), C orgánico por el método Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1987), N total usando el método Kjeldhal (Anderson e Ingram, 1993), K intercambiable extraído con acetato de amonio a pH 7.0 (Okalebo *et al.*, 1993), P Olsen (Anderson e Ingram, 1993), evolución de CO_2 (Anderson e Ingram, 1993 y Parkin *et al.*, 1996), MPAN (Houba *et al.*, 1988 y Drinkwater *et al.*, 1996). Las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas en malla de 0.417 mm (Anderson e Ingram, 1993).

Los resultados, se agruparon por tipo de suelo, con el fin de establecer las características de cada uno.

Dinámica de la calidad del suelo y de los cultivos

Para la dinámica de la calidad del suelo, el muestreo de suelos se hizo en mayo de 2000, se realizaron las mismas determinaciones que en las muestras de suelo de mayo de 1999. Las muestras de suelo fueron secadas al aire y tamizadas en malla de 0.417 mm.

En la calidad de los cultivos, se usó el material vegetal correspondiente al primer ciclo de cultivo (1999-2000), el cual incluyó: la planta de maíz (grano, olote y rastrojo), la leguminosa (grano, vaina y rastrojo) y la hojarasca. El material vegetal se secó al horno a 60 °C durante 48 horas; se trituró con un molino de marca Janke & Kunkel modelo A10S2, y se tamizó a 0.417 mm, midiendo los contenidos de N total (Anderson e Ingram, 1993), P (ISP, 1988) y K (ISP, 1988), previa digestión con una mezcla de HNO_3 y HClO_4 (2:1) (ISP, 1988).

Los resultados analíticos de los suelos de cada parcela en 1999 (pH, C, N, etc.) se utilizaron como covariable para el análisis estadístico de la calidad del sustrato y, de acuerdo al modelo estadístico presentado en la sección 3.2.

Indicadores de la calidad del suelo (ICS)

La dinámica de los ICS incluyó la evolución del CO_2 (Anderson e Ingram, 1993 y Parkin *et al.*, 1996) y MPAN (Houba *et al.*, 1988 y Drinkwater *et al.*, 1996). El periodo de estudio fue durante el año 2001, con muestreos cada ocho semanas, iniciando en enero. Se tomaron cinco muestras de suelo en cada parcela, utilizando un cilindro de plástico de 5.9 cm de diámetro y 5 cm de altura, el cual se introdujo sobre la superficie del suelo. Las muestras fueron secadas al aire, a la sombra y tamizadas en malla de 0.417 mm.

La evolución de CO_2 fue medida usando el método de una trampa de NaOH (Anderson e Ingram, 1993). La técnica consiste en pesar 10 g de muestra en frascos de vidrio y humedecer la columna de suelo, preincubar la muestra por siete días a 25 °C. Posteriormente, se introduce en cada frasco, un vial con 2 mL de NaOH 1.0 N, se tapa herméticamente cada frasco y se incuba de nuevo por diez días más. Se corren blancos con NaOH 1.0 N sin muestras de suelo. Luego de los diez días se titula el NaOH, adicionando 2 mL de BaCl_2 al 2% para precipitar el Na_2CO_3 formado en la reacción entre el CO_2 y el NaOH.

La mineralización potencial anaerobia del N en siete días fue determinada usando el método propuesto por Anderson e Ingram (1993) con algunas modificaciones. Se pesaron 20 y 10 g de suelo para el Luvisol y Leptosol respectivamente en viales de plástico de 30 mL, mojar la columna de suelo y cerrar el vial herméticamente, incubar a 40 °C durante siete días. Luego de siete días, adicionar 50 mL de K_2SO_4 0.5 M (solución extractante) y se agitar por 30 minutos a 150 rpm, luego se filtró y al filtrado se adicionó disoluciones de $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}-\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (fenol-nitroprusiato) y NaOH-NaClO formando un compuesto de color azul que se midió por colorimetría a 430 nm. De igual manera, se realizó el procedimiento para las muestras de suelo sin incubar (día 0) y se calculó la MPAN de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{MPAN} = \text{mg de } \text{NH}_4^+ \text{kg}^{-1} \text{ suelo}_{\text{día 7}} - \text{mg de } \text{NH}_4^+ \text{kg}^{-1} \text{ suelo}_{\text{día 0}}$$

Donde: MPAN= mg de NH_4^+ kg⁻¹ suelo

El análisis estadístico se realizó utilizando el procedimiento de análisis de varianza (Steel y Torrie, 1985): a) de tres factores (tratamientos, meses y suelos) a lo largo del año de estudio, y b) de un factor (tratamientos) en cada mes. Para ambos casos las diferencias entre las medias se determinaron usando la prueba de Duncan. Los análisis estadísticos se separaron por unidad de suelo, debido a que los ICS responden de manera diferente en cada suelo.

RESULTADOS

CONDICIONES INICIALES DEL SUELO DEL SITIO EXPERIMENTAL

Los suelos se clasificaron como Luvisol ródico (LVro) o typic Rhodustalfs y Leptosol réndzico (LPrz) o Lithic Haplustolls según la WRB (1999) y USDA (1999) respectivamente. La descripción de los perfiles se muestra a continuación:

El LVro o suelo profundo de manera general es de color rojo que limita con roca, tiene textura fina y está bien drenado (Tabla 1).

El LPrz es un suelo somero de color oscuro que limita con roca, se encuentra bien drenado y presenta rocas en todo el perfil (Tabla 2).

Las condiciones químicas y la calidad de la MOS de estos tipos al inicio del estudio se presentan en la Tabla 3.

Según la norma Proy-NOM RECNAT (2000), estos suelos se clasifican según su pH (7.4–8.5) como medianamente alcalinos. El porcentaje de MO en el Luvisol y Leptosol es 6.98 y 19.27% respectivamente, clasificándose como suelos con contenidos muy altos de MO.

Tabla 1. Descripción de campo del Luvisol ródico ubicado en Maní, Yucatán.

Horizonte	Profundidad	Descripción
A	0 a 6 cm y 0 a 25 cm	Color café rojizo oscuro en húmedo (7.5YR2.5/2); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares; consistencia friable; estabilidad de agregados moderada; poros comunes, finos y muy finos; humedad baja; densidad de raíces media; 0% de pedregosidad; sin reacción al HCl, densidad aparente 1.26 g cm ⁻³ .
Bt ₁	25 a 37 cm	Color café rojizo en húmedo (2.5YR2.5/4); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares; estabilidad de agregados alta; poros comunes, finos y medianos; humedad baja; densidad de raíces baja; 0% de pedregosidad; reacción al HCl muy bajo, de 0-0.5%; presencia de algunas concreciones en forma de bloques y de color negro, densidad aparente 1.97 g cm ⁻³ .
Bt ₂	37 a 58 cm	Color rojo en húmedo (2.5YR3/6); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares; estabilidad de agregados alta; poros comunes, finos y muy finos; humedad baja; densidad de raíces muy baja; pedregosidad menos de 1%; presencia de algunas concreciones de forma esférica y de color negro; sin reacción al HCl; densidad aparente 2.03 g cm ⁻³ .
C	58 a 86 cm	Color rojo anaranjado en húmedo (2.5YR3/6); textura arcillosa; estructura en bloques subangulares; estabilidad de agregados baja; poros pocos, finos y muy finos; humedad baja; densidad de raíces muy baja; 0% de pedregosidad; sin reacción al HCl; densidad aparente 2.20 g cm ⁻³ .

Tabla 2. Descripción de campo del Leptosol réndzico ubicado en Maní, Yucatán

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ah	0 a 23 cm	Color negro en húmedo 10YR2/1 y en seco 7.5YR3/3; textura franco limosa fina; estructura de bloques subangulares; consistencia friable; estabilidad de agregados moderada; muchos poros finos y grandes formados por agregados; raíces e insectos (hormigas); humedad baja; pedregosidad 30%, presencia de grava fina; reacción al HCl extremadamente alto; densidad de raíces extremadamente alta 80% (gruesas, finas y muy finas).

Tabla 3. Caracterización química y de la calidad de la materia orgánica de los suelos al inicio del experimento (mayo 1999).

Parámetro / suelo	Luvisol	Leptosol
pH	7.9 ± 0.0 ^a	8.2 ± 0.1 ^b
Carbono orgánico (g kg ⁻¹)	40.54 ± 3.63 ^a	111.88 ± 11.63 ^b
Materia Orgánica (%)	6.98 ± 0.63	19.27 ± 2.01
Nitrógeno total (g kg ⁻¹)	2.36 ± 0.22 ^a	6.32 ± 0.60 ^b
Relación C/N	15.72 ± 1.12 ^a	16.99 ± 1.74 ^b
Fósforo Olsen (mg kg ⁻¹)	72.24 ± 8.43 ^a	439.37 ± 23.52 ^b
Potasio (mg kg ⁻¹)	1186 ± 87.39 ^a	1500 ± 601.05 ^b
Evolución de CO ₂ (mg CO ₂ kg ⁻¹)	785.63 ± 55.10 ^a	993.73 ± 100.11 ^b
MPAN (mg NH ₄ ⁺ kg ⁻¹)	8.20 ± 2.33 ^a	39.97 ± 8.72 ^b

Las letras diferentes entre columnas muestran diferencias significativas ($\rho=0.05$). Según la prueba de t. MPAN= mineralización potencial anaerobia de N en siete días. $\bar{x} \pm D.E.$ (n= 10).

Para el N total, el Luvisol y Leptosol presentan valores altos y muy altos, respectivamente. En el caso del P Olsen y K intercambiable, ambos suelos tienen contenidos altos.

El Luvisol es diferente al Leptosol ya que, el Leptosol tiene valores mayores de C orgánico (2.7 veces), N total (2.6 veces), P Olsen (6.0 veces) y MPAN (4.8 veces) que el Luvisol.

El LVro y el LPrz son diferentes en su descripción de campo y en sus propiedades químicas y de la calidad de la MOS.

Según la Proy-NOM RECNAT (2000), para el caso de la materia orgánica, N, P y K intercambiable, ambos suelos presentan contenidos altos, por lo que se catalogan como suelos con una "alta fertilidad". Sin embargo, los rendimientos bajos en maíz se explican por la poca profundidad del Leptosol y su alto drenaje debido a los intersticios de las rocas sueltas.

Estrada (1997) reporta para suelos de color espectral 5YR (Luvisol) de la Zona Henequenera del estado de Yucatán, luego de la quema, valores más bajos de pH (7.4), C orgánico (39.1 g kg^{-1}), P (33.3 mg kg^{-1}), relación C/N (9.5) que los encontrados en este estudio. En contraste el contenido de N total fue más alto (4.1 g kg^{-1}).

DINÁMICA DE LA CALIDAD DEL SUELO Y DE LOS CULTIVOS

El pH, N total, P Olsen, K intercambiable y evolución de CO_2 , no presentan diferencias por efecto de las leguminosas luego de un ciclo anual de cultivo ($r=0.05$) (Tabla 4). El C orgánico, materia orgánica, la relación C/N y la MPAN que es una propiedad de alta tasa de cambio, permiten señalar que el uso de mucuna y xcolibuul como cultivo de cobertera aumentan la calidad de la MOS; es decir, los cultivos de cobertera tienen efectos benéficos sobre la calidad del suelo incluso en el primer año de su introducción al sistema (Tabla 4).

Los efectos sobre los nutrimentos principales (N, P y K), luego de un ciclo anual de cultivo aún no son evidentes. Esto puede deberse a una alta variabilidad en los resultados (se agruparon ambos suelos) y al efecto de la vegetación anterior del sitio (Tabla 4).

El contenido de N total en los diferentes materiales vegetales de los tratamientos con las leguminosas fueron estadísticamente similares (Tabla 5) a excepción del rastrojo de maíz donde el contenido mayor de N fue en el tratamiento maíz solo y el menor en el tratamiento maíz/mucuna. Los resultados de N en el grano de maíz, concuerdan con lo reportado por Douglas *et al.* (1990) que es de $14.48 \text{ g N kg}^{-1} \text{ MS}$.

El P de los diferentes materiales vegetales de los tratamientos con leguminosas fueron estadísticamente similares (Tabla 5) a excepción del contenido de P del grano y vaina de leguminosas. Los resultados de P del grano de maíz están por debajo del valor de referencia ($2400 \text{ mg P kg}^{-1} \text{ MS}$) que reporta Douglas *et al.* (1990).

En el grano de leguminosas, la mucuna tiene el contenido mayor de P ($2214 \text{ mg P kg}^{-1} \text{ MS}$) y el menor contenido lo tiene el grano de Xcolibuul ($1891 \text{ mg P kg}^{-1} \text{ MS}$). En las vainas de leguminosas, la mucuna tiene el contenido mayor de P ($454 \text{ mg P kg}^{-1} \text{ MS}$) y el menor contenido lo tiene la vaina de íb grande ($318 \text{ mg P kg}^{-1} \text{ MS}$).

El K en el grano de maíz, olote y rastrojo de leguminosas de los tratamientos con las leguminosas no fueron significativamente diferentes (Tabla 5). En el rastrojo de maíz, el tratamiento maíz/mucuna tiene el mayor contenido ($8948 \text{ mg K kg}^{-1} \text{ MS}$) y el menor contenido lo tiene el tratamiento maíz/íb grande ($7051 \text{ mg K kg}^{-1} \text{ MS}$).

En el grano de leguminosas, el tratamiento maíz/íb grande tiene el mayor contenido de K ($14316 \text{ mg K kg}^{-1} \text{ MS}$) y el tratamiento con el menor contenido es maíz/mucuna ($11405 \text{ mg K kg}^{-1} \text{ MS}$). En la vaina de leguminosas, el tratamiento con el mayor contenido es maíz/mucuna ($15416 \text{ mg K kg}^{-1} \text{ MS}$) y el de contenido menor es el tratamiento maíz/íb chico ($9165 \text{ mg K kg}^{-1} \text{ MS}$).

Tabla 4. Cambios químicos y de calidad de la materia orgánica del suelo durante el ciclo de cultivo (mayo 2000) en el estado de Yucatán.

Parámetro	Tratamiento					
	Maíz	Íb grande	Xcolibuul	Mucuna	Íb chico	EE
pH	7.9 ^a	7.9 ^a	7.9 ^a	8.0 ^a	8.0 ^a	0.1
C (g kg^{-1})	79 ^b	76 ^b	71 ^{ab}	56 ^a	69 ^{ab}	11.3
MO (%)	13.6	13.1	12.2	9.7	11.9	1.9
N (g kg^{-1})	4.5 ^a	4.8 ^a	4.8 ^a	3.9 ^a	4.4 ^a	0.61
C/N	16.8 ^b	15.5 ^{ab}	14.7 ^a	14.3 ^a	15.5 ^{ab}	0.14
P (mg kg^{-1})	166 ^a	195 ^a	196 ^a	179 ^a	198 ^a	25.29
K (mg kg^{-1})	1445 ^a	1536 ^a	1582 ^a	1512 ^a	1370 ^a	228.92
Evol. CO_2 (mg kg^{-1})	531 ^a	628 ^a	637 ^a	616 ^a	626 ^a	118.71
MPAN (mg kg^{-1})	15.5 ^a	14.7 ^a	19.6 ^b	16.0 ^a	15.4 ^a	1.96

Las letras diferentes entre columnas muestran diferencias significativas ($p=0.05$) según la prueba de Duncan. MPAN= mineralización potencial anaerobia de N en siete días. MO= materia orgánica. EE= error estándar de la diferencia Evol CO_2 = Evolución de CO_2 . (n=4).

Tabla 5. Contenido de N, P y K en el material vegetal durante el ciclo de cultivo (1999-2000) en el estado de Yucatán.

Material vegetal	Maíz solo	Maíz/ib grande	Tratamientos	Maíz/mucuna	Maíz/ib chico	EE
			g N kg⁻¹ MS			
Grano maíz	15.1 a	15.1 a	13.9 a	16.0 a	14.5 a	1.47
Olote	3.2 a	2.8 a	3.2 a	3.0 a	2.0 a	0.93
Rastrojo maíz	9.0 c	6.6 ab	7.4 bc	4.9 a	6.6 ab	1.45
Grano leg.		30.5 a	30.8 a	31.7 a	26.8 a	4.37
Vaina leg.		4.7 a	5.1 a	5.6 a	5.8 a	1.19
Rastrojo leg.		19.4 a	16.3 a	15.1 a	17.3 a	3.28
Hojarasca	12.3 a	12.4 a	12.7 a	13.5 a	12.9 a	1.93
			mg P kg⁻¹ MS			
Grano maíz	1962 a	1984 a	2043 a	1806 a	2112 a	299
Olote	651 a	699 a	720 a	748 a	758 a	99
Rastrojo maíz	841 a	856 a	824 a	866 a	784 a	76
Grano leg.		2000 ab	1891 a	2214 b	2153 ab	187
Vaina leg.		318 a	356 a	424 b	321 a	31
Rastrojo leg.		837 a	782 a	583 a	828 a	149
Hojarasca	651 a	699 a	720 a	748 a	758 a	99
			mg K kg⁻¹ MS			
Grano maíz	2878 a	3069 a	2935 a	3329 a	3051 a	349
Olote	6046 a	6275a	6267 a	6294 a	5405 a	913
Rastrojo maíz	8845 ab	7051 a	8025 ab	8948 b	7492 ab	1084
Grano leg.		14316 b	13127 ab	11405 a	13418 ab	1273
Vaina leg.		11130 b	11596 b	15416 c	9165 a	975
Rastrojo leg.		12524 a	12002 a	10505 a	12184 a	182
Hojarasca	3859 ab	5017 c	2812 a	3734 a	4892 bc	701

Las letras diferentes entre material vegetal muestran diferencias significativas ($\alpha=0.05$) según la prueba de Duncan Leg = leguminosa. EE= error estándar de la diferencia. MS = materia seca. (n= 4).

En la hojarasca, el tratamiento con el mayor contenido es maíz/ib grande (5017 mg K kg⁻¹ MS) y el de contenido menor es el tratamiento maíz/xcolibuul (2812 mg K kg⁻¹ MS).

Los granos de leguminosas y del maíz son los materiales vegetales con mayor cantidad de nutrimentos (N, P y K) debido a que fisiológicamente son un almacén de nutrimentos que aseguran la germinación de las plantas.

Para la calidad de los cultivos, el contenido de N total, no varía en los tratamientos, excepto para el caso del rastrojo de maíz. La cosecha del grano y vaina de mucuna ocasionaría una pérdida importante de P.

En cuanto al K, la pérdida de K al cosechar el grano de ib grande se compensa en parte por tener la hojarasca con el contenido mayor de K, por el contrario, la pérdida de K al extraer la vaina de mucuna se combina con una hojarasca de contenido bajo de K, resultando que la mucuna puede tener las mayores extracciones de K en el sistema.

INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO

Evaluación global de los indicadores de la calidad del suelo

Los indicadores de la calidad del suelo utilizados (evolución de CO₂ y MPAN) no muestran diferencias significativas entre tratamientos si estos son comparados anualmente. Esto puede deberse a que los suelos tienen características muy distintas por lo que se puede especular que la existencia de diferencias dependerá del tipo de suelo. Por esto se hizo el análisis en cada mes y por cada tipo de suelo (Tabla 6).

La evolución de CO₂ y la MPAN presentan los valores más altos en marzo, en ambos suelos y para todos los tratamientos, debido a los aportes de biomasa de los residuos de los cultivos anteriores y de las arvenses, así como de biomasa microbiana, que son materiales de rápida mineralización.



Esta situación genera una asincronía entre la liberación de nutrimentos y el crecimiento y desarrollo de los cultivos, es decir, la mayor demanda de nutrimentos (durante el desarrollo del maíz) es en julio, pero el mayor potencial de suministro se presenta en marzo (Tabla 6).

La evolución de CO_2 y MPAN se comportan de diferente manera en ambos suelos, debido a diferencias en la actividad de los microorganismos edáficos en suelos de diferente mineralogía (coloides). El LVro es un suelo mineral y el LPrz es un suelo orgánico (Tabla 6).

Tabla 6. Evolución de CO_2 y mineralización potencial anaerobia de nitrógeno durante el 2001.

Tratamientos	Evolución de CO_2 $\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ suelo}$	MPAN $\text{mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ suelo}$
Maíz	938.5 ^a	31.0 ^a
Íb grande	965.7 ^a	31.8 ^a
Xcolibuul	958.8 ^a	32.7 ^a
Mucuna	896.2 ^a	32.8 ^a
Íb chico	890.9 ^a	31.1 ^a
Meses		
Enero	1109.1 ^a	40.7 ^b
Marzo	1143.8 ^a	65.2 ^a
Mayo	772.7 ^b	25.2 ^c
Julio	871.4 ^b	24.2 ^c
Septiembre	596.2 ^c	13.3 ^c
Noviembre	1083.2 ^a	22.7 ^c
Suelos		
Luvisol ródico	673.9 ^b	15.4 ^b
Leptosol réndzico	1184.9 ^a	48.4 ^a

Las letras diferentes entre tratamientos, meses y suelos muestran diferencias significativas ($p=0.05$) según la prueba de Dun-

Evaluación de los cultivos de cobertera por mes

En el Luvisol ródico: La evolución del CO_2 tiene valores extremos, el mayor en el tratamiento maíz/mucuna en marzo ($1031 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ suelo}$) y el menor, en el tratamiento maíz/íb chico en septiembre ($265 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ suelo}$). El comportamiento a lo largo del año fue: en marzo (barbecho o descanso) se obtienen los valores más altos, a partir de ahí se observa un descenso gradual hasta septiembre (plantas de maíz con 1.2 m de altura) y luego un ascenso de los contenidos en noviembre (cosecha) que alcanzan los valores iniciales de enero que es cuando se inicia el periodo de barbecho (Tabla 7).

Los tratamientos de leguminosas asociadas al maíz, en enero y noviembre no tienen diferencias, en los siguientes meses, el tratamiento maíz/mucuna tiene los valores mayores y el tratamiento maíz (control) tiene los valores menores (excepto en septiembre). El tratamiento maíz/íb chico, presenta un comportamiento irregular a lo largo del año de evaluación, ya que en dos ocasiones (marzo y septiembre) tiene valores menores y en mayo y julio presenta mayores valores.

La MPAN tiene valores extremos: el mayor en marzo en el tratamiento maíz/mucuna ($33.67 \text{ mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ suelo}$) y el menor ($4.78 \text{ mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ suelo}$) en enero en el tratamiento control. El comportamiento a lo largo del año fue: en marzo tiene los valores mayores de MPAN y a partir de ahí aprecia un descenso gradual incluso hasta noviembre en donde se obtienen valores similares a los obtenidos en enero.

Con respecto a las especies utilizadas como cultivos de cobertera, la mucuna presenta los valores mayores de MPAN a lo largo del año (excepto enero) y el tratamiento control, los contenidos menores (excepto noviembre). Las otras especies evaluadas, presentan contenidos intermedios de MPAN (Tabla 7).

Tabla 7. Evolución de CO_2 y MPAN en el Luvisol ródico durante el 2001.

Mes	Maíz	Íb grande	Xcolibuul	Mucuna	Íb chico
			$\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ suelo}$		
Enero	784.4 41.6a	859.6 28.9a	890.4 69.1a	837.1 31.9a	668.3 31.9a
Marzo	888.1 131.0ab	911.3 109.2ab	965.4 87.3ab	1031.0 49.1b	772.3 240.3a
Mayo	526.5 179.8a	627.5 100.4ab	683.6 10.5bc	657.4 47.6bc	758.4 148.1c
Julio	510.2 135.4a	538.6 105.3ab	598.9 40.1ab	634.4 60.2b	556.3 120.4bc
Septiembre	410.4 22.1b	418.2 0.0b	406.5 49.8b	488.7 11.0c	265.5 49.8a
Noviembre	682.7 60.6a	717.7 11.1a	698.0 72.3a	705.9 61.2a	725.5 22.2a
			$\text{mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1} \text{ suelo}$		
Enero	4.78 0.81a	6.99 1.23c	6.42 0.57bc	5.63 0.13b	6.20 0.42bc
Marzo	25.48 3.66a	29.90 0.10a	23.15 3.54a	33.67 4.57b	27.18 3.89a
Mayo	17.55 1.98a	23.80 4.50bc	21.14 3.73b	25.60 0.42c	21.55 3.37b
Julio	14.11 2.18a	17.37 0.21bc	18.77 1.37c	18.40 3.11bc	16.32 0.54b
Septiembre	9.31 2.33a	10.99 2.90ab	14.69 4.04c	13.17 3.04bc	13.34 2.23bc
Noviembre	9.81 2.46b	8.42 1.73ab	7.34 1.53a	8.42 2.70ab	6.95 0.12a

Las letras diferentes entre columnas muestran diferencias significativas ($p=0.05$) según la prueba de Duncan. $\pm$ D.E. ($n=10$).

En el LVro, luego de un año de evaluación, el tratamiento maíz/mucuna es el que presenta una mayor evolución de CO_2 y MPAN, en tanto que el tratamiento control tiene la menor calidad de MO. Lo anterior coincide con Barrios *et al.*, (1994) que reporta $47 \text{ mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ suelo de MPAN en el tratamiento de maíz con adiciones de leguminosas y para maíz en monocultivo reporta $22 \text{ mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ suelo, sin embargo, estos valores son mayores que los encontrados en el mismo mes en este estudio, debido a que fueron otros suelos y especie de leguminosa (*Gliricidia Sepium*).

En el Leptosol Rendzico la evolución del CO_2 tiene valores extremos: el mayor en noviembre en el tratamiento control ($1607 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ suelo) y el menor, en mayo en el tratamiento maíz/mucuna ($707 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ suelo). El comportamiento durante el 2001 fue: mayo (siembra) y septiembre tienen los valores menores para que en julio (maíz de 20 cm) y noviembre aumenten los contenidos. De manera general, se aprecia un comportamiento irregular a lo largo del año (Tabla 8).

Los tratamientos en enero y septiembre no presentan diferencias; sin embargo, el tratamiento maíz/íb grande tiene los valores mayores estadísticamente (de marzo a julio) y el tratamiento maíz/mucuna presenta los valores menores a lo largo del año.

La MPAN tiene valores extremos: el valor mayor en marzo ($108 \text{ mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ suelo) en el tratamiento maíz/íb grande y el valor menor ($12.58 \text{ mg NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ suelo) en septiembre en el tratamiento maíz/íb chico. El comportamiento durante el 2001 fue: en marzo los valores más altos, luego los contenidos sufren una drástica caída en mayo y

es hasta noviembre cuando se aprecia un incremento en los contenidos pero sin alcanzar los valores iniciales de enero.

Los tratamientos en enero y marzo no muestran diferencias, sin embargo, el tratamiento maíz/xcolibuul en julio y noviembre tiene los valores mayores y el tratamiento maíz/mucuna los menores, pero en los demás meses se tiene un comportamiento irregular, por lo que no es posible identificar claramente el mejor de los tratamientos (Tabla 8).

El comportamiento de la MPAN a lo largo del año demuestra una asincronía entre la de mayor capacidad potencial de suministrar N disponible para los cultivos (marzo) y la etapa de mayor demanda del cultivo (julio), existe una disminución del 30% en MPAN del suelo justo en la época de siembra. Esto coincide con Franzluebbers *et al.*, (1994b) que reporta 660, 1210 y $806 \text{ mg CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ suelo en noviembre, abril y mayo respectivamente. La asincronía es más evidente en el LPrz.

Las diferencias en magnitud de la evolución de CO_2 en ambos suelos (LVro y LPrz), permite señalar que en el LPrz existe una mayor pérdida de compuestos orgánicos y la mucuna (con la menor evolución CO_2) evita una pérdida mayor de MO y por tanto una mayor degradación del suelo.

Si la evolución de CO_2 y la MPAN, son utilizadas como ICS, es necesario tomar en cuenta: a) El tipo de suelo; b) La fecha de muestreo; y c) La historia de manejo de los cultivos (Sparling, 1997; Granatstein *et al.*, 1987).

Tabla 8. Evolución de CO_2 y MPAN en el Leptosol réndzico durante el 2001.

Mes	Maíz	Íb grande	Xcolibuul	Mucuna	Íb chico
			Mg $\text{CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ suelo		
Enero	1495 ± 463^a	1355 ± 101^a	1409 ± 198^a	1307 ± 362^a	1484 ± 82^a
Marzo	1353 ± 476^{ab}	1570 ± 200^b	1567 ± 153^b	1125 ± 37^a	1252 ± 333^{ab}
Mayo	967 ± 74^{bc}	1095 ± 437^c	848 ± 136^{ab}	707 ± 80^a	855 ± 33^{ab}
Julio	1224 ± 144^{ab}	1248 ± 4^b	1149 ± 125^{ab}	1094 ± 28^a	1159 ± 140^{ab}
Septiembre	812 ± 148^a	831 ± 142^a	831 ± 87^a	789 ± 82^a	707 ± 10^a
Noviembre	1607 ± 222^b	1414 ± 50^a	1457 ± 22^{ab}	1339 ± 111^a	1485 ± 105^{ab}
			mg $\text{NH}_4^+ \text{ kg}^{-1}$ suelo		
Enero	76.33 ± 7.04^a	74.19 ± 2.25^a	71.52 ± 9.36^a	80.89 ± 8.55^a	74.66 ± 2.62^a
Marzo	98.46 ± 16.38^a	108.54 ± 13.29^a	100.09 ± 19.01^a	101.73 ± 1.09^a	107.55 ± 15.63^a
Mayo	25.93 ± 4.21^b	21.83 ± 2.21^a	26.67 ± 3.79^b	37.68 ± 1.68^d	30.84 ± 2.52^c
Julio	32.62 ± 4.14^{ab}	31.25 ± 1.10^{ab}	34.77 ± 3.32^b	27.93 ± 3.04^a	31.25 ± 6.63^{ab}
Septiembre	14.98 ± 3.29^{ab}	16.50 ± 0.52^b	13.88 ± 3.39^{ab}	14.61 ± 0.93^{ab}	12.58 ± 2.16^a
Noviembre	43.19 ± 0.00^c	36.32 ± 0.88^b	55.28 ± 9.82^d	26.81 ± 4.32^a	25.77 ± 5.99^a

Las letras diferentes entre columnas muestran diferencias significativas ($p=0.05$) según la prueba de Duncan $\pm$ D.E. ($n=10$).

DISCUSIÓN GENERAL

SUELOS

El suelo de color rojo, profundo y arcilloso, se clasificó como Luvisol ródico y el suelo negro, somero y pedregoso como Leptosol rendzico. En todas sus propiedades químicas y de calidad de la materia orgánica fueron diferentes. Es requisito indispensable en la experimentación agrícola una caracterización completa de los suelos del sitio estudio. Además que existe una alta variabilidad espacial en ellos (Bautista *et al.*, 2004a), es necesario considerar su ubicación topográfica (Pool y Hernández, 1985; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003a; Bautista-Zúñiga *et al.*, 2004b). Por ello se debe incluir una descripción de los perfiles de suelo y su clasificación y/o realizar mapas parcelarios con base en propiedades de diagnóstico de fácil y económica obtención (Uicab, 2002), o bien realizar análisis físico-químicos del epipedón, todo con el fin de diseñar experimentos en el mismo suelo e incrementar el número de repeticiones de los tratamientos en cada suelo.

Los análisis de calidad de ambos suelos indican elevados contenidos de MO y nutrimentos (N, P y K), por lo que son catalogados como suelos de alta fertilidad, lo que no coincide con la producción lograda que se encuentra alrededor de 847 kg ha⁻¹ de maíz (Castillo-Caamal *et al.*, 2002). Diversas razones explican esta aparente contradicción, el LP tiene un alto contenido de CaCO₃ que podría reaccionar con los nutrimentos liberados para hacerlos no disponibles a los cultivos (Mariaca, 1992); el escaso desarrollo del suelo (poca profundidad), su alto drenaje debido a los intersticios de las rocas sueltas y su elevada pedregosidad y rocosidad (Uicab, 2002), son factores que limitan su productividad. Lo anterior cobra una mayor relevancia, debido a que los LP representan alrededor del 80% de los suelos del estado de Yucatán.

El LV a pesar de tener un mayor desarrollo conforme su profundidad aumenta, su densidad aparente se incrementa, es decir, se hace más compacto, dificultando la penetración de las raíces. Además es un suelo arcilloso, por tanto tiene poros muy pequeños que ante un exceso de agua, se saturan e impiden el paso del agua, ocasionando inundaciones en los campos agrícolas (ver descripción del LVro).

Cabe señalar que existen otros factores que de manera directa o indirecta afectan la calidad de los suelos y su productividad, entre los que destacan: 1) La edad del monte previo (Mariaca, 1992; Weisbach *et al.*, 2002); 2) El efecto de la quema (Giardina *et al.*, 2000); 3) La cantidad de arvenses y su competencia con los demás cultivos (Caamal-Maldonado *et al.*, 2001); y 4) El periodo de lluvias, entre otros.

En este estudio, ambos suelos (LVro y LPrz) son clasificados con base en sus contenidos de nutrimentos como suelos de "alta fertilidad"; sin embargo, para el cultivo del maíz tienen rendimientos bajos (Castillo-Caamal *et al.*, 2002).

En los primeros 5 cm el LVro y el LPrz tienen 20,746 y 57,255 kg C ha⁻¹ respectivamente, indicando que el LPrz es el suelo con mayor potencial de fijación de C; sin em-

bargo es el de mayor riesgo de degradación por el uso continuo sin cobertura arbórea que disminuya la mineralización de la MO y que garantice aportes anuales abundantes o recalitrantes en calidad.

En el caso del LVro, se presenta el riesgo de compactación en el caso del cultivo continuo de herbáceas, situación observada en diversos suelos del estado, principalmente con el uso de pasto. Estos suelos son lo de mayor potencial de manejo debido a la mayor cantidad de tierra fina y al mayor potencial de enraizamiento.

El LVro y LPrz son suelos sanos, a su manejo no incluye la adición de agroquímicos (fertilizantes inorgánicos y herbicidas) que pudieran causar contaminación del manto acuífero y riesgos de salud humana; sin embargo, si fueran utilizados los agroquímicos y aguas residuales, el LPrz es el de menor potencial de amortiguamiento de dichos contaminantes debido a su mayor velocidad de infiltración y a su escasa profundidad efectiva.

ANÁLISIS DE SUELOS Y PLANTAS

Luego de un ciclo de cultivo, los cambios en la calidad del suelo por introducción de leguminosas de cobertera al cultivo de maíz, son evidentes en la calidad de la materia orgánica del suelo. La menor relación C/N en el tratamiento con mucuna se traduce en la liberación de N (mineralización) y por tanto el suelo tiene la mayor capacidad de suministrar N a los cultivos. Las relaciones C/N, lignina/N y polifenoles/N también pueden ser utilizados como indicadores de la descomposición (Vitousek *et al.*, 1994).

Los contenidos de N, P y K del suelo no muestran cambios por efecto de los tratamientos; sin embargo, esto puede deberse a las técnicas utilizadas que no consideran los compartimientos orgánicos y minerales. Se recomienda el empleo de técnicas de fraccionamiento de P, N y K.

BALANCE DE NUTRIMENTOS DEL SISTEMA

En el análisis ecosistémico se consideran como entradas/transformaciones a el rastrojo de maíz, el rastrojo de leguminosa y la hojarasca debido a que estos materiales permanecen en el sistema. Se consideran salidas al grano del maíz y al grano de la leguminosa debido a que son cosechados y aprovechados por el agricultor (Tabla 9).

En caso del testigo (maíz sin leguminosa) se tiene un balance positivo de N, P y K que puede catalogarse como medio en comparación con los otros tratamientos; sin embargo, la productividad del maíz es igual a la de los demás tratamientos, con excepción del caso maíz/mucuna que tiene la menor productividad. El reciclaje de nutrimentos puede ser considerado como alto para N, P y K. La producción del sistema es baja debido a la cosecha del maíz y la nula producción de leguminosa.

Tabla 9. Análisis ecosistémico de entradas y salidas del ciclo agrícola 1999-2000 en Maní, Yucatán.

Tratamientos	Maíz solo	Maíz-ib grande	Maíz xcolibuul	Maíz mucuna	Maíz-ib chico
Material vegetal			kg N ha⁻¹		
Grano de maíz	17	14	12	10	11
Grano de leguminosas	0	10	7	29	10
Suma de salidas	17	24	19	39	21
Rastrojo de maíz	21	12	11	6	10
Rastrojo de leguminosa	0	14	2	11	3
Hojarasca	13	25	13	33	26
Suma de entradas	34	51	26	50	39
Neto=entradas-salidas	17	27	7	11	18
			kg P ha⁻¹		
Grano de maíz	2.1	1.8	1.8	1.1	1.6
Grano de leguminosas	0.0	0.6	0.5	2.0	0.8
Suma de salidas	2.1	2.4	2.3	3.1	2.4
Rastrojo de maíz	1.9	1.6	1.2	1.1	1.2
Rastrojo de leguminosa	0.0	0.6	0.1	0.4	0.1
Hojarasca	0.7	1.4	0.7	1.8	1.5
Suma de entradas	2.6	3.6	2.0	3.3	2.8
Neto=entradas-salidas	0.5	1.2	-0.3	0.2	0.4
			kg K ha⁻¹		
Grano de maíz	3.1	2.8	2.6	2.0	2.3
Grano de leguminosas	0.0	4.5	3.1	10.3	5.1
Suma de salidas	3.1	7.3	5.7	12.3	7.4
Rastrojo de maíz	20	13	12	11	11
Rastrojo de leguminosa	0	9	2	8	2
Hojarasca	4.2	10.0	2.9	9.2	9.7
Suma de entradas	24.5	32.1	16.8	27.8	22.7
Neto=entradas-salidas	21.4	24.8	11.1	15.5	15.3

Fuente. Castillo-Caamal *et al.*, 2002 y Tabla 5.

El tratamiento maíz/ib grande tiene un balance positivo de N, P y K, la productividad del sistema es alta y similar a la mucuna (excepto para el grano de leguminosa donde es menor). Es el tratamiento con el mayor reciclaje de nutrientes y de mayor producción agronómica debido a que el grano de leguminosas tienen una mayor demanda en el mercado en comparación con las demás leguminosas.

El tratamiento maíz/xcolibuul tiene un balance positivo de N y K y negativo de P, y es el sistema con la menor productividad y el de peor balance nutrimental, por tanto esta leguminosa no debe ser recomendada para aumentar la calidad del suelo y la productividad del sistema.

El tratamiento maíz/mucuna tiene un balance positivo de N, P y K, tiene la menor productividad de grano de maíz; sin embargo, produce la mayor biomasa total debido a la más alta productividad en grano de leguminosa y hojarasca; sin embargo, en cuanto al balance de nutrientes es bajo para N y P y medio para K. La producción de semilla es la mayor en comparación con los demás tratamientos, sin embargo, tiene un mercado restringido porque no

se utiliza para consumo humano, solo en la alimentación de cerdos y borregos.

El tratamiento maíz/ib chico tiene un balance positivo de N, P y K, tiene una productividad intermedia, su balance de nutrientes es medio para N y P y bajo para K. La producción de semilla es media.

ASINCRONÍA

Los contenidos mayores de MPAN durante la época de secas (mes de marzo) indican que existe una asincronía entre la mayor disponibilidad potencial de N y la época de mayor demanda del maíz.

Esta asincronía se debe a que en marzo existe mayor cantidad de material mineralizable de la caída de las hojas de las plantas, los residuos de los cultivos anteriores y un aumento de la biomasa microbiana así como la descomposición de las raíces finas (Singh y Singh, 1981).



Otros estudios demuestran una correlación negativa entre el contenido de humedad del suelo y el C, N y P microbiano dentro de un ciclo anual (Srivastava, 1992). En la época de secas, el contenido de humedad del suelo disminuye y existe un aumento en el tejido microbiano muerto que incrementa el N disponible (Sparling 1997); al llegar la época de lluvias, los organismos que sobrevivieron de la época de secas aumenta sus actividad y junto con los cultivos consumen los nutrientes disponibles, la intensidad de este fenómeno depende de la intensidad y duración de los periodos de secas y lluvias y del tipo de suelo (Jaramillo y Sanford, 1995). Existen años en los que ocurre sequía intraestival (canícula) que se refleja en la humedad del suelo y en consecuencia fluctuaciones de la MPAN en ese periodo.

Es necesario realizar estudios sobre las principales vías de reciclaje de nutrientes que incluya a las raíces finas, descomposición de hojarasca, biomasa microbiana y la translocación de nutrientes de las plantas.

Para lograr sincronizar la disponibilidad elevada de nutrientes y la demanda de los cultivos, es necesario incluir nuevas estrategias de manejo del sistema tales como sembrar durante marzo incorporando riego al sistema para soportar la época de secas o sembrar muy tarde la leguminosa, para que no exista el riesgo de competencia con el maíz y para aumentar la retención de humedad del suelo y propiciar un mayor crecimiento de la leguminosa.

La sincronía de la milpa con leguminosas traerá como consecuencia, una menor utilización de fertilizantes inorgánicos y la disminución del uso de insumos externos, mayor utilidad económica y menores riesgos potenciales de salud para los productores.

INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO

En los suelos minerales (LVro) xcolibuul, mucuna e íb chico ocasionan una mayor mineralización de los compuestos de C con lo que se propicia una mayor velocidad en el reciclaje de nutrientes. En los suelos con alto contenido de materia orgánica (LPrz) que presentan valores altos de mineralización de compuestos de C la mucuna ocasiona una reducción del 40% de mayo a julio con lo que permite disminuir las pérdidas de materia orgánica y tal vez esta ayude a disminuir el tiempo de degradación del suelo (pérdida de la fertilidad).

En el LVro, el íb chico, mucuna e xcolibuul son las leguminosas que aumentan la mineralización potencial del N por lo que tienen un mayor potencial para aumentar la producción de maíz con cultivos de cobertera. En el LPrz, la mucuna y el íb chico son las leguminosas que mejor funcionan como cultivos de cobertera para mejorar la disponibilidad del N.

La evaluación de la calidad del suelo en la milpa con leguminosas herbáceas, puede ser realizada a corto plazo (cambios estacionales) a través de ICS como la evolución de CO₂ y la MPAN, pues reflejan el reciclaje de nutrientes y la capacidad del suelo de suministrar N disponible para las plantas respectivamente y reflejan la dinámica del compartimiento más lábil de la MOS (Carter y Rennie,

1982; Campbell *et al.*, 1991; Franzluebbers *et al.*, 1994a). En estudios a largo plazo, otros ICS como pH y C orgánico son los sugeridos para medir el efecto de las leguminosas al introducirse al sistema (Castillo-Caamal *et al.*, 2002).

La identificación de ICS a nivel regional se dificulta, debido a la alta heterogeneidad espacial de los suelos, entre otros factores; sin embargo, la evaluación de la calidad del suelo según sus usos, permitirá un mejor diseño de sistemas agrícolas a nivel regional.

El mantener o aumentar la calidad de los suelos proporciona beneficios económicos como un incremento en la productividad, un uso eficiente de los fertilizantes inorgánicos y pesticidas, un mejoramiento en la calidad del agua y aire así como una disminución en la emisión de gases a la atmósfera. Por todo lo anterior, la evaluación y mantenimiento de la calidad de los suelos, debería de ser una meta fundamental en las políticas ambientales del gobierno.

LOS CULTIVOS DE COBERTERA

Entre las especies de leguminosas utilizadas como cultivos de cobertera, el íb grande cumple la mejor función en cuanto al reciclaje de nutrientes (N, P y K), el frijol xcolibuul es la menos recomendable en el mismo sentido (Fig. 2).

A pesar de que la salida de nutrientes es mayor en el tratamiento maíz-mucuna, en él se identificó un efecto positivo en la calidad del suelo (menor relación C/N). Además, en el LVro aumenta la disponibilidad potencial de N

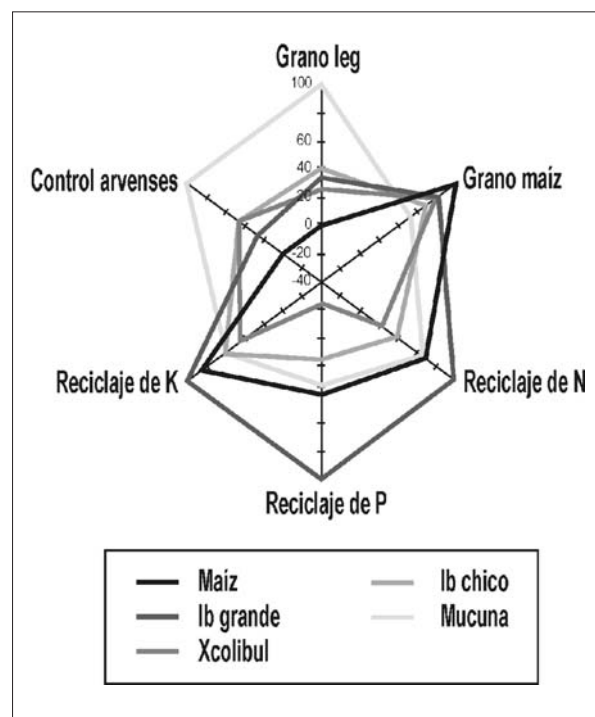


Figura 2. Evaluación integral de las leguminosas utilizadas como cultivos de cobertera.

(mayor MPAN) y en el LPrz evita una mayor pérdida de MO. Esta situación hace pensar que este cultivo de cobertera puede ser de gran interés de uso en suelos de baja fertilidad o con otro tipo de degradación.

Diversos autores ya han señalado que la mucuna es buen cultivo de cobertera debido a la elevada biomasa que produce, fija N atmosférico, disminuye la pérdida de agregación y aumenta la estabilidad de los agregados, produce un mantillo de alta calidad (Estrada, 1997), ejerce un efectivo control sobre las arvenses (Caamal-Maldonado *et al.*, 2001; Rodríguez, 2001), además puede ser útil como forraje y alimento y sus beneficios sobre la calidad del suelo, tanto en el LV como en el LP.

Es necesario continuar la búsqueda y evaluación de más especies locales de leguminosas herbáceas multipropósito con potencial para ser asociadas a la milpa, como el frijol arroz (*Vigna umbellata*), xpelón (*Vigna unguiculata*) y otras variedades de mucuna, entre otros, considerando su diferente comportamiento en diferentes suelos y regiones agroecológicas del estado.

OTROS ASPECTOS DE LA PROBLEMÁTICA DE LA MILPA

Aún cuando los aspectos socioeconómico del sistema milpa no fueron evaluados en este estudio, son dos componentes fundamentales, por lo es necesario tenerlos en cuenta para realizar propuestas integrales de manejo del sistema. Buckles (1996) destaca los siguientes: a) el costo de oportunidad de la tierra, es decir, el introducir leguminosas de cobertera en la milpa implica la pérdida de sembrar otro cultivo en su lugar; b) el uso de la mano de obra, debido a que pueden controlar las arvenses, reducen el tiempo dedicado al deshierbe, además de disminuir los costos en herbicidas; c) el costo de los fertilizantes inorgánicos, disminuye conforme aumentan sus efectos benéficos sobre la calidad del suelo; y d) el costo de investigación, necesarios para generar y adoptar estrategias de manejo al introducir leguminosas de cobertera al sistema.

CONCLUSIONES

Como era de esperarse, el sitio experimental tiene dos tipos de suelos: Luvisoles y Leptosoles, por lo cual los experimentos agrícolas deben considerar dichas diferencias, utilizando el diseño de parcelas divididas o realizar experimentos independientes entre suelos. En ambos casos, es necesario aumentar como mínimo el número de muestras a ocho.

El tratamiento con mucuna tiene el valor más bajo de la relación C/N (14.3); lo cual permite suponer una mayor liberación de nutrimentos (principalmente N) vía mineralización de la hojarasca y la materia orgánica del suelo. Los suelos de los tratamientos con las otras leguminosas tienen una MO de calidad intermedia con respecto a la mucuna y el maíz solo. Por ello, el uso de leguminosas tiene un efecto favorable sobre la calidad del suelo.

En los contenidos de N, P y K del suelo no se detectaron cambios después de un ciclo de cultivo, probablemente debido a que se utilizaron técnicas gruesas que no miden los contenidos en los compartimientos orgánicos y minerales por separado. Se recomienda el empleo de técnicas de fraccionamiento de N, P y K.

En el primer ciclo de cultivo, las leguminosas utilizadas no aumentaron el valor nutritivo (N, P, y K) del grano de

maíz; sin embargo, es probable que se encuentren diferencias después de un lapso de tiempo mayor, debido a la incorporación del N molecular fijado por las leguminosas.

En el tratamiento con íb grande como cultivo de cobertera se recicla la mayor cantidad de nutrimentos (N, P y K) al sistema, por lo que es una buena opción para incrementar la productividad y mantener la calidad del suelo.

En el LVro, la utilización de mucuna como cultivo de cobertera permite una mayor mineralización de C y N, por tanto aumenta el reciclaje de nutrimentos, procesos claves en la nutrición vegetal. En el LPrz el tratamiento maíz/mucuna presenta la menor evolución de CO₂ y con esto amortigua las pérdidas excesivas de C.

Los resultados del análisis de la mineralización potencial anaerobia de N en los tratamientos permiten la identificación de la asincronía entre la disponibilidad de nutrimentos y la demanda por parte del maíz, por lo que es necesario diseñar opciones de manejo del sistema con el fin de aprovechar la época de mayor disponibilidad de N.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico para realizar esta investigación (Beca al primer autor, proyectos 980603 y 31624-B).

REFERENCIAS

- Acton, D. y G. Padbury, 1993.** A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. In: A program to assess and monitor soil quality in Canada: soil quality evaluation program summary (interim). Center for land and Biol. Resour. Res. Ottawa, Canada.
- Allen, J., 1991.** The ecology of micorrizae. Cambridge University Press. USA. Pág. 184.
- Anderson, J. y J. Ingram, 1993.** Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. 79-82 CAB International. Wallingford, England.
- Arshad, M. y G. Coen, 1992.** Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture* 7: 25-31.
- Azam, F., F. Simmons y R. Mulvaney, 1993.** Minereralization of N from plant residues and its interaction with native soil N. *Soil Biology and Biochemistry*. 25 (12): 1787-1792.
- BaierAlter-Tec A., 1994.** Abonos verdes. En: Caballero, A. Agricultura sostenible: Un acercamiento a la permacultura. Secretaría de extensión universitaria y difusión cultural. Colección de textos especializados 3. Universidad Autónoma de Tlaxcala. México.
- Barber, S., 1984.** Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. A Wiley-intercience publication. John Wiley and sons. Pág. 398.
- Barrios, E., R. Buresh y J. Sprent, 1996.** Nitrogen mineralization in density fractions of soil organic matter from maize and legume cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*. 28 (10/11): 1459-1465.
- Bautista-Zúñiga, F., J. Jiménez-Osornio, H. Estrada-Medina y C. Delgado-Carranza, 1999.** Efecto de las leguminosas en la materia orgánica, fauna y microclima del suelo de la milpa de la zona henequenera de Yucatán. Informe CONACYT, clave 0308-PB. Departamento de manejo y conservación de los recursos naturales tropicales. FMVZ-UADY.
- Bautista-Zúñiga, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro-Alberto, A. Manu y R. Lozano, 2004a.** Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra* 21:1-11.
- Bautista-Zúñiga, F., H. Estrada-Medina, J. Jiménez-Osornio, y A. González-Iturbe, 2004b.** Relación entre el relieve y suelos en zonas cársticas. *Terra. Latinoamericana* 22(3): 243-254.
- Beauchamp, E., W. Reynolds, D. Brasche-Villeneuve y K. Kirby, 1986.** Nitrogen mineralization kinetics with different soil pretreatments and cropping histories. *Soil science society of America Journal*. 50: 1478-1483.
- Binder, U., 1997.** Manual de leguminosas de Nicaragua. Nicaragua. PASOLAC. E.A.G.E. Tomo 1. Pág. 15-58.
- Bonde, T., J. Schnurer y T. Rosswall, 1988.** Microbial biomass as a fraction of potentially mineralizable nitrogen in soils from long-term field experiments. *Soil Biology and Biochemistry*. 20: 447-452.
- Boyle, M. y E. Paul, 1989.** Carbon and nitrogen mineralization kinetics in soil previously amended with sewage sludge. *Soil science society of America Journal*. 53: 99-103.
- Buckles, D. y H. Barreto, 1996.** Intensificación de sistemas de agricultura mediante leguminosas de cobertura: Un marco conceptual. Documento No. 9606 del Grupo de Recursos Naturales. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México. D.F.
- Buckman, H y N. Brady, 1991.** The nature and properties of soils. Macmillan Company, Nueva York, EUA.
- Bunch, R., 1994.** El potencial de las coberturas muertas en el alivio de la pobreza y la degradación ambiental. En: Tapado: los sistemas de siembra cobertura. (Ed. Thruston, H. D., Smith, M., Adawi, G., Karl, S.). México. CATTIE, CIIFAD. Pág.69.
- Caamal-Maldonado, J., J. Jiménez-Osornio, A. Torres-Barragan y A. Anaya, 2001.** The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agronomy Journal*. 93 (1): 27-36.
- Castillo-Caamal, J., F. Bautista-Zúñiga y J. Jiménez-Osornio, 2002.** Evaluación de leguminosas de cobertura para intensificar la milpa en Yucatán. Informe CONACYT-SISIERRA. Departamento de manejo y conservación de los recursos naturales tropicales. FMVZ-UADY.
- Campbell, C., V. Biederbeck, R. Zentner y G. Lafond, 1991.** Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Canadian Journal of soil science*, 71: 363-376.
- Carter, M. y D. Rennie, 1982.** Changes in soil quality under zero tillage farming systems: distribution of microbial biomass and mineralizable C and N potentials. *Canadian Journal of soil science*. 71: 363-376.
- Castellanos, J., J. Uvalle y A. Aguilar, 2002.** Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Instituto de capacitación para la productividad agrícola. México.
- Centro internacional de información sobre cultivos de cobertura (CIDICCO), 1996.** Que se entiende por cultivos de cobertura. Informe técnico No. 14:1-2.
- Coleman, D., C. Reid y C. Cole, 1983.** Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. *Advances Ecology Result*. 13:1-55.
- Cross, A. y W. Schlesinger, 1995.** A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycles of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*. 64:197-214.
- Cuevas, E. y E. Medina, 1996.** Biomass production and accumulation in nutrient-limited rain forest: implications for responses to global change. In: Amazonian deforestation and climate. Gassh J.; J. Roberts y R. Victoria (ed.) John Wiley & Sons. Pág 221-239.
- Delgado-Carranza, C., 1988.** La descomposición de las leguminosas y su relación con la fauna edáfica en la milpa intensiva maya. Tesis de licenciatura. UNAM. México.
- Díaz, M. y C. Padilla, 1998.** Agrotecnia de leguminosas temporales en zonas tropicales. *Revista cubana de ciencias agrícolas*. 32: 334.
- Doran, J. y T. Parkin, 1994.** Defining and assessing soil quality. En J. W. Doran *et al* (ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication Number 35. Madison Wisconsin, USA. Pág. 3-21.
- Douglas, J., T. Sullivan, P. Bond y F. Struwe, 1990.** Nutrient composition and metabolizable energy values of selected grain sorghum varieties and yellow corn. *Poultry Science*. 69 (7):1147-1155.
- Drinkwater, L., C. Cambardella, J. Reeder y C. Rice, 1996.** Potentially mineralizable nitrogen as an indicator of biologically active soil nitrogen. In: Methods for Assessing Soil Quality. John W. Doran and Alice J. Jones. SSSA Special Publication Number 49. Madison Wisconsin, USA. Pág. 217-229.
- Dyck, E., M. Liebman y S. Erich, 1995.** Crop weed interference as influenced by a leguminous or synthetic fertilizer nitrogen source: I. Doublecropping experiments with crimson clover, sweet corn and lambsquarters. *Agriculture ecosystems and Environment* 56: 93-108.
- El-Harris, K., L. Cochran, F. Elliot y F. Bezdicsek, 1983.** Effect of tillage, cropping and fertilizer management on soil nitrogen mineralization potential. *Soil science society of America Journal*. 47: 1157-1161.
- Estrada, H., 1997.** Evaluación de las coberturas vivas de *Mucuna de-rengianum* y *Canavalia ensiformis* como mejoradora de la calidad del suelo de la milpa de la Zona Henequenera de Yucatán, México. Tesis de licenciatura. UNAM. México.
- Flores, J. y I. Espejel, 1994.** Etnoflora yucatanense. Tipos de vegetación de la península de Yucatán. México. UADY. Pág. 73.
- Franzluebbers, J., F. Hons y D. Zuberer, 1994a.** Long-term changes in soil carbon and nitrogen pools in wheat management systems. *Soil science society American Journal*. 58 (11): 1639-1645.
- Franzluebbers, J., F. Hons y D. Zuberer, 1994b.** Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. *Soil Biology and Biochemistry*. 26 (11): 1469-1475.

- García, E., 1983.** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Apuntes de climatología. Talleres Larios. México, D.F.
- Giardina, C., R. Sanford y D'Eckersmith, 2000.** Changes in soil phosphorus and nitrogen during slash-and-burn-clearing of a dry tropical forest. *Soil Science Society American Journal*. 64 (1): 399-405.
- Granatstein, D. y D. Bezdicek, 1992.** The need for a soil quality index: local and regional perspectives. *American Journal of Alternative Agriculture*, 17:12-16.
- Granatstein, D., D. Bezdicek, V. Cochran, L. Elliot y J. Hammel, 1987.** Long term tillage and rotation effects on soil microbial biomass, carbon and nitrogen. *Biology and fertility of soil*. 5: 265-270.
- Hernández, R., 2000.** Evaluación de la calidad de suelos provenientes de milpas tradicionales y con asociación maíz-mucuna a través del fraccionamiento de la materia orgánica. Tesis de licenciatura. UADY. México.
- Hernández-X., E., L. Tacher y B. Baltazar, 1995.** La roza-tumba-quema en Yucatán. En: Hernández-X. E., Bello E. y Levy S (Eds). La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo I. Colegios de posgraduados, México.
- Houba, J., J. van Der Lee, I. Novozamsky y I. Walinga, 1988.** Soil and plants analysis, Part 5, Soil Analysis Procedures. Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2001.** Anuario estadístico del estado de Yucatán. INEGI. Aguascalientes, México.
- ISP, 1988.** Manual de procedimientos analíticos para análisis de suelos y plantas del laboratorio de fertilidad de suelos IRENAT-Colegio de Posgraduados. México
- Jaramillo, V. y R. Sanford, 1995.** Nutrient cycling at tropical deciduous forest. In Bullock S., Mooney A. y Medina E. (ed.) Seasonally tropical deciduous forest. Cambridge University Press.
- Jordan, C., 1995.** Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. Principles and their application in management and conservation. John Wiley and sons. Pág. 190.
- Karlen, L., M. Mausbach, J. Doran, R. Cline, R. Harris y G. Schuman, 1997.** Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science. Society. American. Journal*. 61: 4-10.
- Kleinman, P., D. Pimentel y R. Bryant, 1994.** The ecological sustainability of slash-and-burn agriculture. *Agriculture, Ecosystems and environment*. 52: 235-249.
- Lampkin, N., 1998.** Agricultura ecológica. Ediciones Mundi-prensa. España. Pág. 51-83.
- Mariaca, R., 1992.** El papel de la fertilidad del suelo en el sistema roza-tumba-quema. En: La modernización de la milpa en Yucatán: Utopía o realidad (ed. Zizumbo D., C. Rasmusen, C. Arias L.). Editorial CICY-Zizumbo. Mérida, Yucatán, México.
- Mc Bride, B., 1989.** Surface chemistry of soils. En: Dixon y Weed. Minerals in soil environments. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, EEUU.
- Mendoza, A., 1997.** Evaluación económica de un sistema de labranza y abonado en la asociación con leguminosas (*Mucuna deeringianum* y *Canavalia ensiformis*): una alternativa al sistema roza-tumba-quema en la comunidad de Sacaba, Yucatán. Tesis de licenciatura. UADY.
- Messiaen, M., 1979.** Las hortalizas. México. Blume Distribuidora. Pág. 237-238.
- Monegat, C., 1991.** Plantas de cobertura del suelo: características y manejo en pequeñas propiedades. Chapeco. Ed. de Autor. Pág. 85-89.
- National Academy Science (NAS), 1979.** Tropical legumes: resources for the future. Washington, D. C. Pág. 332.
- Nelson, W. y L. Sommers, 1987.** Organic matter. In: Methods of soil analysis. Part II. Chemical and Soil Science Society of American. Series agronomy # 9. Wisconsin, EUA.
- Okalebo, R., K. Gathua y L. Woomer, 1993.** Laboratory methods of soil analysis: a working manual. KARI, SSSEA, TSBF, UNESCO. Nairobi, Kenya.
- Olson, A., K. Frank, P. Grabouski y G. Rehm, 1982.** Economic and agronomic impacts of varied philosophies of soil testing. *Agronomy Journal* 74: 492-499.
- Parkin, T., J. Doran y E. Franco-Vizcaino, 1996.** Field and laboratory tests of soil respiration. In: J. W. Doran *et al.*, (ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication Number 35. Madison Wisconsin, USA. Pág. 231-245.
- Pool, L. y E. Hernández, 1987.** los contenidos de materia orgánica de suelos en áreas bajo el sistema agrícola de roza-tumba-quema: Importancia del muestreo. *Terra*:81-92.
- Proyecto de Norma Oficial Mexicana, 2000.** Que establece los procedimientos de análisis de suelos. SEMARNAT. México.
- Rodríguez, R., 2001.** El uso de leguminosas herbáceas de cobertura en la milpa, para el control de arvenses en Maní, Yucatán. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Siebe, C., R. Jahn y K. Stahr, 1996.** Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. UNAM, México.
- Singh, K. y R. Singh, 1981.** Seasonal variation in biomass and energy of small roots in tropical dry deciduous forest, Varanasi, India. *Oikos* 37: 88-92.
- Sparling, D., 1997.** Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicator of soil health. In: Biological indicator of soil health. (ed.). C. E. Pankhurst, B. M. Boube and U. V. S. R. Gupta. CAB International. Wallingford, England.
- Srivastava, S., 1992.** Microbial C, N y P in dry tropical soils: seasonal changes and influence of soil moisture. *Soil biology and biochemistry*. 24: 711-14.
- Stanford, G. y J. Smith, 1972.** Nitrogen mineralization potentials of soil. *Soil science society of America proceedings*. 36: 465-472.
- Steel, R. y J. Torrie, 1985.** Bioestadística, principios y procedimientos. Editorial Presencia Ltda. Segunda edición. Colombia.
- Soil Survey Staff, 1999.** Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Agriculture Handbook No. 436. 2a edition. Ed. United States Department of Agriculture Natural Resource Conservation Service. USA.
- Tiessen, H., I. Salcedo y V. Sampaio, 1992.** Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agriculture, ecosystems and environment*. 38: 139-151.
- Uicab, M., 2002.** Mapas parcelarios de suelos para la administración agropecuaria de terrenos en el sur de Yucatán. Tesis de licenciatura. UADY. México.
- Vitousek, P., D. Turner, W. Parton y R. Sanford, 1994.** Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii I: patterns, mechanisms and models. *Ecology* 75 (2): 418-429.
- Vogt, K. y J. Bloomfield, 1991.** Tree turnover and senescence. In: Waisel, Y., A. Eshel and U. Kafkafi. 1991. Plant roots: the hidden half. USA. Pág 948.
- Walbridge, M., 1991.** Phosphorus availability in acid organic soils of the lower North Carolina coastal plain. *Ecology*. 72 (6): 2083-2100.
- Waring, S. y J. Bremer, 1964.** Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature* 201: 951-952.
- Weisbach, C., H. Tiessen y J. Jiménez-Osornio, 2002.** Soil fertility during shifting cultivation in the tropical karst soils of Yucatan. *Agronomie* 22:253-263.
- WRB, 1999.** World reference base for soil resources. Informes sobre recursos mundiales de suelos 84. FAO, ISRIC and ISSS. Roma, Italia.



PRODUCCIÓN Y CALIDAD DEL FOLLAJE DE ÁRBOLES FORRAJEROS ESTABLECIDOS SOBRE MINAS DE CAL ABANDONADAS

Efraín Llamas¹, José B. Castillo¹, Carlos Sandoval²
y Francisco Bautista¹

¹ Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales,
FMVZ, Universidad Autónoma de Campeche

² Departamento de Nutrición Animal, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán

RESUMEN

Con el fin de analizar el rendimiento y la calidad del follaje de árboles en zonas calcáreas en minas de cal abandonadas en Yucatán, se llevó a cabo un experimento que incluyó a: *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Albicia lebeck* y *Guazuma ulmifolia*. En el primer año se registraron 0.54 y 0.43 kg MS árbol⁻¹ corte⁻¹, para *G. sepium* y *G. ulmifolia*, en tanto, en el segundo año, se incrementaron los rendimientos a 1.02 y 1.16 kg MS árbol⁻¹ corte⁻¹ ($P < 0.01$), los cuales fueron superiores a *L. leucocephala* y *Albicia lebeck*. El rendimiento del follaje fue mayor en la época de lluvia con 0.82 kg MS árbol⁻¹ corte⁻¹. El porcentaje de hoja en el follaje, registró valores más altos para las especies de *G. sepium* y *A. lebeck*. Comparando entre épocas, el porcentaje de hoja fue mayor ($P < 0.01$) en seca que en lluvia y norte. El contenido de PC en la hoja fue similar ($P < 0.001$) en *L. leucocephala* y *A. lebeck* con 23 y 22%, respectivamente, valores superiores a *G. sepium* y *G. ulmifolia*. En la época de seca, se registró mayor concentración de PC que en la época de lluvia. El contenido de FDN y FDA en la hoja fue mayor para *A. lebeck* de 52.0 y 31.5%, respectivamente. La concentración de fenoles totales en hojas fue más alta en *G. ulmifolia* (1.1%) y en *L. leucocephala* (0.9%). La digestión ruminal de la PC puede ser considerada como muy alta en las cuatro especies estudiadas, los valores mayores fue 93.1% y 91.9% para *G. ulmifolia* y la *G. sepium*, respectivamente. En la prueba de consumo voluntario del follaje por ovinos, *L. leucocephala* y *G. ulmifolia*, resultaron las mejores con 32.4 y 25.8 g MS/kg PV^{0.75} ($P < 0.05$). *G. sepium*, *G. ulmifolia* y *L. leucocephala*, por su alto rendimiento de biomasa, valor nutritivo, digestividad de materia seca y proteína, así como por el consumo voluntario, pueden ser consideradas como un recurso forrajero importante para la alimentación de rumiantes, además de brindar otros servicios como restauración de las minas de cal abandonadas.

ABSTRACT

In order to evaluate the yield and quality of different tree species on a quarry soil at Mérida, Yucatán, an experiment was carried out, in which four species of trees were included: *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Albicia lebeck* and

Guazuma ulmifolia. During the first year yields were 0.54 and 0.43 kg of dry matter (DM) tree⁻¹, for *G. sepium* and *G. ulmifolia*, and in the second year increased to 1.02 and 1.16 kg DM tree⁻¹ for the same species ($P < 0.01$), which were better than *L. leucocephala* and *A. lebbeck*. The forage yield during rainfall improved recording 0.82 kg tree⁻¹. The leaf percentages were higher for *G. sepium* and *A. lebbeck* on both years. In the dry season, there were recorded 73 % and 70% ($P < 0.01$). Crude protein (CP) was similar ($P < 0.001$) for *L. leucocephala* and *A. lebbeck* with 22.08 and 21.6% each one, these values were better than *G. sepium* and *G. ulmifolia*. In the dry season there was recorded 20% of CP which was higher than in the rain season. The NDF and ADF for leaves were higher for the *A. lebbeck* (52.0 and 31.5%, respectively). Total polyphenol concentration was higher in leaves of *G. ulmifolia* (1.1%) and *L. leucocephala* (0.9%). Rumen DM degradation was higher for *G. sepium* and *G. ulmifolia* with 81.4 and 80.6%. *L. leucocephala* and *G. ulmifolia* were the preferred species by pelibuey sheep with intake of 32.4 and 25.8 g DM/kg PV^{0.75} ($P < 0.05$). Because of their biomass production and high nutritional value, these species may be considered as an importantly also provide forage resource for ruminants, but importantly also provides other services such as restoration of degraded areas as abandoned calcite mine.

INTRODUCCIÓN

En México la minería es una de las actividades productivas de gran importancia, dando empleo a miles de trabajadores. Del subsuelo mexicano se extraen 47 minerales; sin embargo, las actividades mineras, principalmente las de cielo abierto, han propiciado transformaciones radicales que impactan de manera negativa en los ecosistemas en los que se desarrollan. La explotación de la caliza en Yucatán se realiza a cielo abierto, eliminando flora, fauna, suelo y aquitardo. Se propicia un gran impacto ambiental desde contaminación del aire por la dispersión del polvo hasta la contaminación del acuífero por la conversión de las minas abandonadas en basureros (Nava, 1999; Oropeza, 1999).

La rehabilitación de algunas minas de cal abandonadas se ha realizado mediante la siembra de especies arbóreas nativas. Las plantas utilizadas en la reforestación y que han logrado establecerse son *L. leucocephala*, *A. lebbeck*, *G. ulmifolia* y *G. sepium*, las cuales han logrado buen crecimiento y adaptación a los suelos de cantera (Flores, 1994; Castillo y Cervera, 1998). Las zonas rehabilitadas son escasas debido al incumplimiento de la legislación ambiental y a los costos elevados de la reforestación. Una opción para la recuperación de los costos de reforestación es la utilización de los árboles con potencial para la producción de forraje para la cría de ganado ovino.

En muchas regiones del mundo se están logrando importantes avances en el establecimiento y manejo de especies arbóreas con potencial forrajero, ya que contribuyen a la disminución de los costos de producción ganadera y menor uso de insumos externos como son los concentrados energéticos y proteicos, además algunas especies arbóreas permanecen verdes, aún en la época de sequía, por lo que se puede lograr equilibrar en mejor forma, la disponibilidad de forraje a través de las estaciones del año.

La abundancia de los árboles y arbustos en el trópico y sus características nutrimentales, los hacen atractivos por

poseer contenidos de proteína cruda de 14 a 30%, superior a las gramíneas forrajeras (Meléndez, 1997). Además de las funciones ambientales (Murgueitio *et al.*, 1999).

El uso del follaje de árboles para la alimentación de rumiantes, es una práctica antigua; sin embargo, los recursos forrajeros han sido utilizados en forma circunstancial debido a la escasez de información técnica (Torres, 1983), principalmente en lo referente a las podas. Stur *et al.* (1994) mencionan que una práctica favorable es dejar que los árboles alcancen una altura de 1- 1.5 m antes de ser cortados, período que generalmente se logra después del primer año de vida. Los cortes de los árboles realizados a una altura fija, pueden provocar severas defoliaciones, lo cual se manifiesta en un retraso en la fase de la producción máxima. El estado fenológico ideal para cosechar forraje de árboles es después de alcanzar el índice de área foliar máximo, etapa que se logra antes de empezar la caída de las hojas sombreadas (Blair *et al.*, 1990). Los árboles cuando son defoliados con períodos fijos, pueden continuar su crecimiento debido al tamaño de sus raíces que les permiten extraer la humedad a perfiles más profundos (Gutteridge y Shelton, 1994). Además, pueden detener el período de floración y estimular el crecimiento vegetativo, a lo largo de la estación seca (Simmons y Stewart, 1994). Para garantizar que se produzca forraje en el período seco es necesario efectuar podas al final del período lluvioso (Hernández, 1988).

El presente trabajo evaluó el rendimiento de biomasa y el valor nutritivo, del follaje de *L. leucocephala*, *A. lebbeck*, *G. ulmifolia* y *G. sepium* para identificar las especies más promisorias y su posterior selección e inclusión como componentes de sistemas silvopastoriles, bajo condiciones de suelo de cantera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó al sur de la ciudad de Mérida, Yucatán, ubicada en el paralelo, 21° 51' de latitud norte y 89° 41' longitud oeste, dentro del terreno de la Empresa Materiales Anillos Periféricos, S. A. (MAPSA). En la zona predominan suelos del grupo Leptosol asociados con Cambisoles. Su formación es de origen residual, producto de la descomposición de las calizas y la disolución de la roca original. Son de textura media, pedregosos, ligeramente ondulados con pequeñas elevaciones y pendientes de 1% en las planicies y entre el 5 y 20% en los altillos (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003). El clima del sitio es Awo'(i)g, cálido subhúmedo, con una precipitación pluvial media anual de 984 mm al año. La temperatura media anual es de 26.5°C, con una máxima de 40°C en abril y una mínima de 18.8°C en diciembre (Orellana *et al.*, 1999).

Después de la extracción de los minerales (cal, polvo y gravilla) las minas se abandonan, dejando expuesto el aquitardo calcáreo que presenta valores de pH 8.3, sin materia orgánica, N, K y P aprovechable 1 mg kg⁻¹ (Castillo y Cervera, 1998).

Las especies estudiadas, *L. leucocephala*, *G. sepium*, *G. ulmifolia* y *A. lebeck* fueron trasplantadas en agosto de 1994, en un suelo preparado mediante una nivelación del terreno y después se realizó un relleno con una capa de 25 cm de espesor de tierra mezclada con piedras de desecho del proceso de extracción de material. El área experimental fue de 2 176 m². Las cuatro especies arbóreas se distribuyeron al azar en cada bloque y en cada uno de estos se colocaron 15 plantas de cada especie, a una distancia entre planta de 2 m y 4 m entre hileras. Entre los callejones del cultivo fue establecido el pasto estrella (*C. nlemfuen-sis*). A partir de su establecimiento, el área experimental se mantuvo libre de arvenses y de la competencia excesiva del pasto estrella.

El estudio se dividió en tres etapas, las cuales se realizaron en el orden siguiente: 1) Cuantificación del rendimiento del follaje y composición química del mismo; 2) Degradabilidad *in situ* de la materia seca (MS) y proteína cruda (PC); y 3) Evaluación de la preferencia del follaje de las cuatro especies en estudio.

Toda la información se integró en una gráfica de "Araña" mediante la conversión de los parámetros medidos a valores relativos en porcentaje, tomando como 100% el valor más alto de cada variable medida.

RENDIMIENTO DEL FOLLAJE Y COMPOSICIÓN QUÍMICA

Para la estimación del rendimiento de follaje los procedimientos empleados se basaron en un corte de homogeneización de las plantas a un metro de altura sobre el nivel del suelo. El material derribado, fue retirado de cada unidad experimental. No se empleó riego ni fertilización, salvo un control de hierbas en cada cosecha o corte del follaje. El rendimiento de follaje fue estimado en dos periodos el primero abarcó de junio de 1996 a marzo de 1997 y el segundo de julio de 1997 a marzo de 1998, que correspondió a la

evaluación del rendimiento de follaje y proporción de la hoja, considerando para ello tres épocas, de lluvia, norte y seca de cada año, por su lado el análisis de la composición química, consideró dos épocas, la lluvia de 1997 y la seca de 1998.

Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas. Las parcelas grandes fueron los años (1996-1997 y 1997-1998) y las parcelas chicas las épocas (Seca, norte y lluvia). Los tratamientos fueron las especies (*L. leucocephala*, *G. sepium*, *G. ulmifolia* y *A. Lebeck*). La unidad experimental fue una hilera de 15 árboles y se contó con cuatro repeticiones. El análisis se realizó para dos periodos.

El rendimiento de materia seca (MS) del follaje se estimó de los valores obtenidos al pesar el rendimiento de materia fresca de cada unidad experimental y tomar una submuestra representativa de 700 g y someterlas al secado en una estufa de aire forzado a una temperatura de 60°C durante 48 horas, previa separación manual de hoja y tallo.

Una parte de la muestra de 400 g fue deshidratada a una temperatura de 70°C durante 72 h para medir la materia seca; otra muestra, fue tomada para cuantificar la relación hoja y tallo. Se tomó como hoja, la porción de la planta conocida como lámina y peciolo con tallos menores de 5 mm de diámetro y como tallos todos aquellos con un diámetro mayor de 5 mm.

Las muestras fueron molidas y tamizadas con una criba de 3 mm y luego de 1 mm de diámetro. Los análisis químicos realizados fueron: Proteína cruda, fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA) y lignina (van Soest y Wine 1967); Cenizas (Hart y Fisher, 1971); y Fenoles (Price y Butler, 1977). Todas las muestras se analizaron por duplicado.

Se realizó el análisis estadístico del rendimiento del follaje para cada uno de los dos ciclos correspondientes a las estaciones, 1996-1997 y 1997-1998 y para la composición química de un solo ciclo. A los resultados se les aplicó un análisis de varianza de acuerdo al modelo señalado (SAS, 1985) y comparaciones de medias aplicando la prueba de rango múltiple de Duncan (Steel y Torrie, 1993). Los datos de precipitación acumulada durante la producción de follaje y los de rendimiento de follaje se describieron con un modelo exponencial con el fin de evaluar su respuesta a dicha variable ambiental.

DEGRADABILIDAD *IN SITU* DE MATERIA SECA Y PROTEÍNA CRUDA

Se utilizaron tres bovinos hembras de aproximadamente 4 años de edad, cruzadas de cebu/holandés con un peso de 430 ± 7.1 kg, provistas de cánulas ruminales. Las mediciones de degradabilidad de la MS y PC del follaje, se determinaron por la técnica de degradación ruminal *in situ*, utilizando bolsas de nylon (Kempton, 1980; Orskov *et al.*, 1980). A los animales se les suministró forraje fresco de

pasto taiwán (*Pennisetum purpureum*) picado y alimento de una mezcla de soya y sorgo (70:30%) con una concentración de 18% de proteína cruda.

Una vez secas las muestras del follaje de los árboles a un peso constante en la estufa a 60°C durante 48 horas, fueron molidas a 3 mm de diámetro. Posteriormente, se pesaron 5 g de muestra en una balanza analítica y colocada dentro de las bolsas de nylon, las cuales se amarraron con una liga;

Las muestras se incubaron dentro del rumen por duplicado en orden regresivo dentro de una bolsa de corsetería provista con cierre, previo lavado con agua a temperatura ambiente. Los tiempos de incubación fueron de 6, 12, 24, 48, 72 y 96 horas. Al finalizar el período de incubación, las bolsas se extrajeron del rumen y se congelaron para su posterior procesamiento. Las bolsas fueron descongeladas y lavadas por cinco intervalos de 5 minutos. Las muestras se secaron a 60° C por 72 h. La desaparición de MS se estimó como la diferencia entre el material original incubado y el remanente de la bolsa después de la incubación. El material se mezcló, por cada tiempo de incubación, para el análisis de PC a través del método de Kjeldahl. El tiempo cero de cada muestra fue medido en bolsas de nylon por duplicado.

La degradación ruminal de la MS y PC se evaluó aplicando la ecuación exponencial descrita por Orskov y McDonald (1979) utilizando el programa GraphPad Prism. Ver. 2.0 1994-1997.

PREFERENCIA DE CONSUMO DEL FOLLAJE DE ESPECIES ARBÓREAS POR OVINOS

Se utilizaron cuatro ovinos hembras de la raza pelibuey con una edad aproximada de siete meses y peso vivo promedio de 19.9 ± 1.6 kg. Antes de iniciar la prueba, a los

animales se les suministró un tratamiento contra parásitos internos y externos (Ivermectina al 1%) y un complejo vitamínico (Vigantol ADE).

Los animales no tuvieron acceso previo al follaje de las especies bajo estudio. Cada uno de los animales se distribuyó al azar en corrales individuales de 3 por 3 m, el agua se mantuvo durante todo el experimento en un lugar fijo. Cada uno de los corrales tenía cuatro comederos y un bebedero.

La preferencia del follaje se evaluó en términos de consumo de MS, por diferencia entre lo ofrecido y lo rechazado. El follaje se suministró de acuerdo al peso vivo (3.2%) más un 15% con la fin de que siempre hubiera rechazos. Los alimentos se suministraron cuatro veces al día, a las 10, 12 h, 15 y 18 h.

El follaje de *L. leucocephala*, *G. sepium*, *G. ulmifolia* y *A. lebbeck*, (hojas y tallos comestibles) fue proporcionado a los animales el mismo día en fresco, como alimento único. Las muestras de follaje no consumido se tomaron todos los días por la mañana antes del nuevo suministrarlo para medir el rechazo en cada corral y período. A dichas muestras se pesaron previo secado en la estufa a 60° C por 48 horas.

Se utilizó un diseño experimental de cuadrado latino múltiple (Mead, 1988). Este diseño se aplicó con base en una propuesta de Borman *et al.*, (1991) modificada. Se utilizó una serie de cuadrados latinos 4x4, donde los renglones fueron los días, las columnas las esquinas de los corrales y los tratamientos el follaje de las arbóreas. Cada animal formó parte de un cuadrado latino. el follaje de cada especie fue puesto en diferente esquina del corral cada día, de tal forma que cada material ocupaba una esquina diferente cada día para prevenir el condicionamiento a la posición del forraje en el corral por parte de los animales. Se llevó a cabo la prueba en forma simultánea para los cuatro animales por cuatro días. A los resultados se les aplicó un análisis de varianza (SAS, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RENDIMIENTO DE FOLLAJE DE LOS ÁRBOLES

G. sepium y *G. ulmifolia* produjeron rendimientos similares de follaje, superiores a los producidos por *L. leucocephala* y a *A. lebbeck* en el primer año. En tanto, en el segundo año, el rendimiento se incrementó en todas las especies desde 15% para *A. lebbeck* hasta 45% para *G. ulmifolia*.

El rendimiento de follaje estuvo, como se esperaba, asociado a la precipitación pluvial. Así, *G. sepium*, *G. ulmifolia* y *L. leucocephala* se ajustaron mejor al modelo de regresión exponencial con ($R^2 = 0.83, 0.98$ y 0.94) respectivamente, mientras que *A. lebbeck* se ajustó a una regresión lineal ($R^2 = 0.76$) (Fig. 1). De tal forma que a medida que aumenta la precipitación pluvial, se incrementó el

rendimiento de MS. Esto indicó que *G. ulmifolia* y *G. sepium*, respondieron con mayores rendimientos ante una mayor disponibilidad de humedad, aprovechándola de este modo para una rápida recuperación de sus rebrotes.

La correlación del rendimiento de MS con la precipitación pluvial hace suponer que la aplicación de riego durante la época seca será de gran importancia para el aumento de la producción de forraje, principalmente en *G. ulmifolia* y *G. sepium*.

La relación que guardó la proporción de hoja – tallo reviste gran importancia desde el punto de vista de la calidad de las especies forrajeras, ya que en la hoja se encuentra la mayor concentración de nutrimentos. El porcentaje promedio de hoja en los dos años osciló de 55 a 74% entre las especies, observándose mayor valor para *G. sepium*.

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Ferraris (1979) y Topark-Ngarm (1983) quienes encontraron un porcentaje de hoja superior a 50% a intervalos de corte menores o iguales a 60 y 90 días. Lo que indica que las especies estudiadas en este trabajo fueron defoliadas en la etapa en que aparentemente se obtiene alta producción de biomasa y mayor relación de hoja - tallo, la cual se alcanza, según Stur *et al.*, (1994) entre las 10 y 12 semanas como máximo para algunas especies.

En la época de seca todas las especies produjeron un porcentaje mayor de hoja que en la época de lluvia (Fig. 2). Este cambio se atribuyó a que las plantas tuvieron un crecimiento lento causado por estrés hídrico, afectando la diferenciación de tejidos nuevos y la expansión de los ya formados, así como una reducción de la tasa fotosintética evitando con ello la maduración rápida de la planta, logran-

do que las especies conservaran el mayor porcentaje de hoja en el tallo (Slater, 1969).

La relación que guardó la proporción de hoja – tallo reviste gran importancia desde el punto de vista de la calidad de las especies forrajeras, ya que en la hoja se encuentra la mayor concentración de nutrimentos. El porcentaje promedio de hoja en los dos años osciló de 55 a 74% entre las especies, observándose mayor valor para *G. sepium*. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Ferraris (1979) y Topark-Ngarm (1983) quienes encontraron un porcentaje de hoja superior a 50% a intervalos de corte menores o iguales a 60 y 90 días. Lo que indica que las especies estudiadas en este trabajo fueron defoliadas en la etapa en que aparentemente se obtiene alta producción de biomasa y mayor relación de hoja - tallo, la cual se alcanza, según Stur *et al.* (1994) entre las 10 y 12 semanas como máximo para algunas especies.

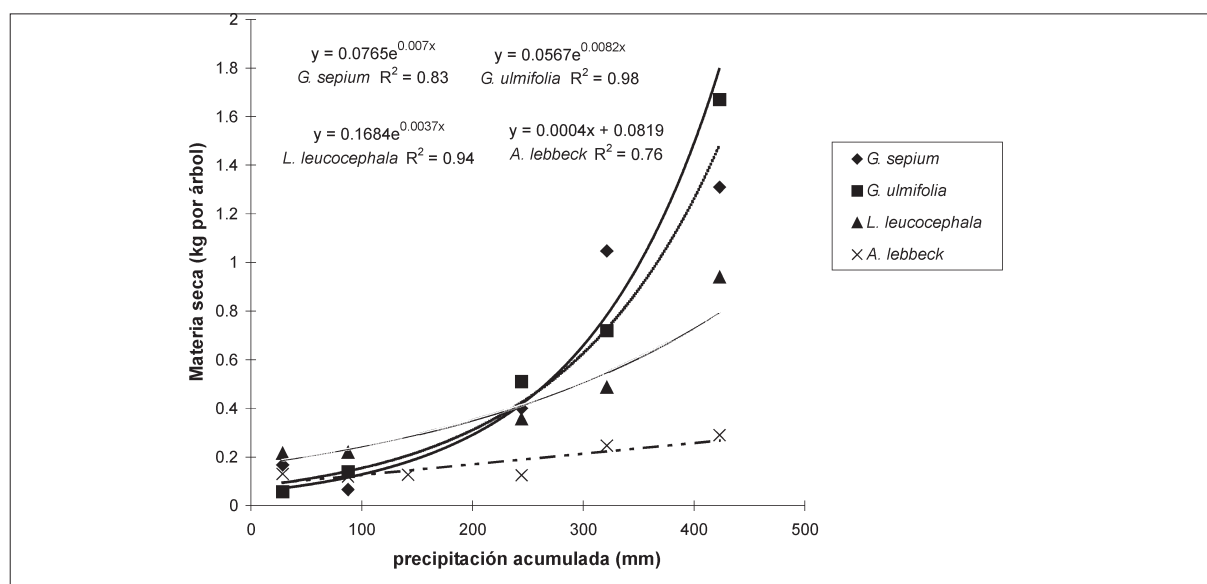


Figura 1. Efecto de la precipitación pluvial en el rendimiento de follaje de cuatro especies arbóreas en un suelo de cantera

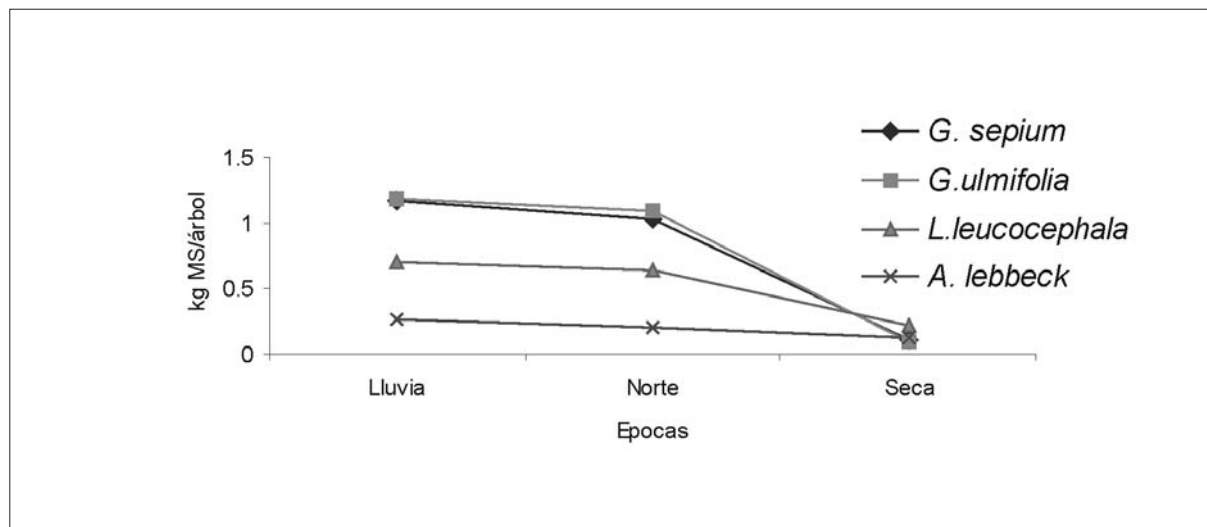


Figura 2. Rendimiento de follaje entre especies y efecto de las épocas en un suelo de cantera en el sur de Yucatán

Tabla 1. Rendimiento de follaje de cuatro especies arbóreas y efecto de la época en un suelo

Especies	kg MS árbol ⁻¹ (96-97)	corte ⁻¹ (97-98)	kg MS ha ⁻¹ corte ⁻¹ (96-98)
<i>G. sepium</i>	0.54 a	1.02 a	975.0 a
<i>G. ulmifolia</i>	0.43 a b	1.16 a	993.7 a
<i>L. leucocephala</i>	0.35 b	0.70 b	656.2 b
<i>A. lebbeck</i>	0.17 c	0.23 c	250.0 c
E.E	0.08	0.16	0.12
Épocas			
Lluvia	0.60 a	1.03 b	1 018.7 b
Norte	0.34 b	1.09 b	893.7 b
Seca	0.14 c	0.14 c	175.0 c
E.E	0.06	0.12	0.09

Medias con mismas literales dentro de columnas no son estadísticamente diferentes ($P>0.05$) según la prueba de rango múltiple de Duncan. E.E = Error estándar. Árboles/ha = 1 250

La diferencia entre la mayor producción de hoja en la época seca que en la de lluvia puede atribuirse al crecimiento lento de las plantas causado por estrés hídrico, afectando la diferenciación de tejidos nuevos y la expansión de los ya formados, así como una reducción de la tasa fotosintética evitando con ello la maduración rápida de la planta, logrando que las especies conservaran el mayor porcentaje de hoja en el tallo (Slater, 1969).

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL FOLLAJE DE ÁRBOLES

La composición química de la hoja y tallo mostró variación en los contenidos de PC, FDN, FDA, LIG, CEN y FEN entre especies (Tabla 3). Así la hoja presentó de 14 a 23% de PC para la *G. ulmifolia* y *L. leucocephala*, respectivamente. Estos valores de PC son considerados altos comparados con los valores de los pastos tropicales, los cuales oscilan entre 3 y 10% de PC (Fig. 3). Estas diferencias de los valores altos de la PC en el período seco se atribuyen a

Tabla 2. Efecto de la especie y la época en el porcentaje de la hoja de cuatro arbóreas

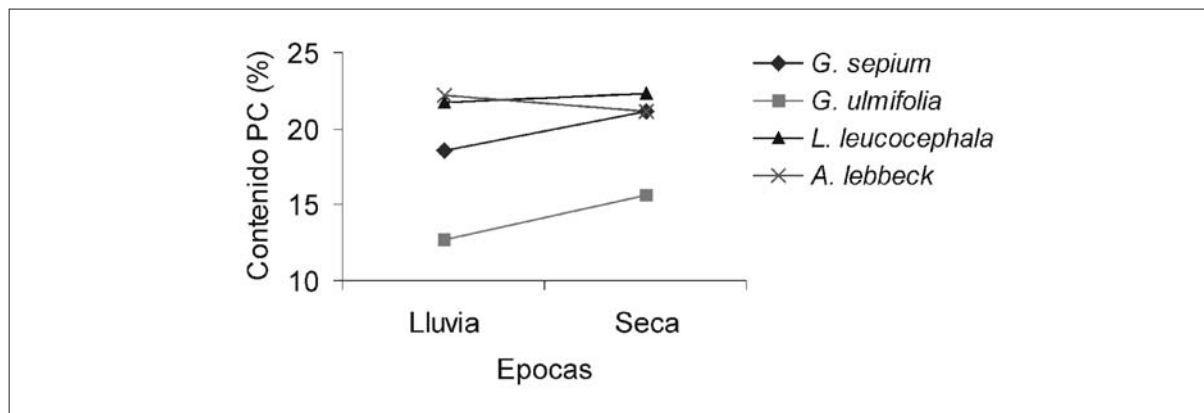
Porcentaje de hoja por ciclo (%)		
Especie	(1996-1997)	(1997-1998)
<i>G. sepium</i>	73.0 a	75.0 a
<i>A. lebbeck</i>	68.0 a	62.0 b
<i>G. ulmifolia</i>	60.0 b	55.0 b
<i>L. leucocephala</i>	52.0 c	58.0 b
E. E	3.2	3.2
Época		
Seca	73.0 a	70.0 a
Norte	57.0 b	61.5 b
Lluvia	56.5 b	53.0 c
E. E	2.8	2.6

Medias dentro de columnas con mismas literales no son diferentes ($P>0.05$). EE= Error estándar de las medias.

que durante el estrés hídrico las plantas reducen el crecimiento, manteniéndose en estado joven con mayor valor nutritivo.

En la hoja se encontró una mayor concentración de fenoles totales (0.57%) que en el tallo, con intervalos de 0.3 a 1.1 y 0.2 a 0.7%, respectivamente (Tabla 3). En la época de lluvia se presentó mayor contenido de fenoles (0.9%) en la hoja, que en la época de seca (0.5%). Estos valores son bajos comparados con otras leñosas que llegan a tener de 6 a 10%. Estos niveles de fenoles resultan inofensivos para los rumiantes cuando son alimentados con follaje de árboles.

Los valores elevados de la PC en el período seco se atribuyen a que durante el estrés hídrico las plantas reducen el crecimiento, manteniéndose en estado joven con mayor valor nutritivo. Los valores de PC en el follaje de los árboles forrajeros estudiados se encuentra entre el intervalo de 14.2 a 22.8% valores superiores al contenido de PC de cualquier pasto, como por ejemplo el pasto estrella contienen el 6% de PC. Los contenidos de fenoles en el follaje resultaron inofensivos para los rumiantes.

**Figura 3.** Efecto de la época sobre el contenido de PC en el follaje de especies arbóreas en un suelo de cantera en el sur de Yucatán

DEGRADABILIDAD RUMINAL IN SITU DE MS Y PC

La degradación ruminal de MS de la hoja de las especies evaluadas después de 96 h de incubación, se encontró entre 81.4 y 73.2%. Estos resultados son inferiores a lo re-

portado por Febles y cols. (1987), al estudiar la digestibilidad *in situ* de dos variedades de *L. Leucocephala*: peruana (Cubana) y cunningham, con valores de 83.3 y 84.5% de la hoja y tallos comestibles. La degradabilidad del forraje de especies arbóreas, como la de *L. leucocephala* es del mismo orden que la de otras leguminosas que están entre el 50 y el 70%.

Tabla 3. Composición química de la hoja y tallo de cuatro especies arbóreas en un suelo de cantera en el sur de Yucatán.

Componentes (%)						
Especies	PC	FDN	FDA	LIG	CEN	FEN
Hoja						
<i>L. leucocephala</i>	23.0 a	45.0 b	25.0 b	12.0 b	10.0b	0.9 b
<i>A. lebbeck</i>	22.0 a	52.0 a	31.5 a	11.0 b	9.0c	0.3 c
<i>G. sepium</i>	20.0 b	44.0 b	30.0 ac	16.0 a	11.0a	0.3 c
<i>G. ulmifolia</i>	14.0 c	44.0 b	27.5 bc	12.0 b	10.0b	1.1 a
E. E	0.5	2.5	0.9	0.7	0.2	0.1
Épocas						
Seca	20.0 a	52.0 a	30.0 a	14.0 a	10.0a	0.5 b
Lluvia	19.0 b	41.0 b	28.0 b	12.0 b	10.0a	0.9 a
E. E	0.2	0.9	0.7	0.4	0.1	0.1
Tallo						
<i>L. leucocephala</i>	7.0 a	80.0 a	60.0 a	21.0 a	4.0c	0.3 b
<i>A. lebbeck</i>	8.0 a	79.0 ac	56.0 b	17.0 a	4.5c	0.3 b
<i>G. sepium</i>	8.0 a	77.0 bc	54.0 b	19.0 ac	6.0a	0.2 b
<i>G. ulmifolia</i>	4.0 b	76.0 b	56.0 b	18.0 ac	5.0b	0.7 a
E. E	0.4	1.0	1.6	1.7	0.3	0.1
Épocas						
Seca	7.0 a	78.0 a	59.0 a	20.0 a	5.0a	0.3 b
Lluvia	7.0 a	78.0 a	55.0 b	17.0 b	5.0a	0.5 a
E. E	0.2	0.6	0.6	0.1	0.1	0.1

Medias con mismas literales en columnas no difieren significativamente ($P>0.05$); PC = Proteína cruda; FDN = Fibra detergente neutro; FDA = Fibra detergente ácida; LIG = Lignina; CEN = Cenizas; FEN = Fenoles; E. E = Error estándar.

Tabla 4. Degradación ruminal *in situ* (%) de la MS de las hojas de cuatro especies arbóreas en el sur de Yucatán

Especies				
Parámetros	<i>G. ulmifolia</i>	<i>G. sepium</i>	<i>L. leucocephala</i>	<i>A. lebbeck</i>
a+b	80.6 a	81.4 a	73.2 b	73.4 b
a	18.1 a	19.9 a	36.4 b	35.2 b
	(4.9)	(3.5)	(2.5)	(3.1)
b	62.5 a	61.4 a	36.8 b	38.2 c
	(4.6)	(3.4)	(2.3)	(2.9)
c % h	7.3 a	10.2 b	4.8 c	7.8 d
	(0.9)	(0.7)	(0.7)	(0.9)
A (T0)	13.3	19.4	19.5	19.8
Lag	0.0	0.0	0.0	0.0
R ²	0.98	0.99	0.98	0.99
RSD	2.98	1.48	2.17	1.75

Medias en hileras con mismas literales no son significativamente diferentes ($P>0.05$), (Error estándar), A(T0) = Tiempo cero, Lag = Fase de retraso, RSD = Desviación estándar residual, R² = Coeficiente de correlación.

Tabla 5. Degradabilidad ruminal *in situ* de la PC de la hoja de cuatro especies arbóreas.

Parámetros	Especies			
	<i>G. ulmifolia</i>	<i>G. sepium</i>	<i>L. leucocephala</i>	<i>A. lebbeck</i>
	Porcentaje (%)			
a+b	93.1 a	91.9 b	83.4 c	89.6 d
a	0.5 a	20.9 b	37.6 c	34.4 c
	(4.6)	(3.3)	(1.7)	(2.8)
b	93.6 a	70.9 b	46.0 c	55.2 d
	(4.3)	(3.2)	(1.5)	(2.7)
c % h	7.4 a	9.4 b	4.8 c	11.3 d
	(0.6)	(0.6)	(0.4)	(0.7)
A (TO)	31.0	34.7	36.7	37.0
Lag	5.6	2.3	0	0.4
R ²	0.98	0.99	0.98	0.99
RSD	2.77	1.	1.50	1.02

Medias en hileras con mismas literales no son significativamente diferentes ($P>0.05$), PC = Proteína cruda, (Error estándar), A(TO)= Tiempo cero, Lag = Fase de retraso, RSD = Desviación estándar residual, R^2 = Coeficiente de correlación.

Tabla 6. Preferencia de la hoja de cuatro especies arbóreas por ovinos.

Especies	g MS/kgPV ^{0.75}
<i>Leucaena leucocephala</i>	32.4 a
<i>Guazuma ulmifolia</i>	25.8 a
<i>Gliricidia sepium</i>	14.2 b
<i>Albizia lebbeck</i>	7.2 b
E.E	2.8

Valores en columnas con las mismas literales no difieren significativamente ($P>0.05$) según la prueba de Tukey (Steel y Torrie, 1993). MS = Materia seca, E.E = Error estándar.

La mayor degradación ruminal de MS obtenida en el experimento correspondió a *G. sepium* y *G. ulmifolia* este comportamiento se asoció con una concentración menor de FDN. El follaje de las arbóreas con altas concentraciones de FDN reducen la degradación de la MS como resultado de un mayor contenido de material indigestible provocando una mayor resistencia a la actividad microbiana (van Soest 1982; Nsahlai *et al.*, 1994). También la degradación ruminal de la PC puede ser considerada como muy alta, a fue de 93.1 y 91.9 para la *G. ulmifolia* y la *G. sepium*, respectivamente (Tabla 5).

La degradación ruminal del follaje de *G. sepium* y *G. ulmifolia* presentó valores mayores a lo que se reporta en la literatura, ya que el follaje cosechado quizá fue un material inmaduro con mayor porcentaje de hoja, por lo que éstas tuvieron una mayor tasa de degradación. En las especies evaluadas la concentración de fenoles no afectó la degradación de MS (Tabla 4), como fue observado en el contenido alto de fenoles en la hoja de *G. ulmifolia* con 1.1% en relación a las otras especies (van Soest 1982; Nsahlai *et al.*, 1994). Los valores de la degradación ruminal de la PC en la hoja de las especies estudiadas fueron mayores (Fig. 5) a las reportadas por Aii y Stobbs (1980) para *L. Leuco-*

cephala y a las reportadas por Alayón *et al.*, (1998) para *G. sepium* y *G. ulmifolia*.

El follaje cosechado fue un material no leñoso o inmaduro, por lo que tal vez influyó en la tasa de degradación ruminal de MS que fue superior al 73.2%, y para la PC mayor de 83.4%. Los compuestos antinutricionales al parecer no influyeron en la degradación ruminal de los ovinos pero es posible que tengan influencia en la preferencia.

PREFERENCIA DEL FOLLAJE DE ESPECIES ARBÓREAS POR OVINOS

L. leucocephala y *G. Ulmifolia* fueron las especies de mayor preferencia, contrario a la *G. sepium* y la *A. lebbeck*. Norton (1994) señala que el consumo de forrajes por los rumiantes está en función de la presencia de compuestos fenólicos y taninos, los que pueden afectar el apetito del animal. Aunado a otros factores como el grado de adaptación de los animales y salud del animal; sin embargo, en este estudio, los ovinos manifestaron una mayor preferencia por las plantas que presentaron menores contenidos de FDA ($R^2 = -0.98$) (Fig. 6).

CONSIDERACIONES PARA EL MANEJO DE LAS PLANTAS

G. ulmifolia presenta una alta producción de follaje con una mediana proporción de hojas, alta tasa de degradabilidad de MS y PC, una preferencia de consumo alta; sin embargo, también es la especie de menor contenido de PC, a pesar de lo cual, es la especie más exitosa para la producción de forraje en suelo de cantera. La aplicación de riego y abono orgánico son dos prácticas agronómicas que permitirá lograr una mayor producción de follaje (Fig. 7).

L. leucocephala es la especie arbórea que se coloca en un segundo lugar de recomendación para ser utilizada en la producción de forraje, es la especie de mayor consumo por parte de los ovinos, es de alta degradabilidad de su MS y PC, presenta altos contenidos de PC y es posible que fije cantidades importantes de N_2 ya que desde plántula presenta nódulos. La producción fue tan solo el 66% comparado con *G. ulmifolia* y su proporción de hojas es la de menor valor relativo. Esta especie puede recibir cortes en periodos más cortos, en campo se ha podido observar una recuperación de follaje en 30 días. También es posible aumentar la densidad de plantas por hectárea para aumentar la producción de follaje.

G. sepium es la especie de mayor potencial para la producción de forraje en las minas de cal abandonadas, su degradabilidad tanto de MS como de PC es alta; sin em-

bargo su preferencia de consumo por parte del ganado ovino es baja. Esta característica indeseable puede reducirse al mezclar diferentes sustratos con diversas dosis de suplemento para encontrar una relación óptima con suplemento de *G. sepium* que sea aceptada por los animales.

A. lebbeck presentó una producción de materia seca muy baja, del 25% en comparación con *G. ulmifolia* lo cual ocasiona que se descarte para el uso forrajero, aún cuando si cumple con la parte estética del sitio recuperado.

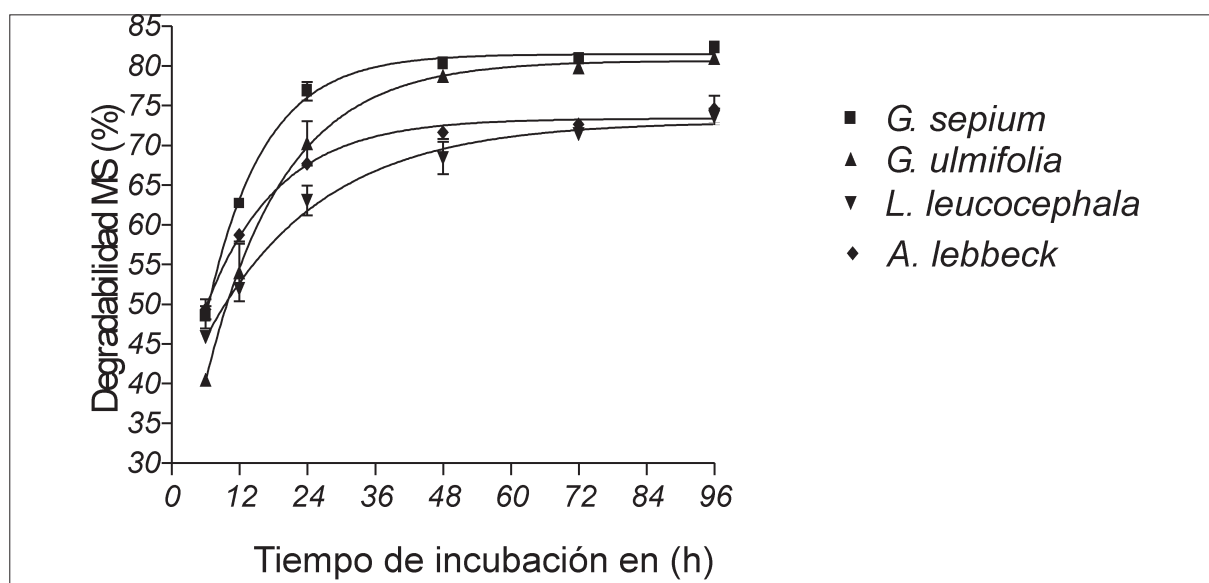


Figura 4. Degradabilidad ruminal *in situ* de MS de las hojas de cuatro especies arbóreas.

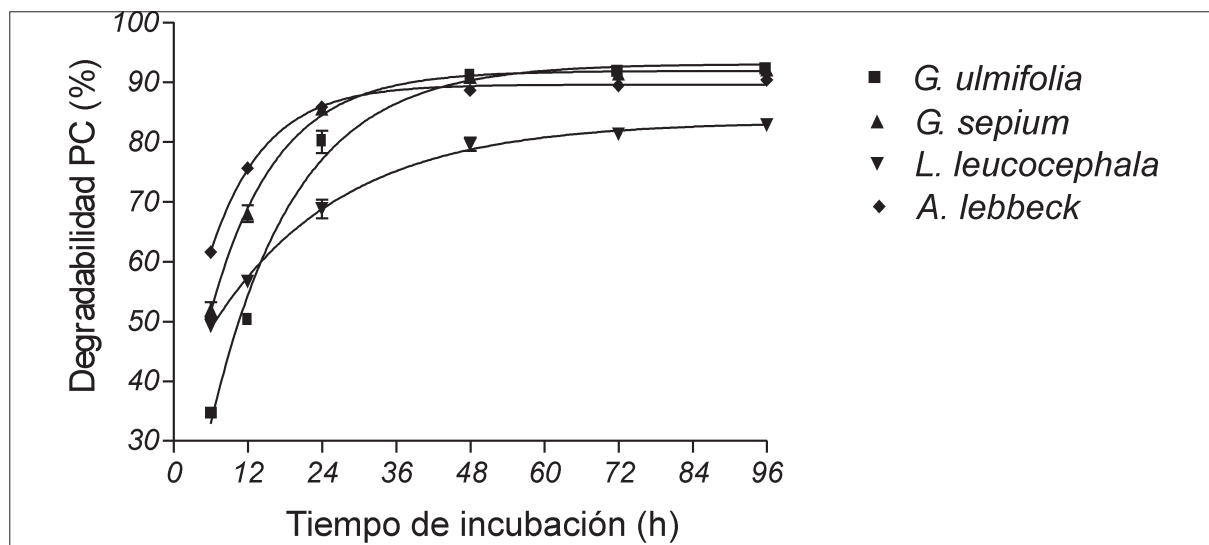


Figura 5. Degradabilidad ruminal *in situ* de PC de las hojas de cuatro especies arbóreas.

CONCLUSIONES

Los contenidos altos de FDN y FDA en el follaje de los árboles, limitan la degradabilidad ruminal de la MS y PC. Las concentraciones altas de fenoles totales no siempre interfieren la degradabilidad ruminal y el consumo.

G. sepium y *G. ulmifolia* fueron las especies que presentaron los valores de degradación ruminal de MS y PC mayores. Estas plantas responden favorablemente a la precipitación pluvial.

La preferencia del follaje en ovinos fue más alta para *L. leucocephala* y *G. ulmifolia*.

Por el rendimiento de follaje, la proporción de hojas, el contenido de proteína, degradabilidad de MS, degradabilidad de PC y la preferencia del follaje por el ganado ovino, las plantas de mayor potencial de uso forrajero dentro de las canteras son, en orden descendente, *G. ulmifolia*, *L. leucocephala* y *G. sepium*, se sugiere el aprovechamiento integral de acuerdo a las ventajas relativas que cada una ofrece al sistema de producción. Por otro lado, *A. lobbeck* bajo el esquema de manejo a que fue sometida no se recomienda como planta forrajera.

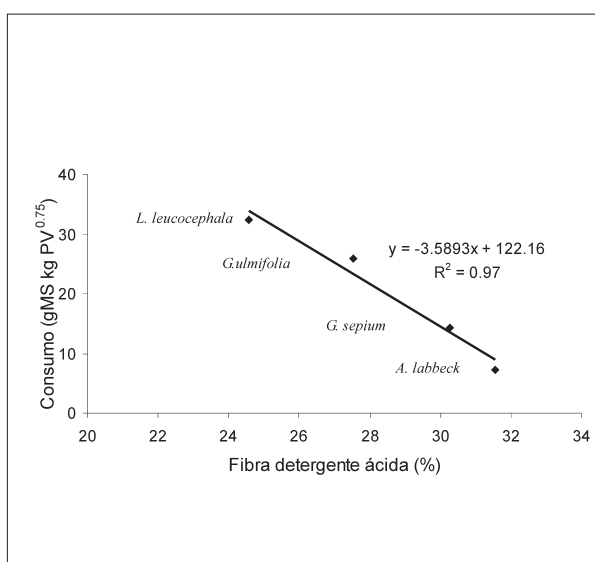


Figura 6. Relación entre la preferencia del consumo de MS del follaje de árboles por ovinos y la concentración de FDA del follaje.

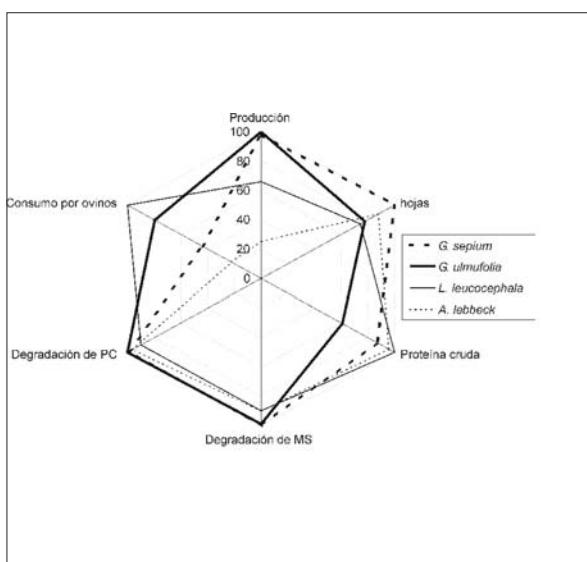


Figura 7. Comparación relativa de las características del follaje de árboles forrajeros establecidos en minas de cal abandonadas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de estudios del primer autor y al proyecto CONACYT (31624-B). A Materiales Anillo Periférico S. A, por las facilidades para la conducción de la investigación, en particular al Ing. Héctor Buenfil y al MVZ Augusto Cervera.

REFERENCIAS

- Aii, T y T. Stobbs, 1980.** Solubility of the protein of tropical pasture species and the rate of its digestion in the rumen. *Animal Feed Science and Technology*. 5:183-192.
- Alayón, J., L. Ramírez y J. Kú, 1998.** Intake, rumen digestion and microbial nitrogen supply in Pelibuey sheep feed *Cynodon nlemfuensis* and supplemented with foliage of *Gliricidia sepium*. *Agroforestry Systems*. 41:115-126.
- Araya, J., J. Benavides, R. Arias y A. Ruiz, 1994.** Identificación y caracterización de árboles y arbustos con potencial forrajero. En: J.E. Benavies, ed. Árboles y Arbustos forrajeros en América Central. Vol. 1. Serie Técnica. Informe técnico No. 236. Turrialba Costa Rica. CATIE. p 31-64.
- Bautista-Zúñiga, F., J. Jiménez-Osornio, J. Navarro-Alberto, A. Manu y R. Lozano, 2003.** Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra*. 21: 1-11.
- Blair, G. D. Catchpoole y P. Horne, 1990.** Forage tree legumes, their management and contribution to the nitrogen economy of wet and humid tropical environments. *Advances in Agronomy*. 44: 27-75.
- Borman, M.M, D. Adams, B.W. Knapp y M.R. Haferkaap, 1991.** Evaluation of dietary preference with a multiple latin square design. *J. Range Management*. 44 (3): 295-296.
- Cáceres, O. 1998.** Valor nutritivo del follaje de árboles y arbustos tropicales. III. A. *Iebbbeck. Pastos y forrajes*, 21:93-97.
- Castillo, J. y A. Cervera, 1998.** La recuperación de canteras con sistemas agrosilvopastoriles en Yucatán, México. *Red Gestión de Recursos Naturales*. 2ª. Época. (10) 46-52.
- Febles, G. M. Monzote y E. T. Ruiz, 1987.** La planta. En: T. E. Ruiz y G. Febles ed., *Leucaena* una opción para la alimentación bovina en el trópico y subtropico. Edit. Del Instituto de Ciencia Animal. La Habana, Cuba. pp 3-29.
- Ferraris, R. 1979.** Productivity of *Leucaena leucocephala* in the tropics of north Queensland. *Tropical Grassland. Australia*. 13 (1): 20-27.
- Flores, S., 1994. Flores, J. y I. Espejel, 1994.** Etnoflora yucatanense. Tipos de vegetación de la península de Yucatán. México. UADY. Pág. 73.
- Gutteridge, R.C y H. Shelton, 1994.** The role of forage Tree Legume in cropping and grassing systems. In: Gutteridge, R.C; Shelton, H.M., eds. Forage tree legume in tropical Agriculture. Wallingford, G.M., CAB International. pp. 3-14.
- Hart, L.F. y H.J. Fisher, 1971.** Análisis modernos de los alimentos. 1ª. Ed. Edit. Acribia. España.
- Hernández, M., 1988.** Efectos de las podas al final de la época de lluvia en cercos vivos de piñón cubano (*Gliricidia sepium*) sobre la producción y calidad nutritiva de la biomasa en la época seca. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C. R., CATIE. P 84.
- Kempton, T. J., 1980.** El uso de bolsa de nylon para caracterizar el potencial de degradabilidad de los alimentos para el rumiante. *Producción Animal Tropical*. 5: 115-126.
- Mead, R., 1988.** The design of experiments for practical applications. First Published. University Cambridge Press. New York. p 176-193.
- Meléndez, N. F., 1997.** Manejo de praderas para Tabasco. INIFAP, Produce. Fundación Produce tabasco, A. C., Villahermosa, Tabasco. p. 64-68
- Minitab Windows V. 12.23,1999.** State College, USA.
- Murgueitio, R, M. Rosales, M. Gómez,1999.** Agroforestería para la producción animal sostenible. CIPAV. Cali, Valle, Colombia. p 2-3
- Nava, M. F., 1999.** Extracción de calizas en la Ciudad de Mérida. Estudio de Caso. Atlas de procesos territoriales en la Península de Yucatán. Mérida, Yucatán. p. 230
- Norton, B.W., 1994a.** Anti-nutritive and toxic factors in forage tree legumes. En: Gutteridge, R.C; Shelton, H. M., eds. Forage Tree legumes in tropical Agriculture. Wallingford, G.B., CAB International. pp. 202-215.
- Nsahlai, I.V., D. Siaw y P.O. Osuji, 1994.** Tha relationships between gas production and chemical composition of 23 browses of the genus *Sesbania*. *Journal of the Science of food and Agriculture*. 65: 13-20.
- Orellana, R., M. Balam, I. Bañuelos, E. García, J. González-Iturbe, F. Herrera, J. Vidal, 1999.** Evaluación climática. En: Atlas de procesos territoriales de Yucatán. A. García y J. Córdova (Eds). Universidad Autónoma de Yucatán.
- Oropeza, O. O., 1999.** Impacto ambiental y peligros naturales en la Península de Yucatán. En: Oropeza, O. O. (Resp). Cap. 111.7. Impacto ambiental. Atlas de procesos territoriales de Yucatán. UADY. pp. 251-252.
- Orskov, E. R. y I. Mc Donald, 1979.** The estimation of protein degradability in the from incubation measurements weighted according to rate of passage. *Journal of Agricultural Science, (G.B)* 92: 449-54.
- Orskov, E., F. D. Hovell y F. Mould, 1980.** The use of nylon bag technique for the evaluation of feedstuffs. *Trop. Anim. Prod.* 5: 195-213.
- Price, L.M y G.L. Butler, 1977.** Rapid visual estimation and spectrophotometric determination of tannin concents of sorghum grain. *Journal of Agriculture and food Chemistry*. Vol. 25: 1268-1273.
- SAS, 1985.** SAS/STAT guide for personal computers. Version 6 Ed. Carv. NC: SAS Institute, Inc.
- Simmons, A. J. y J.L. Stewart, 1994.** *Gliricidia sepium* multipurpose forage tree legumes in Tropical Agriculture. Ed. Gutteridge, R.C y Shelton, H.M. England: Ed. CAB. International. pp 31-47.
- Slater, P. J., 1969.** Physiological significance of internal water relations to crop yield. In Physiological aspects of crop yield (J. D. Eastin *et al*, eds) Amer. Soc. Agron. Madison, Wisconsin. pp. 53-79.
- van Soest, P. y R.H. Wine, 1967.** Use of detergents in Analysis of fibrous feed. IV. Determination of plant Cell-Wall Constituents *J. Assoc. of Anual. Chemical*.
- van Soest, P.,1982.** Voluntary intake in relation to chemical composition and digestibility. *J. Animal. Sci.*, 24: 834-843.
- Steel, G. R. D. y H. J. Torrie, 1993.** Bioestadística: principios y procedimientos. 2ª. Edición. Mc Graw-Hill. México. 622 p.
- Stur, W, H. Shelton, R. Gutteridge, 1994.** Defoliation and management of forage tree Legumes. En: Gutteridge, R. C; Shelton, H.M., eds. Forage Tree Legumes in tropical Agriculture. Wallingford, CAB, International. pp. 144-157.
- Topark-Ngarm, A., 1983.** Testing shrub legumes for forage crops in northeast Thailand. *Leucaena Research Reports*. NFTA. 4: 77-78.
- Torres, F., 1983.** Role of woody perennials in animal husbandry. *Agroforestry Systems*. 1: 131-139.

LA MACROFAUNA DEL SUELO Y SU POTENCIAL DE MANEJO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL SUELO

Esperanza Huerta

**Instituto de Ecología A.C. e IRD (Laboratoire d'ecologie des sols tropicaux)
El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa**

RESUMEN

El promover las condiciones de fertilidad en suelos cultivados, que estimulen la abundancia de la fauna del suelo es aun una de las metas más importantes en los trópicos. El uso de lombrices de tierra resulta ser un instrumento viable. *Polypheretima elongata*, una lombriz cosmopolita endogea, geófaga es una alternativa interesante debido a su gran tolerancia a diferentes rangos de pH. En un estudio de campo, en un pastizal en la Mancha, Veracruz, México, encontramos una relación inversa entre la distribución de la biomasa de *Polypheretima elongata* y la cantidad de arena en el suelo (Mantel's $t : 1.92$ $p < 0.05$). Después bajo condiciones controladas de temperatura y humedad se observó un aumento en el crecimiento y reproducción de esta especie con el uso de hojarasca de *Mucuna pruriens* var. *utilis* y *Zea mays* combinados con suelo del pastizal de la Mancha, Veracruz, México, después de 63 días de cultivo encontramos el mayor peso fresco (5.7 g) y la mayor producción de capullos (33 ± 8.4 capullos m^{-2} en 98 días) en aquellos tratamientos en donde se aplicó *M. pruriens* var. *utilis* al 1.5% con 0 semanas de composteo, y de los tratamientos con maíz el mayor peso fresco y la mayor producción de capullos (5 g, y 12.5 ± 3.6 capullos ind^{-1} en 98 días) se obtuvieron en tratamientos en donde el maíz se composteo durante 6 semanas. En condiciones de campo, utilizamos de igual forma hojarasca de *M. pruriens* var. *utilis*, pero los resultados no fueron muy claros sobre *P. elongata*, puesto que su mayor biomasa (16.84 ± 10.17 g. m^{-2} $p < 0.05$) se encontró en unidades experimentales sin *M. pruriens* var. *utilis*. Sin embargo, un efecto negativo del laboreo sí fue observado sobre esta especie. La aplicación de esta leguminosa en campo resultó significativamente favorable para la producción de maíz al ser aplicada a la superficie en una cantidad de 4.5 kg. m^{-2} , observándose una correlación significativa entre la producción de maíz y la biomasa total de lombrices ($r = 0.48$ $p < 0.05$).

ABSTRACT

Enhancing the carrying capacity of cultivated areas for beneficial soil macrofauna is still an important target in tropics. The use of earthworms to improve soil fertility is progressively considered a promising complement to current practices. *Polypheretima elongata*, a peregrine geophagous, endogeic earthworm is an interesting alternative. In a field study, in

a grassland at la Mancha Veracruz Mexico, we found an inverse relationship between *Polypheretima elongata* patchy biomass distribution and sand gradient (Mantel's $t: 1.92$ $p < 0.05$). Then, searching the way of increase the biomass of *P. elongata*, an enhancement of the growth and reproduction of this species was obtained in controlled conditions of temperature and humidity with the use of *Mucuna pruriens* var. *utilis* and *Zea mays* litter combined with savannah soil of la Mancha, Veracruz, Mexico. After 63 days of culture the highest mean individual fresh weight (5.7 g) and the highest cocoon production (33 ± 8.4 cocoons ind^{-1} in 98 days) were obtained when (1.5 %) fresh litter of *M. pruriens* var. *utilis* were added. The best results with maize litter (5 g, and 12.5 ± 3.6 cocoons ind^{-1} in 98 days) were obtained when the leaf material has been composted for 6 weeks. In field conditions, we used *M. pruriens* var. *utilis* litter as a source of fresh organic matter, but population density was significant decreased by tillage. In non tillage treatments, the addition of *M. pruriens* var. *utilis* applied at the surface enhanced an epigeic earthworm proliferation but had no significant effect on *Polypheretima elongata*. The highest *P. elongata* biomass was actually found in a treatment without litter application (16.84 ± 10.17 g m^{-2} $p < 0.05$). However, the earthworm biomass was related with aboveground maize biomass.

INTRODUCCIÓN

LOS ORGANISMOS DEL SUELO

En el suelo existen diferentes tipos de organismos, donde cada uno de ellos desempeña un papel muy especial y de extrema relevancia para el buen funcionamiento del ecosistema, en el suelo existe un reciclaje de la materia orgánica, misma que se torna disponible junto con los nutrientes hacia las plantas.

De acuerdo con el tamaño de los organismos del suelo, estos han sido clasificados en tres tipos: miembros de la microflora, microfauna, mesofauna y macrofauna.

La Microflora y microfauna del suelo. Organismos que presentan un tamaño menor a 0.2 mm. Habitan en la solución del suelo. Dentro de ellos se encuentran las bacterias, responsables de los procesos biogeoquímicos, al momento se cuentan de 20 000 a 40 000 especies de bacterias por gramo de suelo (Brussaard *et al.*, 1997). Entre ellas se encuentran también las que colaboran en las asociaciones simbióticas de las micorrizas así como las bacterias nitrificadoras, denitrificadoras, las fijadoras de nitrógeno, las amonio reductoras, las sulfato reductoras, sulfato oxidadoras, oxidadoras de hierro, reductoras de hierro, inmovilizadoras o mineralizadoras, sintetizadoras de materiales húmicos, también ellas ayudan de manera simbiótica en la digestión de otros organismos superiores (lombrices, termitas) al encontrarse en su tubo digestivo.

Los hongos envueltos en un gran número de relaciones simbióticas en el suelo. Importantes también en la degradación de la materia orgánica se encuentran aproximadamente de 18 000 a 35 000 especies de hongos en el suelo. Su trabajo más notorio es cuando forman asociación con las raíces de las plantas formando micorrizas.

Los protozoarios, alrededor de 40 000 especies ellos junto con los nemaátodos son los principales depredadores en el suelo (Brussaard *et al.*, 1997).

Los nemátodos, alrededor de 100 000 especies son característicos por ser parásitos de plantas.

La Mesofauna. Organismos que cuentan con un tamaño de 0.2 a 2 mm. Viven mayormente en los poros del suelo. En este grupo se encuentran ácaros, colémbolos,

organismos mayormente fragmentadores de la hojarasca o depredadores de otros organismos.

Los enchytreidos, organismos parecidos a las lombrices pero de menor tamaño, son importantes como fragmentadores de la hojarasca y depredadores de otros organismos, se encuentran de 20 a 30 especies en pastizales y de 10 a 20 especies en los bosques, estos pueden ser bioindicadores de la calidad del suelo (Brussaard *et al.*, 1997).

La Macrofauna del suelo. Son invertebrados de más de 2 mm de tamaño, que pueden ser vistos a simple vista, entre ellos se encuentran las termitas, las lombrices de tierra, los escarabajos, las arañas, las larvas de mosca y de mariposa, los caracoles, los milpiés, los ciempiés y las hormigas. De estos, los escarabajos suelen ser los mas diversos, aunque en densidad predominan generalmente las termitas y las hormigas y en biomasa las lombrices de tierra (Lavelle, 1994).

Dentro de los miembros de la macrofauna se encuentran ciertos organismos que producen con sus actividades modificaciones a su entorno, estos son llamados ingenieros del ecosistema (Jones *et al.*, 1994), las lombrices, las termitas y ciertas hormigas son considerados ingenieros del ecosistema.

Las lombrices de tierra, conocidas como ingenieros del ecosistema o bioturbadores, debido a las modificaciones físicas que producen en el suelo. Se encuentran de cinco a siete especies en suelos sea en climas templados o tropicales. Su diversidad depende de las características del suelo y de la vegetación en la superficie (Fragoso y Lavelle 1992).

Es necesario recalcar la importancia de los miembros de la macrofauna debido a que ellos ingieren por lo general una mezcla de materia orgánica y mineral, dando lugar a materia orgánica estabilizada, al igual que promueven la disponibilidad de materia orgánica y nutrientes a otros organismos del suelo, interviniendo muchos de ellos en la estructura del suelo.

Debido a que las lombrices de tierra con su actividad modifican físicamente su entorno y determinan el hábitat de los organismos arriba descritos, tomaremos a este gru-



po como fundamental en la utilización de la macrofauna del suelo en la búsqueda del mejoramiento de suelos dañados o poco fértiles en donde la biomasa y la densidad de los miembros de la macrofauna es mínima.

Las lombrices de tierra. Las lombrices de acuerdo a su categoría ecológica se han clasificado en epigeas, endogeas y anécicas (Lavelle 1989), las epigeas son aquellas que viven en la superficie del suelo y se alimentan de la hojarasca. Las endogeas son aquellas que viven en el interior del suelo y se alimentan de la materia orgánica que esta pegada a la materia mineral y las anécicas se mueven del interior al exterior del suelo, incorporando materia orgánica al suelo.

De acuerdo a la cantidad de materia orgánica que ingieren, las lombrices han sido clasificadas en polyhumicas, mesohumicas y oligohumicas. Las que ingieren mayor cantidad de materia orgánica son la polyhúmicas, siguiendo en dirección decreciente las mesohúmicas, y por ultimo las oligohúmicas como aquellas que ingieren poca cantidad de materia orgánica (Lavelle, 1989).

Las lombrices de tierra de acuerdo a las modificaciones físicas que pueden producir en el suelo, son llamadas compactadoras o decompactadoras (Blanchart *et al.*, 1997). Dentro de las categorías ecológicas de las lombrices son las lombrices endogeas (las que viven en el interior del suelo) que serán decompactadoras o compactadoras, por lo general las lombrices pequeñas ingerirán los turrículos (desechos fecales de las lombrices) de las lombrices de mayor tamaño, al hacer esto separan los aglomerados de suelo compacto (en donde se encuentra protegida materia orgánica) produciendo estos turrículos con partículas de menor tamaño (fragmentan el suelo) que son después ingeridas por las lombrices de mayor tamaño. Las lombrices compactadoras influirán en la capacidad de retención de agua en el suelo, las lombrices decompactadoras promueven la porosidad del suelo y la infiltración (Blanchart *et al.*, 1997), aproximadamente las lombrices pueden formar de 4,000 a 29,800 galerías por m² dependiendo del tipo de suelo y clima estas galerías pueden estar interconectadas y tener longitudes de hasta 142 a 890 m por m² (Lavelle, 1994). Para obtener buenos resultados debe de existir una intercalación de las actividades de ambos tipos de lombrices: las compactadoras y las decompactadoras.

Las lombrices también intervienen en la disponibilidad e inmovilización de la materia orgánica en el suelo. Los turrículos son micrositios donde la materia orgánica es protegida de la descomposición. Las lombrices tienden a ingerir de 500 a 1,000 toneladas de suelo por hectárea por año (Lavelle, 1978). Las lombrices anécicas (que se mueven de la superficie al interior y viceversa) pueden incorporar anualmente de 180 a 510 kg de hojarasca al suelo (Lavelle, 1978). La materia orgánica que se encuentra unida a la parte mineral del suelo sufre modificaciones dependiendo del tamaño de partícula o fracción mineral a la cual esta unida, la fracción de materia orgánica de mayor tamaño es la mas utilizada por los microorganismos, es la mas fresca o reciente en el suelo y es la mas vulnerable, esta puede ser perdida cuando existen cambios en el uso del suelo como la deforestación (Christensen, 1992). Por lo cual, es necesaria la presencia de organismos que ayuden a fragmentarla e incorporarla al suelo, para que esta luego al mineralizarse sea disponible a las plantas.

A grandes rasgos las lombrices participan en la agregación, en la capacidad de retención del agua, la conductividad hidráulica y en la disponibilidad y almacenaje de la materia orgánica y otros nutrientes (como el fosfato, Brosard *et al.*, 1996, Lavelle *et al.*, 1997, Lavelle *et al.*, 1998).

En experimentos realizados, las lombrices han reconstituido la estructura de los macroagregados de suelos dañados en tan solo pocas semanas, sus turrículos tienen una gran duración y estabilidad (Lavelle *et al.*, 1993).

En los agroecosistemas, las relaciones entre los organismos del suelo, las plantas y el suelo tienden a modificarse, la diversidad de lombrices disminuye cuando los bosques y las sabanas son convertidos en zonas de cultivo. Son sobre todo las lombrices endogeas que sobreviven a las nuevas condiciones (Fragoso *et al.*, 1999), en general la biomasa de la macrofauna disminuye en las zonas de cultivo.

LA CALIDAD DEL SUELO

Desde el punto de vista agrícola un suelo de buena calidad es aquel en donde los procesos de mineralización y humificación de la materia orgánica se desarrollan en equilibrio (Fuentes, 1999). Es decir debe de existir disponibilidad de materia orgánica y nutrientes hacia los organismos del suelo y hacia las plantas. Para que esto ocurra los diferentes factores físicos y químicos del suelo junto con la biota del suelo deben de proveer condiciones para que estos mecanismos se desarrollen.

Los suelos degradados son una de las causas de la baja productividad agrícola. Al encontrarse deteriorados presentan un colapso, cuyos síntomas se manifiestan en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Las actividades de formación de túneles o galerías por las lombrices, termitas y hormigas disminuyen, reduciendo así, la densidad aparente del suelo y aumentando la infiltración del agua y el porcentaje de agregados no estables al agua. Entonces el suelo con la actividad de los organismos del suelo tendrá cambios en:

- La agregación y estructura del suelo.
- La textura y consistencia del suelo.
- El movimiento y retención del agua.
- El intercambio gaseoso.
- Las propiedades químicas y nutricionales.

EL POTENCIAL DE LA FAUNA DEL SUELO

Las lombrices de tierra son conocidas por los beneficios que aportan al ecosistema suelo. Con datos de Yurimaguas (Perú), Lamto (Costa de Marfil) y La Mancha (México) Brown y colaboradores (1999), mostraron una relación significativa ($r^2=0.53$ $p<0.05$) entre la biomasa de las lombrices de tierra y el incremento de la producción de las se-

millas de gramíneas cultivadas (Fig. 1), los incrementos mas importantes fueron encontrados cuando la biomasa de lombrices era superior a los 30 g m⁻². En aquellos sitios en donde las características del suelo o de la vegetación no favorecen el desarrollo de lombrices, una biomasa mínima de 30 g por m² produce un efecto significativo sobre la producción agrícola (Brown *et al.*, 1999).

El grupo Macrofauna. Este grupo surge con la conjunción de la base de datos Macrofauna, base de datos creada en 1990 dentro del proyecto europeo "Management of earthworms in tropical agroecosystems" (Manejo de lombrices en ecosistemas tropicales), reúne todos los datos colectados con el método standard TSBF (Anderson & Ingram, 1989). En donde 7 países, dentro de los cuales se encuentra México agruparon datos referentes a la biomasa y densidad de la macrofauna del suelo, así como ciertas características del suelo.

En la República Mexicana el grupo Macrofauna esta representado por el Departamento de biología de suelos del Instituto de Ecología de Xalapa, Veracruz, y en Mérida Yucatán por el Departamento de Manejo y Conservación de recursos naturales tropicales de la Universidad Autónoma del Estado de Yucatán. Este grupo ha buscado la utilización de organismos del suelo, en especial lombrices de tierra, para el mejoramiento de suelos dañados por la agricultura.

La actividad de la macrofauna edáfica también puede aumentar o disminuir la productividad del ecosistema. Efectos positivos han sido reportados para las lombrices y las termitas (Brown *et al.*, 1999, Cherrett 1986, Lavelle 1997, Lee & Wood 1971, Lee 1985, Okello-Oloya & Spain 1989, Watson 1977, Word 1996), mientras que ciertos organismos debido a su abundancia y a provocar disminuciones en la biomasa de plantas han sido considerados plagas, es el caso de ciertas larvas de escarabajos, hormigas, algunas larvas de dípteros, y caracoles fitófagos (Brown *et al.*, 2001). Pero es necesario recalcar que en la instalación o promoción de los cultivos muchas condiciones físicas y químicas del suelo cambian, favoreciendo así la existencia de ciertos organismos adaptados a vivir en agrosistemas.

El manejo de lombrices de tierra es una alternativa viable en la búsqueda del mejoramiento de suelos, el incrementar su densidad y biomasa promueve de igual forma el aumento de la actividad de otros organismos del suelo. La biomasa y densidad de lombrices de tierra se ve afectada por factores ambientales y factores del suelo (modelo jerárquico Lavelle, 1993) los cuales hacen que exista o no disponibilidad de materia orgánica hidrosoluble utilizable por las lombrices (Fig. 2). Por eso es de suma importancia el conocer cuales son las características del suelo y de la vegetación que favorezcan una alta biomasa y una alta densidad de lombrices de tierra, Huerta (2002) aborda esta cuestión a tres niveles de manera jerárquica: el primero es un nivel global en donde se tratan datos del grupo macrofauna, el segundo es un nivel regional con sitios también del grupo macrofauna pero que cuentan con un mismo tipo de vegetación y un mismo tipo de suelo. Por último, a nivel local haciendo un estudio en un pastizal. Dentro de los organismos del suelo, las lombrices de tierra son organismos con un gran potencial de utilización debido a la gran tolerancia que pueden presentar algunas de ellas, en suelos donde el uso del mismo ha sido modificado. Los

macroinvertebrados mas sensibles del suelo tienden a desaparecer sin embargo, ciertas lombrices que son llamadas cosmopolitas, o exóticas, pueden colonizar suelos de cultivos, áreas con contenidos de pH diversos, o poco favorables para la mayoría de los miembros de la macrofauna. Ese es el caso de lombrices como *Pontoscolex corethrurus* o *Polypheretima elongata*, lombrices endógeas, geófagas, cosmopolitas. Trigo y colaboradores (1999), mostraron que existen diferencias en la cantidad de mucus secretada por lombrices nativas y lombrices exóticas,

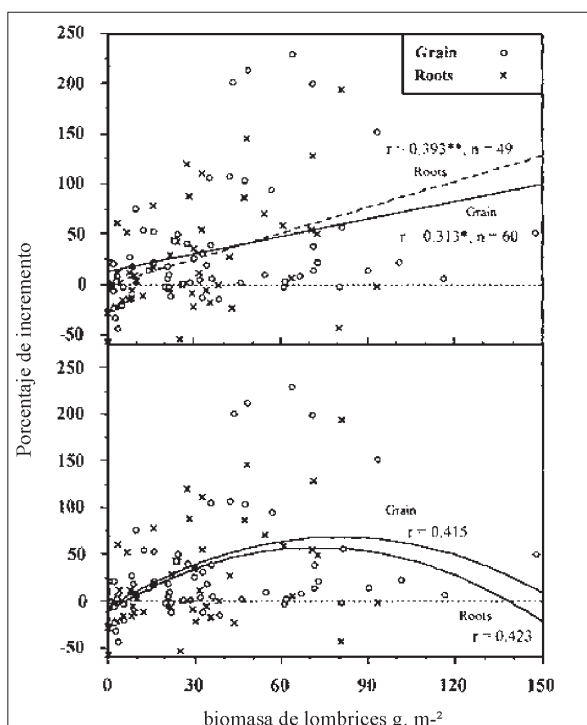


Figura 1. Relación entre la biomasa de lombrices de tierra en g m⁻² y el porcentaje de incremento de semillas y raíces. Resultados obtenidos a partir de 12 experimentos en seis cultivos: *Zea mays*, *Oriza sativa*, *Sorghum bicolor*, *Triticum spp.*, *Fasciulus vulgaris* y *Vigna unguiculata* (Modificado de Brown *et al.*, 1999).

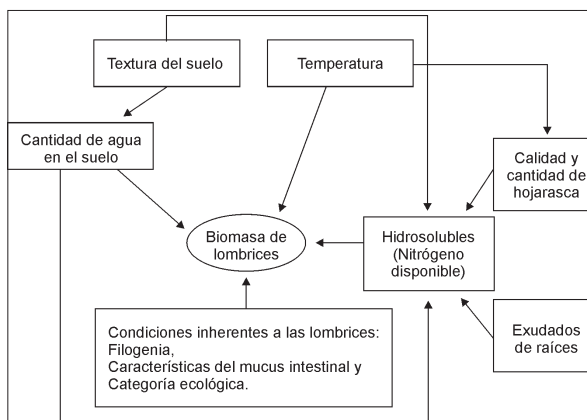


Figura 2. Factores que determinan la biomasa de las lombrices de tierra (Huerta, 2002).

siendo justamente *Pontoscolex corethrurus* y *Polypheretima elongata* lombrices con mayor producción de mucus, en comparación de lombrices nativas como *Balanteodrilus sp. novo* (proveniendo del mismo suelo).

Tomando en cuenta la información de la base de datos del grupo macrofauna con suelos de distintos países, diferentes tipos de vegetación y distintas cantidades de precipitación; los parámetros más sobresalientes son: una biomasa mínima de 30 g m² se encuentra en sitios con una precipitación comprendida de 1,300 a 3,000 mm, con una cantidad de materia orgánica comprendida de 3 a 4 %, en un porcentaje de arcilla de 40 a 50 (Huerta, 2002).

Para poder comprender a mayor detalle la relación entre los parámetros del suelo, la vegetación y la biomasa de lombrices, Huerta (2002) realizó un estudio geostadístico, en un pastizal de La Mancha, Veracruz, México.

ESTUDIO DE CASO: RELACIÓN ENTRE SUELO, VEGETACIÓN CON LA BIOMASA Y DENSIDAD DE LOMBRICES DE TIERRA EN UN PASTIZAL DE LA MANCHA, VERACRUZ, MÉXICO.

De la Cruz (1999) encontró una distribución distinta de *Polypheretima elongata* (1872, oligochaeta) al de la humedad del suelo en este pastizal.

Polypheretima elongata. (Perrier, 1872) es una lombriz endógena, geófaga, pertenece al grupo de las pheretimas (familia Megascolecidae: Oligochaeta). Originaria de Asia, está muy distribuida en medios antropizados de los trópicos, donde ella ha colonizado medios con una temperatura media anual entre 21 y 30°C, en sitios que reciben entre 800 a 4000 mm de precipitaciones, en suelos con un pH de 5 a 7.5, con un porcentaje de materia orgánica entre 1.8 y 7.6%, con un porcentaje de nitrógeno de 0.8 a 3.8% (Fragoso *et al.*, 1999). *P. elongata* ha sido considerada como una lombriz susceptible para ser utilizada en el mejoramiento de suelos dañados por la agricultura. Por ello, es interesante saber cuáles son los factores que determinan su biomasa y distribución con el fin de reproducirlos en aquellos sitios en donde su biomasa sea escasa.

Localización. Este pastizal se encuentra en el centro de Investigaciones Costeras La Mancha (CICOLMA) situado al sur de la costa del estado de Veracruz, en México en los 96°22'40" de longitud oeste y 19°36' de latitud norte. El clima es cálido subhúmedo con lluvias y temperaturas elevadas en verano, el clima pertenece al tipo Aw2 (w)(i). Las precipitaciones medias anuales varían de 1200 a 1500 mm, con una temperatura media anual de 24.5°C, una máxima de 27°C y una mínima de 16° C. Los meses mas lluviosos se encuentran entre junio y septiembre y la estación de secas de noviembre a abril (García, 1981).

Muestreo. La colecta de las lombrices se realizó con un muestreo detallado; 100 monolitos de 25x25x30 cm cada uno, elaborados de acuerdo al método TSBF (Anderson e Ingram, 1989, Figura 3), con una distancia entre monolitos de cinco m, el área de muestreo comprendió 95 m de largo y 20 m de ancho.

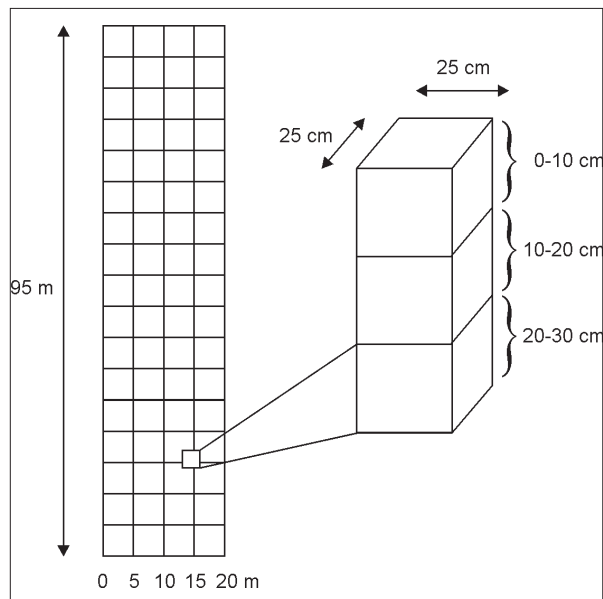


Figura 3. Malla de muestreo de 20 m de ancho por 95 m de largo, en el pastizal. En cada punto de intersección de la malla se realizó un monolito de 25x25 cm con 30 cm de profundidad.

Cada monolito fue dividido a dos profundidades de 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm, los parámetros analizados de cada monolito fueron: la densidad y la biomasa de lombrices, el porcentaje de materia orgánica por fracción ligera del suelo (de talla >200 mm, de 200 – 50 mm, y <50 mm, las cuales fueron obtenidas de acuerdo al método de Feller, 1979), cationes intercambiables, pH, textura, humedad y densidad aparente.

Tratamientos estadísticos. Los datos fueron analizados estadísticamente, el protocolo de muestreo nos permitió efectuar variogramas (Webster y Oliver 1990) y planos de distribución de todos los datos obtenidos. Las pruebas simples y parciales de Mantel nos permitieron completar los tratamientos estadísticos.

Resultados. En este pastizal encontramos una gran diversidad de lombrices, siete especies distintas de lombrices (Fig. 4), nativas y cosmopolitas, el 86 % de la biomasa total (66.5 g m²) estaba cubierto por la especie cosmopolita endógena *P. elongata*. En cuanto a la densidad, se encontró una densidad media de lombrices de 486.5 ind. m² en este pastizal, de esta densidad un 31% estaba conformado por *P. elongata*, 35% por lombrices epigeas del genero *Dichogaster*: *D. Affinis*, *D. Saliens*, *D. Bolaii*, 11% por lombrices endógeas polihúmicas nativas: *Phoenicodrilus taste* y *Diplotrema murchei*, el 23% restante estaba compuesto por individuos juveniles no identificados.

Con los variogramas fue posible identificar los patrones de distribución de los parámetros analizados, los cuales fueron interesantes. Se encontraron parámetros en donde según la profundidad su patrón de distribución era distinto.

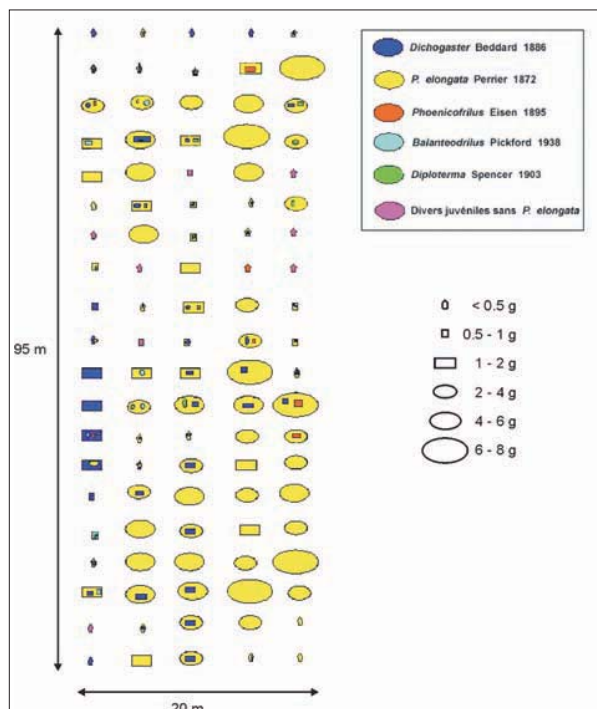


Figura 4. Distribución de diferentes especies de lombrices de tierra en el pastizal. El tamaño de las figuras es proporcional a la biomasa encontrada en cada monolito de 25x25x30 cm.

Las lombrices de tierra. Mostraron una distribución espacial bien definida por parches, con un modelo esférico (Figs. 5 y 7).

La materia orgánica de las fracciones ligeras de la talla >200 μ m mostró una distribución espacial siguiendo el modelo lineal en la profundidad de 10-30 cm (Figs. 6 y 8), siguió ese patrón el contenido de materia orgánica de la fracción 200-50 μ m de esa misma profundidad. Sin embargo la fracción <50 μ m siguió un modelo lineal tanto en la profundidad de 0-10 cm como en la profundidad de 10-30 cm.

Los cationes intercambiables. Presentaron una estructura espacial que sigue un modelo esférico (por parches) a excepción del calcio de la capa 0-10 cm cuya distribución espacial se encuentra en gradiente, siguiendo el modelo lineal.

El pH, la densidad aparente, el contenido en arcillas, limo y arena en las dos capas de profundidad estudiadas, no mostraron una estructura espacial.

El porcentaje de humedad, presentó un modelo esférico en la profundidad más superficial y lineal en la capa mas profunda.

El tipo de vegetación, las gramíneas y otras plantas que componían la vegetación del pastizal no presentaron una estructura espacial.

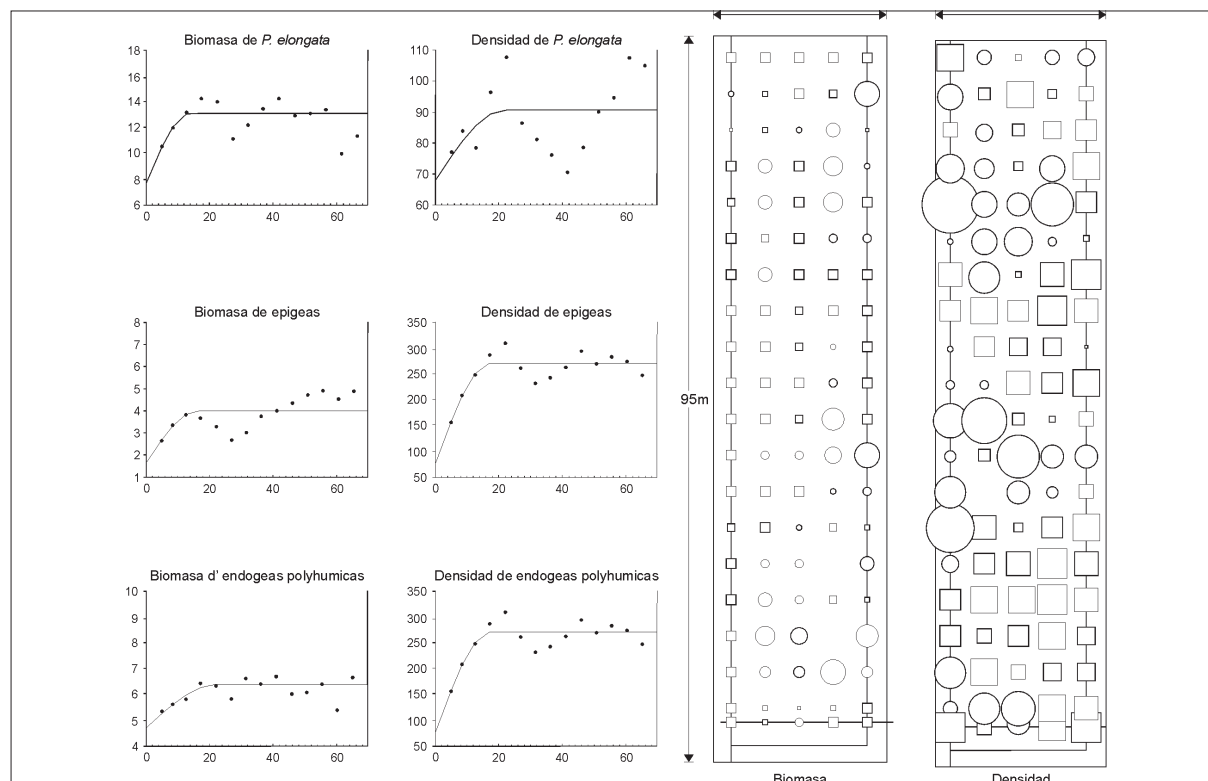


Figura 5. Variogramas y cartas de distribución de lombrices en La Mancha, Veracruz, México. Los círculos indican los valores por encima de la media y los cuadros los valores por debajo de la media, el tamaño corresponde al valor (Huerta, 2002).

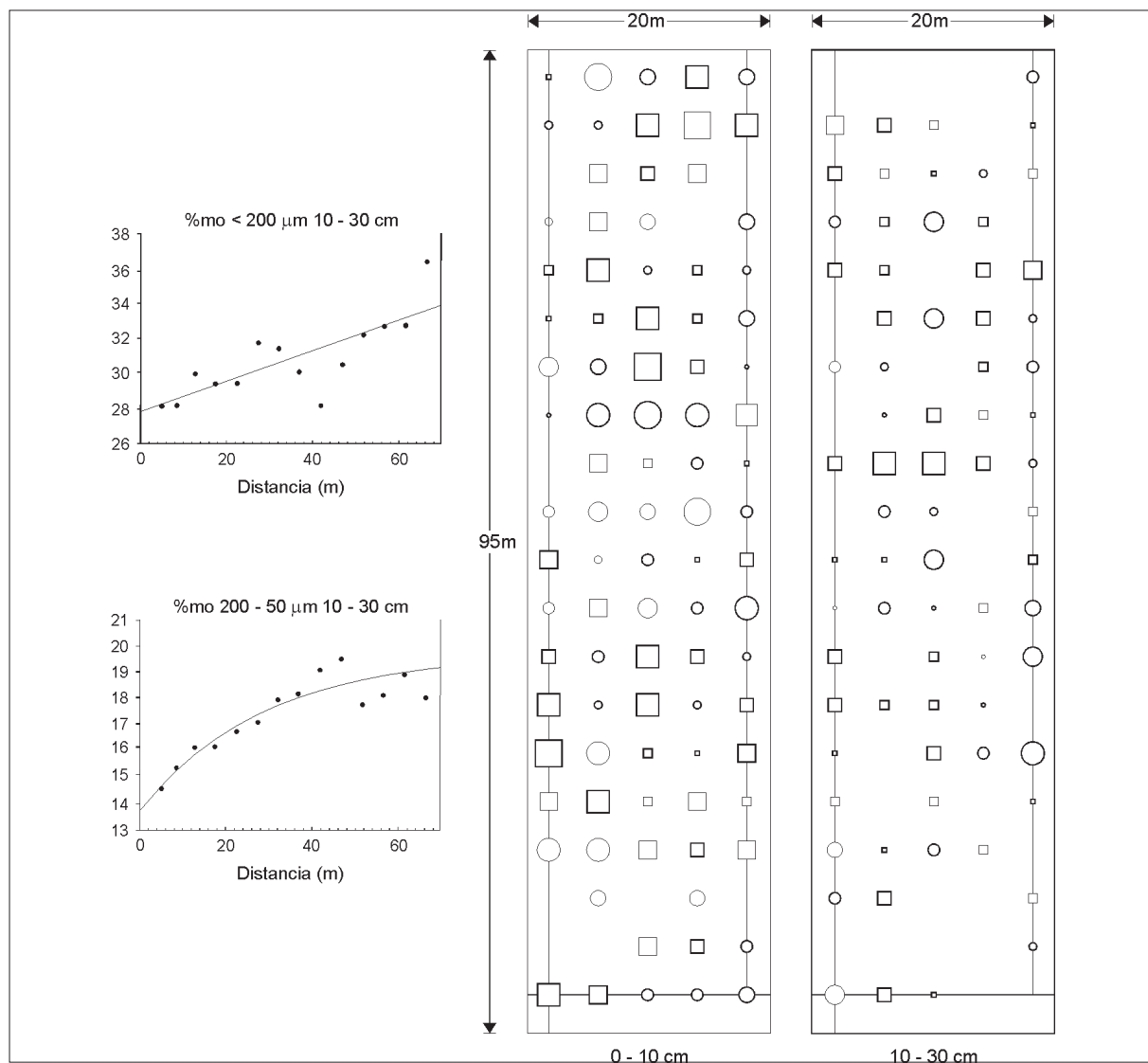


Figura 6. Variogramas y cartas de distribución de las fracciones ligeras de materia orgánica de tamaño $>200\ \mu\text{m}$ y de 200 a $50\ \mu\text{m}$. Las cartas muestran las capas $0-10$ y $10-30$ cm de profundidad, de la fracción $>200\ \mu\text{m}$. Los círculos indican los valores por encima de la media y los cuadros indican los valores por debajo de la media. El tamaño de los cuadros y círculos corresponde a los valores.

El “range” o “portée” de los variogramas. Establecer los variogramas ha sido de suma importancia ya que con ellos podemos saber cuales son las condiciones de distribución de los parámetros del suelo, información que podrá servirnos en futuros muestreos, en el variograma a demás del patrón de distribución del parámetro, también se puede observar la distancia mínima en la cual los puntos muestreados son considerados como independientes. Esta distancia se denomina “range” y nos da el tamaño del parche de distribución del parámetro muestreado. En el caso de las lombrices de tierra de el pastizal muestreado, su “range” varía tanto para la biomasa como para la densidad, este “range” suele ser mas amplio para la densidad, siendo de $22\ \text{m}$ en el caso de *P. elongata*, $18\ \text{m}$ en el caso de las lombrices epigeas y $27\ \text{m}$ en el caso de las lombrices polyhúmicas endógeas; en lo que respecta a la biomasa

fue de $14\ \text{m}$ para *P. elongata*, de $17\ \text{m}$ para las lombrices epigeas y de $23\ \text{m}$ para las endógeas polyhúmicas.

Con respecto al porcentaje de materia orgánica por fracción ligera del suelo, esta distancia varia de acuerdo al tamaño de la fracción y a la profundidad de donde fue extraída dicha fracción. Por ejemplo, la fracción de talla mayor de $200\ \mu\text{m}$ tiene un “range” de $46\ \text{m}$ en la capa $0-10\ \text{cm}$ y la fracción de 200 a $50\ \mu\text{m}$ tiene una distancia de $87\ \text{m}$ en la capa de 10 a $30\ \text{cm}$.

En relación a los cationes intercambiables su “range” varía de 20 a $65\ \text{m}$, el potasio es el cation que tiene la menor distancia, mientras que el calcio tiene un parche de distribución más amplio (es el que presenta el mayor “range”).

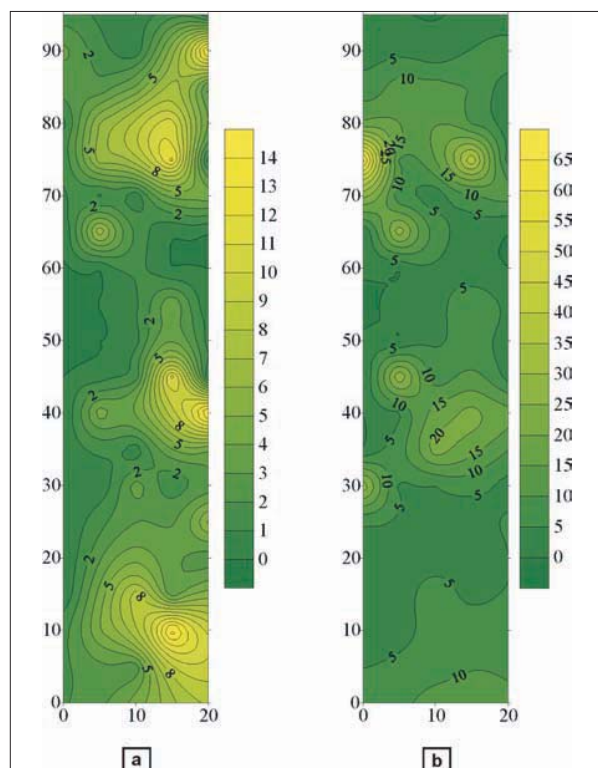


Figura 7. Distribución espacial de la biomasa (a) y de la densidad (b) de lombrices de tierra en el pastizal de La Mancha, Veracruz, México.

Prueba de Mantel. Para observar cual es la correlación existente entre los parámetros muestreados, efectuamos una prueba de Mantel simple (r), esta correlación se realizó entre la biomasa y densidad de lombrices de tierra y los parámetros fisicoquímicos del suelo. Esta prueba esta basada sobre la estimación y la prueba estadística de la correlación entre dos matrices de distancias (la matriz A y la matriz B), para lo cual se parte de la hipótesis nula, la cual nos dice que no existen relaciones entre las dos matrices, efectuando permutaciones repetidas de los valores presentes en las líneas y los valores presentes en las columnas de una de las dos matrices se calcula r .

Se observó que existe una relación significativa pero inversa entre la biomasa y la densidad de *P. elongata* y la cantidad de arenas ($r: 1.92 p < 0.05$).

CONCLUSIÓN DEL ESTUDIO DE CASO

Se observó que la textura fue el factor determinante de la distribución y abundancia de *P. elongata*, el porcentaje de arenas fue el factor determinante, de acuerdo a los parámetros muestreados. La cantidad de materia orgánica parecía no jugar un papel relevante en la biomasa y distribución de esta especie de lombriz. Se especula que, es la calidad de la misma la que rige como un parámetro de distribución. En base a lo anterior, se procedió a realizar experimentos en laboratorio y en campo, en donde utilizamos la calidad de materia orgánica como el factor relevante en el incremento de biomasa y densidad de esta especie de lombriz.

CALIDAD DE LA MATERIA ORGÁNICA COMO FACTOR DEL INCREMENTO DE LA BIOMASA DE LOMBRICES DE TIERRA

Se efectuaron dos experimentos, el primero, bajo condiciones estables de temperatura y humedad. El segundo, en un campo de maíz; en ambos experimentos se trabajo con una leguminosa, la *Mucuna pruriens* var. *utilis* como fuente de materia orgánica de alta calidad. Para una lombriz de tierra, un sustrato de alta calidad es aquel que es rico en nitrógeno (Huerta, 2002).

En el experimento de laboratorio se contó con un total de 22 tratamientos con 4 replicas cada uno. Existieron tratamientos con *M. pruriens* var. *utilis*, con *Zea mays*, y tratamientos en donde se trabajo únicamente con la fracción ligera del suelo (fraccionado de acuerdo al método de Feller, 1979), la cual fue eliminada, duplicada, triplicada y cuádruplicada. En los tratamientos en donde la fuente de materia orgánica era la Mucuna o el maíz se trabajó también en la cantidad de fuente vegetal agregada 1.5% ó 4.5% y en el tiempo de descomposición de dicho material, cero, dos, cuatro, y seis semanas de descomposición, 300 g de cada sustrato fue colocado en recipientes de 12x12x11 cm, con 33% de humedad a 27° C de temperatura, con un individuo juvenil (1.34 ± 0.08 g de peso fresco) de *P. elongata* en cada recipiente. Después de 63 días de experimentación los sustratos que dieron lugar a la mas alta biomasa de *P. elongata* fue la aplicación de Mucuna

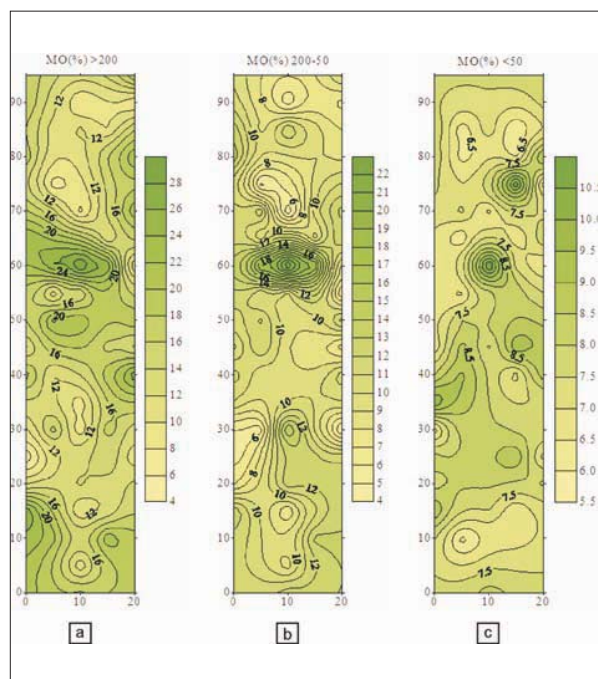


Figura 8. Distribución espacial del porcentaje de materia orgánica por fracción ligera del suelo. a) $>200 \mu\text{m}$. b) $200-50 \mu\text{m}$. c) $<50 \mu\text{m}$. De la capa 0-10 cm. En el pastizal de La Mancha, Veracruz, México.

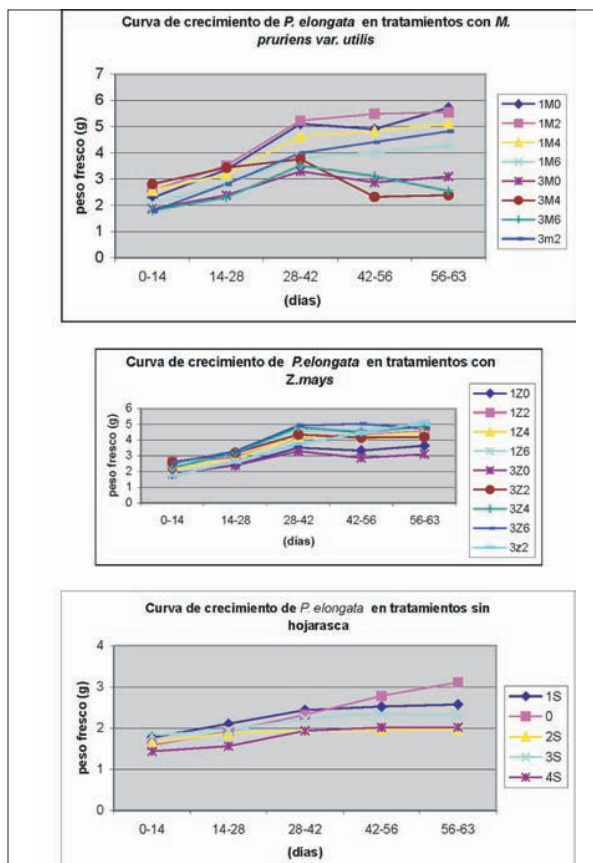


Figura 9. Curvas de Crecimiento de *P. elongata*. De arriba hacia abajo : Tratamientos con *Mucuna pruriens* var. *utilis*, tratamientos con *Zea mays* y tratamientos sin hojarasca. En los tratamientos con fuente orgánica vegetal: Los números de la izquierda indican la cantidad de sustrato agregado 1 : 1.5%, 3 : 4.5%, los números de la derecha indican el tiempo de descomposición, 0, 2, 4, y 6 semanas.

en 1.5% con cero semanas de descomposición, dando lugar a la mayor tasa de crecimiento diario con $6.79 \pm 1.61\%$, con una biomasa promedio de 5.8 ± 0.7 g (Fig. 9), también los sustratos con *Mucuna* dieron lugar a la mas alta reproducción con 33 ± 8.4 cocones por individuo en 98 días.

Una vez que observamos resultados positivos en laboratorio con la utilización de *M. pruriens* var. *utilis*, decidimos utilizar esta leguminosa en un campo de cultivo de maíz.

En un área de 30 x 37 m de un campo de cultivo de maíz en La Mancha, Veracruz, México. Con un suelo tipo regosol (FAO, 1997), con una precipitación media anual de 1500 mm, y una temperatura media anual de 24.5 °C se aplicaron ocho tratamientos con tres replicas cada uno. Cada unidad experimental constó de 2 x 2 m, instalados en bloques al azar. Los tratamientos consistieron en la cantidad y forma de aplicación de la *Mucuna*, tratando con *Mucuna* a la superficie, al interior y al interior y a la superficie, en una cantidad 1.5 kg m² ó 4.5 kg m². a los 5 meses de aplicada la *Mucuna* se sembró el maíz.

Antes de ser colocados los tratamientos se hizo un muestreo inicial de la población de lombrices y después de un año de la instalación de los tratamientos, se contó de nuevo la población de lombrices, pero desafortunadamente fue un año con pocas lluvias y la población global de lombrices disminuyó, aún así se observó que dentro de los tratamientos en donde se utilizó la *Mucuna*, aplicándola a la superficie con una cantidad de 4.5 kg m² se obtuvieron los mejores resultados en biomasa de lombrices y en biomasa de maíz. Sin embargo, *P. elongata* no mostró un incremento significativo con la utilización de la *Mucuna* en campo, aunque sí se observó un efecto significativo pero negativo del laboreo sobre esta especie.

De este modo, se infiere que en campo es necesario tomar muchos factores antes de poder observar los resultados de la aplicación de materia orgánica de origen vegetal sobre el suelo.

CONCLUSIÓN

Los organismos del suelo siempre serán afectados por el tipo de utilización del suelo. Su diversidad, biomasa, densidad y distribución dependerán de las condiciones del suelo, mismas que son determinadas por el uso del mismo, por su textura y por el tipo de aportes orgánicos.

La macrofauna del suelo puede ser una opción viable en la búsqueda del mejoramiento de suelos poco fértiles o degradados. La biomasa vegetal se puede incrementar considerablemente si se mejoran las condiciones que favorecen la existencia de organismos que participan en la mineralización de la materia orgánica y que ayudan a la disponibilidad de nutrientes para las plantas. Pero es necesario evitar ciertas prácticas como el laboreo, que no favorecen la existencia de ciertos organismos del suelo.

Definitivamente la fauna del suelo es una alternativa en la búsqueda de métodos que permitan incrementar la fertilidad del suelo. Siendo las lombrices un grupo bien conocido facilita más aún su utilización por los productores o agricultores. Hoy en día hace falta conocer nuevas especies o manipular a las especies nativas para no expandir solo a las especies dominantes. El uso de fauna del suelo es un campo de estudio apasionante y necesario si se busca restaurar o reintegrar ecosistemas alterados o dañados por la actividad humana. El suelo no solo es un sustrato en el cual crecen las plantas, es un sistema en el cual viven diversos organismos, que merecen nuestra atención si se desea éxito en la producción vegetal. En nuestro país existen pocas investigaciones dedicadas al estudio de fauna del suelo. Por lo que se conoce poco de ella. Yo invito por

esta vía a todo aquel interesado en buscar alternativas de producción vegetal mas acordes al ambiente, el estudiar a los organismos del suelo, junto con otras tecnologías como el uso de policultivos, abonos verdes y biofertilizantes para tener sistemas de producción de alta calidad. Los países miembros del grupo macrofauna, han desarrollado programas de investigación mediante los cuales han mostrado la importancia de la utilización de la fauna del suelo como una alternativa viable y económica en la producción

de cultivos. Por ejemplo: la producción de te en la India, fue incrementada exitosamente con el uso de una lombriz endógena geófaga cosmopolita, *Pontoscolex coretrurus*. Para obtener los mismos resultados es necesario conocer nuestro suelo, cuales son los organismos que predominan y así favorecer las condiciones que hagan desarrollar una mayor actividad de los mismos.

REFERENCIAS

- Anderson, J.M., J.S.I. Ingram, 1989.** Tropical Soil Biology and Fertility: a handbook of methods. TSBF. CAB., international. Oxford, UK, 171 p.
- Blanchart, E., P. Lavelle, E. Braudeau, Y. Le Bissonnais, C. Valentin, 1997.** Regulation of Soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Côte d'Ivoire. Soil. Biol. Biochem. 29, 34, 431-439.
- Brown, G., B. Pashanasi, C. Villenave, J. Patrón, B. Senapati, S. Giri, I. Barois, P. Lavelle, E. Blanchart, R. Blakemore, A. Spain, J. Boyer, 1999.** Effects of earthworms on plant production in tropics. In: Lavelle P., Brussard L., and Hendrix P., Management of earthworm communities in tropical agroecosystems, CAB-International. Wallingford U.K. 87-147.
- Brossard, M., P. Lavelle, J.Y. Laurent, 1996.** Digestion of a vertisol by an endogeic earthworm (*Polypheretima elongata*, Megascolecidae) increases soil phosphates extractability, European Journal of Soil Biology, 32, 2, 107-111.
- Brussaard, L., V. Behan-Pelletier, D. Bignell, V. Brown, W. Didden, P. Folgarait, C. Fragoso, D. Wal Freckman, V. Gupta, T. Hattori, D. Hawksworth, C. Klopatek, P. Lavelle, D. Malloch, J. Rusek, B. Söderström, J. Tiedje, R. Virginia, 1997.** Biodiversity and Ecosystem Functioning in Soil. Ambio. 26, 8, 563-570.
- Christensen, B., 1992.** Physical fractionation of Soil and Organic Matter in Primary Particle Size and Density Separates. Springer-Verlag New York Inc. Advances in Soil Science. 20. 2-76.
- De la Cruz Elizondo, 1999.** Influencia de la humedad, el ganado, y los arboles sobre la diversidad, actividad y abundancia de las lombrices de tierra en potreros de la Mancha, Veracruz. Tesis de licenciatura. Fac. de Biología, Universidad Veracruzana. Xalapa Ver. 68 pp.
- FAO and ONU, 1997.** Situation du ForLts du Monde. Rome.
- Feller, C., 1979.** Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols, Cahier ORSTOM, série Pédologie XVII, 4. 339-346.
- Fragoso, C., P. Lavelle, 1992.** Earthworm communities of tropical rainforests, Soil Biology and Biochemistry, 24,12,1397-1408.
- Fragoso, C., I. Barois, C. Gonzales, P. Lavelle, 1993.** Relationship between earthworm and soil organic matter levels in natural and managed ecosystems in the Mexican tropics, Soil Organic Matter Dynamics and Sustainability of Tropical Agriculture. 231-239.
- Fragoso, C., P. Lavelle, E. Blanchart, B. Senapati, J. Jimenez, M. Martinez, T. Decaens, J. Tondoh, 1999.** Earthworm communities of tropical agroecosystems : origin structure and influence of management practices. In: Lavelle, P., L. Brussaard, and P. Hendrix, Management of earthworm communities in tropical agroecosystems, Wallingford, U.K. CAB-International. 27-55.
- García, E., 1981.** Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Inst. Geog. UNAM. 3a. ed.
- Huerta, E., 2002.** Etude comparative des facteurs qui déterminent la biomasse et la densité de vers de terre dans les zones naturelles et anthropisées dans les sols de tropiques. These de Doctorat. Université Paris VI Pierre et Marie Curie. 188 pp.
- Jones, C., J.H. Lawton, M. Shachak, 1994.** Organisms as ecosystem engineers. Oikos. 69, 373-386.
- Lavelle, P., 1978.** Les vers de terre de la savanne de Lamto (Ivory Coast); peuplements, populations et fonctions dans l'écosystème. These de Doctorat. Université Paris VI.
- Lavelle, P., 1994.** Faunal activities and soil processes: Adaptive strategies that determine ecosystem function. 15th ISSS. Congress, Acapulco, Mexico.
- Lavelle, P., D. Bignell, M. Lepage, V. Wolters, P. Roger, P. Ineson, O.W. Heal, S. Dhillon, 1997.** Soil Function in a Changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. Eur. J. Soil Biol. 33, 4, 159-193.
- Lavelle, P., I. Barois, E. Blanchart, G. Brown, L. Brussaard, T. Decaens, C. Fragoso, J.J. Jimenez, Ka. Kajondo, Ma. Martinez, A. Moreno, B. Pashanasi, B. Senapati, C. Villenave, 1998.** Les vers de terre une ressource dans les agrosystemes tropicaux. Nature and Resources. 34, 1, 26-41.
- Webster, R. and M.A. Oliver, 1990.** Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey/oxford University Press. Oxford.



DESCOMPOSICIÓN DE HOJARASCA Y ABUNDANCIA DE MACROINVERTEBRADOS POR EL USO DE MANTILLOS Y CULTIVOS DE COBERTERA

Francisco Bautista¹ y Carmen Delgado²

¹Departamento de Ecología, FMVZ, Universidad Autónoma de Yucatán

²Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de dos mantillos de leguminosas arbóreas y dos leguminosas herbáceas como cultivos de cobertera en la biomasa de oligoquetos y gasterópodos en un cultivo de maíz establecido en Leptosoles bajo condiciones climáticas de trópico subhúmedo. A las dos semanas del cultivo de maíz, la abundancia y biomasa de oligoquetos aumentó en los tratamientos Mucuna (cultivo de cobertera de *Mucuna deerengianum* (L. Medic.) con 29.39 g m⁻², Leucaena (mantillo de *Leucaena leucocephala* Lam. Dwytt) con 36.85 g m⁻² y Lysiloma (mantillo de *Lysiloma latissiliquum* L. Beneth) con 12.94 g m⁻², como consecuencia de los mantillos aplicados y acumulados en el caso de Mucuna. El control y Canavalia (*Canavalia ensiformis* (L.) D.C) presentaron valores de biomasa de lombrices de 3.64 g m⁻² y 7.15 g m⁻², respectivamente. En la semana 10 se identificó el aumento de la abundancia y biomasa con respecto a la calidad del follaje de acuerdo con la ecuación: $\text{Ind m}^{-2} = -28.95 [(\text{Lignina} + \text{Celulosa})/\text{N}] + 364$ con una $R^2 = 0.95$. Las leguminosas utilizadas como mantillos presentaron los valores más bajos de abundancia y biomasa de gasterópodos. Por lo contrario, la abundancia y biomasa de gasterópodos se aumentó con el uso de cultivos de cobertera. Los oligoquetos son más dependientes de la humedad y de la calidad del recurso en comparación con los gasterópodos. Los gasterópodos estuvieron presentes por más tiempo en comparación con los oligoquetos.

ABSTRACT

The aims of this work was the evaluation of mulch and cover crops of leguminous on earthworms and snails populations in Leptosols with tropical dry climate. The earthworms biomass increase on the first sample in Mucuna (29.39 g m⁻²), Leucaena (36.85 g m⁻²) and Lysiloma (12.94 g m⁻²) treatments, because we applied mulch of *L. latissiliquum* and *L. leucocephala* and accumulate *M. deerengianum* mulch of before crop. Control and Canavalia had 3.64 g m⁻² and 7.5 g m⁻² of earthworms biomass, respectively. On the second sample (Week 10), The foliage quality had positive effect in density and biomass of earthworms. The equation that describe the relation are: Individual m⁻² = -28.95 [(Lignin + Cellulose)/N] + 364 with a $R^2 = 0.95$. Cover crops promoted the density and biomass of snails in adverse climatic conditions and mulch of *L. leucocephala* and *L. latissiliquum* limit the density and biomass of snails. The earthworms are more affected by humidity and quality litter in contrast with snails. The snails are presented for more time than earthworms.

INTRODUCCIÓN

Estudios realizados en Leptosoles del trópico subhúmedo, han logrado incrementar la producción de maíz y el control de arvenses por el uso de mantillos frescos de leguminosas arbóreas (*L. leucocephala* y *L. latisiliquum*) y leguminosas herbáceas como coberteras vivas (*M. deerengianum* y *C. ensiformis*) (Caamal *et al.*, 2001). Las leguminosas arbóreas presentan amplia distribución y abundancia en la vegetación natural de la Península de Yucatán (Flores y Espejel, 1994) y las utilizadas como cultivos de cobertera aún cuando no son endémicas están siendo manejadas por técnicos agrícolas y adoptadas por los campesinos.

Por otro lado, la manipulación agronómica del follaje (ramas y hojas de árboles) en forma de mantillos en cultivos, favorece la regulación del microclima y provee de alimento para los macroinvertebrados lo cual puede aumentar la fertilidad del suelo y el rendimiento agrícola. La siembra de herbáceas como coberteras de los cultivos, conservan la humedad, disminuyen la temperatura del suelo y proveen materia orgánica al suelo. Los beneficios edáficos y agronómicos por el aumento de las poblaciones de macroinvertebrados del suelo, son: mineralización de N, disponibilidad de P, reciclaje de nutrientes como Ca y K, el aumento de la estabilidad de los agregados y el crecimiento vegetal (Brown *et al.*, 1995; Mba, 1993 y 1997).

La descomposición es un proceso ecológico que tiene relación con el reciclaje de nutrientes, el mantenimiento de los organismos desintegradores, la conservación y fertilidad del suelo y por lo tanto en la productividad del ecosistema natural o manejado.

En el trópico, la descomposición es más rápida que en otras regiones, la vida media de la hojarasca es de sólo algunas semanas y como resultado, se tiene un rápido reciclaje de nutrientes y una pobre acumulación de la materia orgánica. Los macroinvertebrados pueden influir fuertemente en la actividad de los microorganismos edáficos, al cambiarlos de sitio; además, por cambiar la ubicación física de los residuos y, crear microambientes adecuados para su funcionamiento (Lavelle *et al.*, 1993).

La descomposición, para su estudio, se puede dividir en dos fases. La primera fase consiste en la descomposición de los compuestos lábiles; y la segunda fase en la

descomposición de los compuestos recalcitrantes, ambos definidos con base en su calidad. Dos productos de la descomposición son los iones generados durante la mineralización y el humus. La mineralización, determina la fertilidad química al controlar la liberación de los elementos nutricios para las plantas. De esta manera, contribuir al reciclaje de nutrientes. La importancia de la humificación radica en el mantenimiento de las cantidades de las sustancias húmicas (SH) del suelo. Estas contribuyen a la fertilidad mediante la formación de agregados y por la actividad de sus cargas electrostáticas y, por los nutrientes y energía que se acumula en ellas (Lavelle *et al.*, 1993).

Los oligoquetos son los macroinvertebrados del suelo que presentan mayores posibilidades de manipulación (Brown *et al.*, 2001; Fragoso 2001). Aun cuando los estudios de campo con estos organismos son escasos, tanto en el trópico húmedo como en zonas templadas, se reportan efectos benéficos en la fertilidad del suelo (Curry y Byrne, 1992; Ketterings *et al.*, 1997; Marinissen y Hillemaar, 1997). En Leptosoles y en el trópico subhúmedo son menos los estudios de campo manipulando oligoquetos. No obstante, revelan que el aumento de la abundancia y biomasa de oligoquetos se puede propiciar mejorando el microclima (disminución de la temperatura y aumento de la humedad del suelo) e incrementando la calidad de la materia orgánica del suelo (Tian *et al.*, 1993).

Los gasterópodos terrestres son un grupo de organismos poco estudiado en el ámbito ecológico (Mijail *et al.*, 1996). Son extremadamente sensibles a las variaciones del medio (humedad, calcio disponible, protección y disponibilidad de alimento (Alvarez y Willig, 1993; Naranjo, 1994).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de los mantillos de leguminosas arbóreas (*L. leucocephala* y *L. latisiliquum*) y de dos cultivos de cobertera (*M. deerengianum* y *C. ensiformis*) sobre la abundancia y biomasa de las poblaciones de oligoquetos y gasterópodos, y sobre el microclima del suelo.

MARCO TEÓRICO

EL PROCESO DE DESCOMPOSICIÓN

La descomposición de la hojarasca es el proceso que mantiene la fertilidad natural de los suelos. Para su estudio puede dividirse en dos fases. La primera fase consiste en la descomposición anaerobia de materiales solubles, como azúcares y aminoácidos, donde participan los hongos simples del azúcar (*Phycomycetes* y *Fungi Imperfecti*); y la descomposición aerobia de compuestos lábiles como

las proteína, donde intervienen bacterias y hongos. La segunda fase se refiere a la descomposición de materiales recalcitrantes, como los compuestos estructurales (celulosa, lignina, ceras, etc). Participan los hongos septados (*Ascomycetes*, *Basidiomycetes* y *Actinomycetes*), los cuales son de crecimiento más lento, producen menos esporas, establecen un contacto más estrecho con el sustrato y presentan un metabolismo más especializado (Swift *et al.*, 1979).



El proceso de descomposición consta de los siguientes mecanismos: 1) Lavado. Mecanismo abiótico por el cual se pierden compuestos solubles por acción del agua, se producen cambios químicos y pérdida de peso; 2) Fragmentación. Reducción de tamaño de partícula de los compuestos orgánicos; es diferente del catabolismo porque la fragmentación es más física que química; 3) Mineralización. Término bioquímico que describe la producción de energía por reacciones enzimáticas o cadenas de reacciones en las que se presenta una transformación de los compuestos orgánicos de mayor tamaño a moléculas pequeñas y simples; y 4) Humificación. Formación de moléculas de tamaño y comportamiento coloidal, llamadas humus. En la práctica, los cuatro mecanismos actúan simultáneamente.

En el proceso de descomposición, la actividad microbológica en los trópicos, es altamente dependiente del clima (temperatura y humedad); tipo de coloides minerales del suelo y, de las características físicas y químicas de la hojarasca. Para la actividad microbiana existen dos microambientes en el suelo: dentro de los agregados, donde existe menor cantidad de oxígeno y de materia orgánica a su disposición, por lo que su actividad es menor, pero se encuentran bien protegidos de los flujos de agua; y entre los agregados, donde el flujo del agua facilita el desplazamiento de los microorganismos y se incrementa el contacto con la materia orgánica. Sin embargo, el ambiente es altamente inestable en términos de retención de humedad y disponibilidad de nutrimentos (Lavelle *et al.*, 1993).

LA CALIDAD DE LA HOJARASCA

En los restos de organismos pueden identificarse los siguientes grupos de compuestos orgánicos: 1) carbohidratos monosacáridos, oligosacáridos y polisacáridos en los tejidos de sostén y conducción, así como en las sustancias de reserva; 2) lignina y polímeros derivados del fenilpropano sustituido; 3) proteínas, polipéptidos y ácidos nucleicos, que son polímeros constituidos con base en aminoácidos y oligopéptidos derivados; 4) Grasas, ceras y resinas que funcionan como sustancias de reserva y protección; 5) Otros compuestos como ácidos orgánicos, alcaloides, hormonas, pigmentos, antibióticos, etc., de baja importancia cuantitativa en el proceso de descomposición (Fassbender, 1993).

Algunos compuestos como proteínas y azúcares se degradan muy rápidamente, en cambio, la lignina, celulosa, hemicelulosa, resinas y ceras se descomponen lentamente. A continuación, se menciona la estructura química de las moléculas orgánicas de menor tasa de descomposición.

a) Celulosa. Es el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza, se presenta en las plantas superiores, algas, hongos y en los quistes de los protozoarios. Es un polímero lineal de la celobiosa, la cual corresponde a un disacárido formado por la unión de dos moléculas de glucopiranosas (Lehninger, 1981; Lehninger *et al.*, 1993; Doménech, 1995). Los disacáridos se unen por enlaces beta en los átomos de C 1 y 4. El número de unidades de celobiosa que forman la celulosa varía con las especies vegetales. La descomposición de la celulosa, al principio, sufre

una despolimerización con enzimas extracelulares muy específicas, con la consiguiente liberación de los monómeros, los cuales son descompuestos por enzimas mucho menos específicas. De la despolimerización se obtienen fragmentos pequeños, principalmente glucosa, de tal manera que los microorganismos obtienen energía y C que incorporan a su biomasa (Lehninger, 1981; Doménech, 1995).

b) Hemicelulosa. No está estructuralmente relacionada con la celulosa, la semejanza se encuentra en los enlaces beta 1-4 que también presentan. Son polímeros lineales y ramificados de hexosas, pentosas y/o ácidos urónicos (Lehninger, 1981) que actúan como cementantes de las "fibras" de celulosa.

c) Lignina. Es un polímero no uniforme, cuya unidad fundamental es un núcleo de fenilpropano. Esta situación provoca que la lignina sea bastante resistente a la descomposición. La despolimerización de la lignina se realiza mediante diversas enzimas entre las cuales destacan la polifenoloxidasas y peroxidasas, que traen, como consecuencia, la liberación de compuestos aromáticos (Swift *et al.*, 1989; Doménech, 1995).

La celulosa, hemicelulosa y lignina se encuentran en las plantas en proporciones de 15 al 60%; 10 al 30% y 5 al 30% en peso seco, respectivamente. Son compuestos de difícil descomposición ya que son polímeros con bajo contenido de N y presentan fuertes enlaces (beta 1-4 en celulosa y hemicelulosas); no tienen una composición definida (hemicelulosa y lignina) y es variable su tamaño y estructura. Son los principales constituyentes de las plantas y aumentan en la medida que ellas envejecen (Doménech, 1995). Estos compuestos plantean problemas digestivos a sus consumidores animales, pues la mayoría no son capaces de producir las enzimas necesarias para desdoblarlos y aprovecharlos (Lehninger *et al.*, 1993).

La relación C/N en las plantas varía, en promedio, de 20 a 40, encontrándose valores más bajos en las hojas y valores altos en las partes leñosas (Begon *et al.*, 1988). La relación C/N varía en las bacterias, protozoarios y nemátodos de 5 a 7; hongos 10 a 15; lombrices 5; ácaros 8; herbívoros y carnívoros 8 a 10 (Tate, 1992; Didden *et al.*, 1994; Hassink *et al.*, 1994).

Los desintegradores así como los herbívoros utilizan un recurso alimenticio rico en C y pobre en N por lo que la transición de la planta al consumidor implica una combustión masiva de C (reducción de la C/N). Los productos residuales son CO₂ y fibras. En cambio, los herbívoros y carnívoros tienen una composición similar por lo que la mayor parte de las necesidades energéticas de los carnívoros son cubiertas por las proteínas y grasas de sus presas y, por lo tanto sus productos de excreción son, principalmente, compuestos de N (Sing y Gupta, 1977; Begon *et al.*, 1988).

Los cuerpos de los animales tienen un cociente C/N similar al de la biomasa microbiana; por ello, su descomposición no se halla limitada por la disponibilidad del N, y los cuerpos animales tienden a descomponerse con mucha mayor rapidez que la materia vegetal.

La energía contenida en los compuestos de C como la celulosa, lignina, hemicelulosa y demás compuestos re-

fractarios no está disponible para los consumidores, debido a que la inmensa mayoría de los animales carecen de enzimas que las degraden, este hecho es uno de los rompecabezas evolutivos más notables (Begon *et al.*, 1988).

Las relaciones C/N, lignina/N y polifenoles/N han sido utilizados como indicadores de la descomposición siendo los dos primeros los más utilizados (Anderson y Flanagan 1989; Vitousek *et al.*, 1994). Como las plantas leguminosas, contienen altos contenidos de N, su hojarasca presenta bajos valores de C/N. Esto hace que las tasas de descomposición sean altas.

De manera general, la adición de mantillos con mayores contenidos de lignina y polifenoles se conduce hacia las partes pasivas de la MOS, por el contrario, el mantillo con una tasa baja de lignina/N se conduce hacia la parte activa de la MOS. Las leguminosas fijadoras de N₂ contienen altos porcentajes de N en las hojas, por lo que se espera que su tasa de descomposición sea de algunas semanas (cuatro a ocho) y se encuentre en relación con los bajos contenidos de lignina.

La tasa de lignina/N es a menudo utilizada como índice de calidad que correlaciona muy bien con la tasa inicial de descomposición de la hojarasca (Vitousek *et al.* 1994). Anderson y Flanagan (1989) reportan que la tasa de descomposición de dos leguminosas se correlacionó mejor con la tasa polifenoles/N que con lignina/N.

Es necesario conocer la calidad de las leguminosas utilizadas como mantillo, ya que contiene polifenoles difíciles de degradar (Anderson y Flanagan, 1989); influye en las poblaciones de las malezas (Caamal, 1995) y de la fauna edáfica aporta N; y posiblemente, promueve la formación de la fracción poco activa de MOS.

LA FAUNA EDÁFICA

El efecto de la fauna en el suelo puede ser directo (consumo y mezcla de MO con los minerales) e indirecto (modificación del microambiente que tiene influencia en la actividad de los microorganismos). Dos ejemplos son: 1) La fauna puede incrementar significativamente la mineralización del N por dos razones debido a que la relación C/N de la fauna es mucho mayor que la de su alimento; y 2) la fauna estimula la actividad de los microorganismos (Hassink *et al.* 1994; Didden *et al.* 1994; Opperman *et al.* 1993).

A nivel del suelo, la fauna se distribuye a lo largo del perfil; de acuerdo a sus hábitos alimenticios se les nombra epígeos a los que habitan sobre la superficie del suelo; endogéicos a los que se encuentran por debajo de la superficie; anélicos a los que se mueven desde la superficie y por debajo de ella.

En la fauna epígea sobresalen los miriápodos, isópodos, caracoles y lombrices pigmentadas, que desmenuzan y disminuyen el tamaño de la hojarasca. En la endogéica se encuentran principalmente lombrices no pigmentadas y termitas comedoras de humus, que se alimentan de materia orgánica y raíces muertas. En la anélica se encuentran lombrices y termitas que trasladan la hojarasca de la superficie hacia otros horizontes más pro-

fundos; mejoran las características hidráulicas y estructura del suelo (Anderson e Ingram, 1993).

El proceso de descomposición en los suelos del trópico se encuentra bajo el control de los factores biológicos. Como consecuencia, para preservar la fertilidad del suelo de estas regiones, se requiere un buen conocimiento de la actividad de los organismos edafícolas (Martin y Lavelle, 1992).

La fauna del suelo, que participa en el proceso de descomposición, se ha agrupado en descomponedores y detritívoros. Los organismos descomponedores son bacterias y hongos como Phycomicetes y Fungi Imperfecti que participan en las primeras etapas de la descomposición; consumen principalmente azúcares y aminoácidos. Conforme avanza la descomposición, el proceso es más lento y participan hongos septados especializados como los Ascomycetes, Basidiomycetes y Actinomycetes que pueden degradar las celulosas y ligninas y proteínas más complejas. Los organismos detritívoros son consumidores generalistas que se alimentan del detritus y de las poblaciones de microorganismos asociados a él. Una gran diversidad de invertebrados edafícolas representan a este grupo, y se les ha clasificado de acuerdo a su tamaño como micro, meso, macro y megafauna: la microfauna (diámetro corporal menor de 100 µm) comprende protozoos, gusanos nemátodos y rotíferos; la mesofauna (diámetro corporal entre 100 µm y 2 mm), comprende a los Acari (ácaros del mantillo), Collembola y Enchytraeidae; la macrofauna (diámetro corporal entre 2 y 20 mm) y megafauna (> de 20 mm) que comprenden Isópoda; Diplópoda; larvas de moscas (Diptera) y algunos escarabajos (Coleóptera); Oligoqueta, que son las lombrices de tierra y Mollusca que comprenden a los caracoles y babosas.

La interacción entre los desintegradores y los diferentes tipos de detritívoros es lo que regula la descomposición y se presentan a tres niveles: 1) tramas alimentarias entre microorganismos y microfauna; 2) transformaciones de hojarasca (a material fragmentado y materia fecal), por la mesofauna y algunos de macrofauna; 3) la macrofauna que son los organismos que interactúan con los microorganismos mediante relaciones mutualistas como rumen externo e interno, y que además, mejoran la estructura del suelo. El papel fundamental de estos organismos es el reciclaje de los nutrientes (Begon *et al.*, 1988; Storck y Eggleton, 1992).

En particular, las lombrices de tierra incrementan la descomposición de la hojarasca y la liberación de nutrientes; incorporan la hojarasca al suelo; sus excretas son agregados enriquecidos con microorganismos (Anderson y Flanagan, 1989; Martin y Lavelle 1992; Curry y Byrne, 1992; Tian *et al.* 1993; Kretzschmar y Ladd, 1993; Parkin y Berry, 1994). Las termitas y las hormigas digieren la celulosa y algunas especies de estos grupos la lignina (Anderson y Flanagan, 1989; Tian *et al.* 1993). Los miriápodos disminuyen el tamaño de la hojarasca y la incorporan al suelo (Tian *et al.* 1993; Didden *et al.* 1994).

Las lombrices de tierra tienen cuerpo vermiforme, segmentado mediante surcos transversales que lo dividen en anillos bien unidos, cuyo número varía de 100 a 140. tanto interna como externamente. Su cuerpo es muy resistente, su piel es pálida y delgada, y está recubierta por una sustancia húmeda y pegajosa que le permite respirar. Esta es



la razón por la cual habitan en lugares húmedos, por eso el agua es uno de los constituyentes principales, ya que representa de un 80 al 90% de su peso fresco. Su piel tiene coloraciones grises y rosáceas, que la mayoría de las veces depende de su tipo de alimentación. Poseen un aparato digestivo que recorre todo su cuerpo y adaptado para el consumo de una dieta orgánica en descomposición sobre todo de origen vegetal. Su cabeza es reducida y no poseen apéndices cefálicos, ni ojos. No presentan branquias pero sí redes vasculares bien desarrolladas en la piel. los órganos excretorios son metanefridios y están dispuestos segmentalmente, al igual que los nervios. También poseen un aparato circulatorio que recorre todo el cuerpo.

Las lombrices de tierra son organismos hermafroditas y poseen aparatos reproductores bien desarrollados que se limitan a unos cuantos segmentos. Hay cópula y la fecundación es mutua. Poseen una unión de segmentos llamada clitelo, que es una estructura reproductiva característica de esta clase.

Las lombrices de tierra son de gran importancia biológica pues son formadores de túneles y galerías subterráneas que sirven para airear y permitir la filtración del agua en el suelo. Primero introduce la parte delantera del cuerpo haciendo una grieta en el suelo, se hincha y de ese modo va haciendo una galería redonda, cuyas paredes endurece por medio de la sustancia húmeda y pegajosa que ella misma secreta. Si el terreno es seco, se tragan la tierra y luego la expulsa por el otro extremo. Cuando hay un aumento en la temperatura del suelo, excavan más profundo o emigran hacia lugares húmedos, de lo contrario, si se secan mueren ya que no pueden desarrollarse normalmente si el contenido de agua del cuerpo disminuye más del 18%. La tolerancia a la desecación es un factor limitante en la ecología de las lombrices de tierra. Salen a la superficie de noche o cuando llueve debido a que sus galerías se llenan de agua. Son organismos principalmente herbívoros y sus desechos son compuestos nitrogenados ricos en amoníaco.

La importancia de los oligoquetos en el suelo se debe principalmente, a que incrementan la descomposición de

la materia orgánica, facilitan la circulación de oxígeno en el suelo y aumentan la capacidad de retención de agua en él. En muchas situaciones, en particular en los límites de tolerancia, las poblaciones pueden estar limitadas por las condiciones de humedad y temperatura adversas y la explotación total de las fuentes de alimento disponibles. La fecundidad depende en gran medida de las reservas alimenticias y su mecanismo homeostático regula la abundancia de las poblaciones que compiten; también depende enormemente de la temperatura y humedad; así también el período de incubación de los capullos, el período de crecimiento desde la emergencia hasta la madurez sexual.

Las sustancias minerales que son expulsadas por ellos, a manera de desechos, contienen fósforo, nitrógeno y minerales (Stork, 1992) que éstos pueden servir como nutrimentos para los vegetales. Además sirven como alimento de diferentes animales, como aves. Se les utiliza también como carnada o cebo en la pesquería.

Allí donde las lombrices son abundantes, entierran las hojas muertas, las mezclan con el suelo (y las exponen así a otros descomponedores y detritívoros), horadan el suelo (aumentando así la aireación y el drenaje) y depositan heces ricas en materia orgánica (Begón *et al* 1988).

Se han registrado 4 especies de lombrices de tierra en Yucatán, pertenecientes a la familia Megascolecidae: *Eodrilus oxkutzcabensis*, *Balanteodrilus persaei* o *pearsei*, *Dichogaster affinis*, o *Michalsen Dichogaster balau* o *bolau* o *Michaelson*. Fragoso *et al*, (1995) reportaron cuatro especies pertenecientes a la familia Megascolecidae: *Mayadrilus rombki*, *M. calakmulensis*, *Diploplecton oxkutzcabensis* y *Balanteodrilus pearsei*, estas dos últimas registradas en el estado de Yucatán.

El conocimiento de la influencia del mantillo de leguminosas en la fauna edáfica y la influencia de ésta en la mineralización y en la estabilización de la MO proveniente del mantillo, servirá para realizar un mejor manejo tendiente a preservar la fertilidad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en Xmatkuil al sur de Mérida, Yucatán México a los 20° 52' 3.86" LN y los 89° 37' 20.05" LW (Fig 1). La vegetación es secundaria proveniente de selva baja caducifolia. El clima es Awo (subhúmedo cálido con lluvias en verano y sequía intraestival; la temperatura media anual de 26°, con una precipitación anual de 998 mm (García, 1983). El suelo corresponde al grupo Leptosol con profundidad de hasta 20 cm, con pedregosidad y rocosidad variables, sobre roca calcárea.

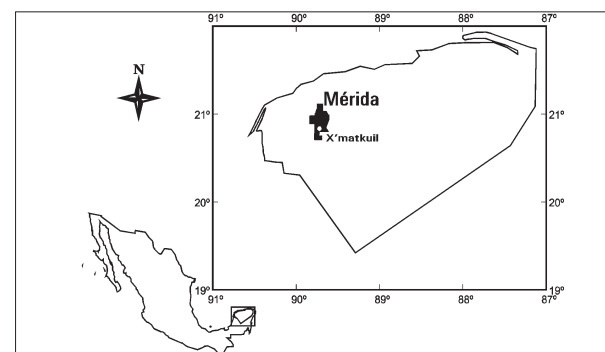


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

PARCELA EXPERIMENTAL

Este trabajo se realizó en una parcela experimental establecida desde 1994, donde se asignaron tratamientos con coberteras vivas y mantillos para determinar su efecto sobre el control de arvenses y rendimiento de maíz (Caamal, 1995). En especial, para este trabajo se seleccionaron cinco tratamientos para evaluar la dinámica de las poblaciones de oligoquetos y gasterópodos, así como la calidad de las leguminosas y descomposición de los mantillos. Los tratamientos a evaluar fueron: 1) *Leucaena* en el que se aplicó un mantillo fresco de *L. leucocephala* (Lam.) De Witt; 2) *Lysiloma* en el que se aplicó un mantillo fresco de *L. latisiliquum* (L.) Benth; 3) *Mucuna* con cobertera de *M. deerengianum* (L.) Medic.; 4) *Canavalia* con cobertera de *C. ensiformis* (L.) D.C.; y 5) Control sin mantillos, ni cultivos de cobertera, solo maíz. Se utilizaron nueve unidades experimentales por cada tratamiento.

MANEJO DEL CULTIVO

En la región la siembra del maíz se realiza al inicio de la época de lluvias (junio), sin embargo, por el retraso en las lluvias, el presente estudio se inició en el mes de agosto de 1995. Antes de la siembra del maíz, se realizó un deshierbe en todos los tratamientos, debido a que el cultivo anterior produjo en el tratamiento control una gran cantidad de hojarasca proveniente de las arvenses y del rastrojo de maíz; en los tratamientos con cultivo de cobertera se presentaron mantillos de la leguminosa, hojarasca de arvenses y el rastrojo del maíz; y en los tratamientos con mantillo de leguminosas se presentaron hojarasca de arvenses y rastrojo de maíz. En la siembra del maíz, se utilizó palo sembrador, colocando tres semillas en cada hoyo y dejando finalmente dos plantas, la densidad de siembra fue de 60 mil plantas ha^{-1} . La semilla utilizada fue la V-528. El tamaño de las unidades experimentales para la siembra del maíz fue de 25 m^2 (5 x 5) m con una parcela útil de 16 m^2 (Caamal *et al.*, 2002).

Las ramas y hojas de las plantas utilizadas como mantillos se aplicaron, de forma homogénea, un día antes de la siembra del maíz. Se utilizaron 12 t ha^{-1} de peso fresco por cada mantillo, que corresponden en peso seco a 3.6 t ha^{-1} de mantillo de *L. leucocephala* y 5.8 t ha^{-1} de mantillo de *L. latisiliquum*.

Los cultivos de cobertera se sembraron 15 días después de la siembra del maíz y de la misma forma en filas intercaladas. No se utilizaron fertilizantes.

OLIGOQUETOS Y GASTERÓPODOS

Los muestreos de oligoquetos y gasterópodos se llevaron a cabo al azar en cuadrantes de 0.25 m^2 y a una profun-

didad de hasta 20 cm (Anderson e Ingram 1993); se realizaron de forma manual por la mañana entre las 7 y 10 horas y en tres tiempos: 1) A las dos semanas después de la siembra (Plántula); 2) 10 semanas después de la siembra (Floración); y 3) 12 semanas después de la siembra (Cosecha). Se tomaron 9 muestras por tratamiento.

Los gasterópodos se secaron a 60° C por 48 horas para obtener el peso seco correspondiente a la biomasa. Los oligoquetos se pesaron en fresco en el laboratorio después de anestesiarnos con alcohol al 10% y fijarlos en formol al cuatro por ciento. Se calculó el tamaño o peso promedio por organismo.

El análisis de varianza se realizó con los datos de abundancia y biomasa transformados en $\text{Log}_{10} + 1$.

CALIDAD Y DESCOMPOSICIÓN DE LOS MANTILLOS

La calidad de la hojarasca de *L. leucocephala*, *L. latisiliquum*, *M. deerengianum* y *C. ensiformis* se determinó en muestras compuestas de ramas y hojas, secadas a 35-40 °C, molidas, y tamizadas con una malla del número 60 (<0.25 mm).

Los análisis se realizaron por duplicado. El N se analizó por el método del Kjeldhal; C por la oxidación húmeda con dicromato de potasio y calor externo; lignina, hemicelulosa y celulosa y polifenoles siguiendo el método de Folin-Denis (van Soest, 1963; Anderson e Ingram, 1993).

El mantillo se aplicó en fresco, se midió su equivalencia en peso seco. Para evaluar la descomposición se colocaron 17 g de hojas (en peso seco) en bolsas de malla de 25 cm de largo por 10 cm de diámetro con abertura en forma de cuadros de 2.25 mm^2 . La bolsa se colocaron en las parcelas y se retiraron, una a una, en los siguientes tiempos (8, 20, 48, 65, 121, 175, 314 días). Se pesó el material remanente. Los datos de pérdida de peso se ajustaron al modelo simple de descomposición exponencial negativa.

MICROCLIMA DEL SUELO

La humedad del suelo se midió por pérdida de peso y la temperatura del suelo se midió a 5 cm de profundidad a las 7, 11 y 15 horas utilizando un termómetro de mercurio.

Los resultados se analizaron como series de tiempo y la estimación de la tendencia se obtuvo por el método de promedio móvil (orden 3), con lo cual se eliminan los esquemas irregulares (Spiegel 1997).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PRODUCCIÓN DE FOLLAJE DE LOS CULTIVOS DE COBERTERA Y CALIDAD DE LOS MANTILLOS

El follaje producido por *M. deerengianum* fue de $7974 \pm 254 \text{ kg ha}^{-1}$ (2070 kg ha^{-1} en peso seco) y *C. ensiformis* fue $3850 \pm 106 \text{ kg ha}^{-1}$ (1086 kg ha^{-1} en peso seco). A las dos semanas los cultivos de cobertera presentaron coberturas del 40 al 60% y a las 10 semanas la cobertura fue del 60 al 100%.

La calidad del follaje comprendida como la relación (lignina + celulosa)/N de *L. leucocephala* (7.63) fue mayor que *L. latisiliquum* (11.22). En el caso de los cultivos de cobertera, la calidad de *C. Ensiformis* fue de 5.54 y la de *M. deerengianum* fue de 6.48 (Tabla 1).

DESCOMPOSICIÓN DE MANTILLOS

El proceso de descomposición del mantillo de *L. leucocephala* presentó dos fases: la primera a los 20 días, en ella, la pérdida de peso de los materiales fue muy rápida (entre 60 y 80%), presentando una $k = -22.8$ y una vida media de 10.5 días. La ecuación de la primera fase fue $y = 0.86 e^{-22.8t}$ ($r^2 = 0.87$). En tanto que la fase II (después de los 20 días) fue más lenta, la ecuación de la segunda fase fue $y = 0.28 e^{-1.17t}$ ($r^2 = 0.91$).

El mantillo de *L. latisiliquum* se descompuso de manera más lenta que *L. Leucocephala*, se presentó una sola fase con una $k = -1.7$ y con una vida media de 171 días. La ecuación fue $y = 0.98 e^{-1.7t}$ ($r^2 = 0.99$).

OLIGOQUETOS

A las dos semanas, la mayor biomasa de oligoquetos se encontró en los tratamientos Mucuna, Leucaena y Lysilima ($p < 0.05$) (Tabla 2).

A las 10 semanas las dos leguminosas utilizadas como mantillos presentaron los valores menores en abundancia. Además hubo relación entre la calidad del aporte de los mantillos de las cuatro leguminosas estudiadas con la abundancia de oligoquetos, resultando que a mayor cali-

dad del mantillo mayor abundancia de oligoquetos, considerando que la calidad de la hojarasca está determinada por la relación (Lignina + Celulosa)/N (Fig 2). A las 12 semanas después de la siembra no se encontraron oligoquetos en todos los tratamientos.

En el Control y en Canavalia la abundancia de oligoquetos aumentó para la semana 10 ($p < 0.05$). Se presentó una reducción en la biomasa de oligoquetos entre las semanas 2 y 10 que va en la siguiente secuencia 69%, 84% y 87% para Lysiloma, Mucuna y Leucaena, respectivamente.

Los oligoquetos colectados a las dos semanas después de la siembra fueron de mayor tamaño que los colectados a las 10 semanas (Fig 3). La especie dominante fue *Balanteodrilus pearsei*.

La toma de muestras de oligoquetos debe realizarse por la mañana, ya que después de las 10 horas no se encuentran en el suelo, posiblemente se localicen entre el horizonte C o entre la roca y la parte superior del aquitardo calcáreo, resguardándose del sol y las temperaturas altas.

Los mantillos y cultivos de cobertera influyeron favorablemente en el aumento de la abundancia y biomasa de oligoquetos, destacándose *L. leucocephala* como mantillo y *M. deerengianum* como cultivo de cobertera.

La abundancia de oligoquetos en Mucuna, Leucaena y Lysiloma fue superior a los 51 individuos m^{-2} reportados para milpas por Brown *et al.*, (2001). Frago (2001) reportó una media de 200 individuos m^{-2} en selvas medianas y bajas, situación que se está muy cerca de alcanzar con el uso de *M deerengianum* y *L. Leucocephala*.

Los valores de biomasa de oligoquetos encontrados en los tratamientos Control, Canavalia y Lysiloma, se encontraron por debajo de la media de 26 g m^{-2} determinada por Frago (2001).

Brown *et al.*, (2001) encontraron que una biomasa de oligoquetos mayor de 30 g m^{-2} puede ocasionar efectos positivos en la calidad del suelo y en la producción agrícola, biomasa que se encontró en Mucuna y Leucaena solo durante la semana 2; sin embargo, considerando que el grupo Leptosol se caracteriza por su escasa cantidad de tierra fina, es posible que aún las cantidades bajas de oligoquetos encontradas en este estudio puedan tener un impacto benéfico en el suelo y en los cultivos.

Tabla 1. Composición química de los aportes de materia orgánica con mantillos y cultivos de cobertera.

Parámetros	<i>L. leucocephala</i>	<i>L. latisiliquum</i>	<i>M. deerengianum</i>	<i>C. ensiformis</i>
Nitrógeno (kg ha ⁻¹)	126.0	166.0	78.4	41.7
Lignina (kg ha ⁻¹)	287	895	117	66
Celulosa (kg ha ⁻¹)	674	967	391	165
Hemicelulosa (kg ha ⁻¹)	376	601	544	144
Polifenoles (%)	3.95	8.61	-	-
Agua (%)	64	56	-	-

Tabla 2. Poblaciones de oligoquetos y gasterópodos en cultivo de maíz con leguminosas.

Tratamiento	2 semanas	10 semanas	12 semanas
Abundancia (individuos m⁻²) de oligoquetos			
Control	17a	263bβ	0
Canavalia	53aba	223bβ	0
Mucuna	189ba	168ba	0
Leucena	145ba	125aba	0
Lysiloma	100aba	48aa	0
Biomasa (g m⁻²) de oligoquetos			
Control	3.64aa	3.62aa	0
Canavalia	7.15aba	9.25aa	0
Mucuna	29.39ba	4.80aβ	0
Leucaena	36.85ba	4.76aβ	0
Lysiloma	12.94ba	3.98aβ	0
Abundancia (individuos m⁻²) de gasterópodos			
Control	142aa	72aa	57ab *
Canavalia	137aa	222aa	133b *
Mucuna	58aa	184aa	181b *
Leucaena	154aa	100aa	5aβ
Lysiloma	194aa	101aa	4aβ
Biomasa (g m⁻²) de gasterópodos vivos			
Control	11aa	3aaβ	2abβ
Canavalia	5aa	8aa	5ba
Mucuna	13aa	9aa	5ba
Leucaena	5aa	4aa	2aβ
Lysiloma	9aa	5aa	2aβ

Letras distintas (a y b) indican que hay diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos. Letras distintas (á y â) indican que hay diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tiempo de muestro. $n = 9$.

Este estudio es el primero en reportar la abundancia y biomasa de oligoquetos en Leptosoles de origen cárstico en Latinoamérica.

Los Ferrasoles y Acrisoles son los suelos tropicales con mayores abundancias de oligoquetos (120 a 300 individuos m⁻²) pero también de mucho mayor volumen de suelo, que puede variar de entre cuatro a seis veces más al del Leptosol (Tian *et al.*, 1993). Además debe considerarse que los Ferrasoles se localizan en zonas con climas tropicales lluviosos y que el presente estudio se realizó en una zona de trópico subhúmedo (Awo).

La aplicación de mantillos y el uso de cultivos de cobertura propician un ambiente edáfico más favorable para los oligoquetos, principalmente por la conservación de la humedad del suelo y la provisión de alimento.

La temperatura del suelo parece no tuvo, al parecer, ninguna influencia negativa en la abundancia de oligoquetos; por el contrario, a mayores temperaturas mayor es la abundancia; sin embargo, fue la humedad del suelo la que favoreció a estos organismos.

Diversos autores (Tian *et al.*, 1993; Fragoso *et al.* 1995) encontraron que la calidad de los mantillos ejerce una clara influencia en las poblaciones de oligoquetos, situación similar a lo que ocurrió en este trabajo. La calidad del mantillo de *L. leucocephala*, determinada por la relación (Lignina + celulosa)/N como se observa en la Figura 2, es mayor que *L. latisiliquum*. En el caso de los cultivos de cobertura, la calidad de la biomasa de *C. ensiformis* es mayor que la de *M. deerengianum*; sin embargo, la cantidad de biomasa de hojarasca producida es mayor en el tratamiento con *M. deerengianum* producto de su mejor desarrollo y adaptación a las condiciones de cultivo de maíz y al suelo.

GASTERÓPODOS

A las dos y 10 semanas después de la siembra, la abundancia y biomasa de gasterópodos fueron similares entre tratamientos, debido a la gran variabilidad de los datos. Sin embargo, a las 12 semanas, los tratamientos con las plantas utilizadas como cultivos de cobertura *M. deerengianum* y *C. ensiformis* presentaron los valores más altos en abundancia y biomasa de gasterópodos, mientras que los tratamientos con mantillos de *L. leucocephala* y *L. latisiliquum* presentaron una disminución en la abundancia (Tabla 2). Es posible que esta situación sea producto de la falta de alimento para los organismos ya que los mantillos pierden sus compuesto lábiles en las primeras posteriores a su aplicación.

Los resultados sugieren que tanto el mejoramiento del microclima como la cantidad y calidad del alimento (follaje), debidas a la cobertura del 100% en *M. deerengianum* y del 60% en *C. ensiformis*, son factores que favorecen la presencia de gasterópodos terrestres. La especie que domina las poblaciones de gasterópodos es *Praticolela graseola*.

Estudios realizados en Cuba reportan abundancias de 130 individuos m⁻² en selva baja (Mijail *et al.*, 1996), valores únicamente superados en el tratamiento con *C. ensiformis* como cultivo de cobertura y en *M. deerengianum* en menor grado. En México son escasas las investigaciones con las cuales se puedan comparar estos resultados. Brown *et al.*, (2001) realizaron una recopilación de investigaciones sobre la macrofauna en México y no reportan ni biomasa ni abundancia debido a que estos organismos no llegan a ser importantes; sin embargo, en este estudio los gasterópodos son de mayor abundancia que los oligoquetos, tal vez por la alta cantidad de calcio que hay en los Leptosoles de la región y que los gasterópodos necesitan en cantidades abundantes (Stork y Eggleton, 1992; Alvarez y Willig, 1993; Hermida y Ondina, 1995; Naranjo-García y Palacio, 1997).

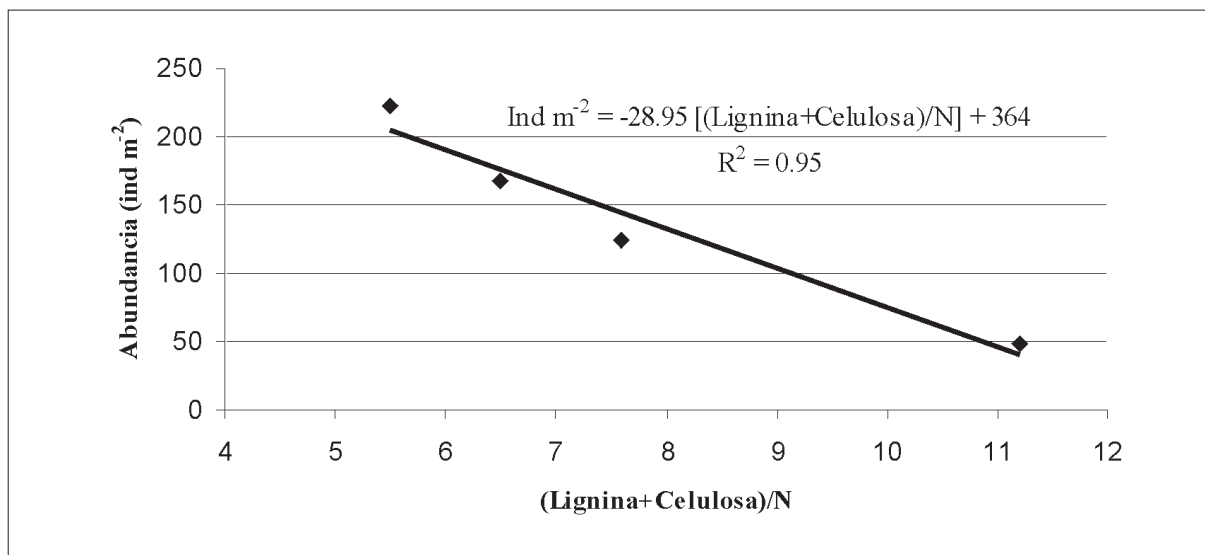


Figura 2. Relación entre la calidad de la hojarasca de las leguminosas utilizadas como mantillos y cultivos de cobertera con la abundancia de oligoquetos.

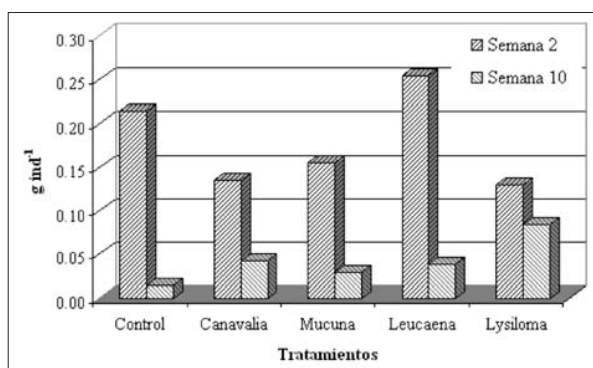


Figura 3. Peso promedio de oligoquetos en cultivos de maíz con mantillos y cultivos de cobertera.

MICROCLIMA

El contenido de humedad fue menor en el control en más del 90% de los casos, lo cual indica que ambos mantillos y cultivos de cobertera influyen en la conservación de la humedad del suelo (Fig 4).

La influencia de los mantillos en la temperatura del suelo fue más evidente a las 15 h. En el control se presentaron, en todos los días medidos, los valores más altos de

temperatura; sin embargo, las diferencias entre mantillos no son evidentes (Figs. 5, 6, y 7). Los cultivos de cobertera generan mantillo y biomasa durante el ciclo de cultivo por lo que disminuyen la temperatura y contribuyen a la conservación de la humedad del suelo, esto seguramente influye favorablemente en las poblaciones de oligoquetos y gasterópodos.

Los gasterópodos fueron menos susceptibles a la disminución de la lluvia, en comparación con los oligoquetos, por lo que se encontraron durante todo el ciclo del cultivo aun cuando la humedad del suelo había disminuido.

IMPLICACIONES AGRONÓMICAS

Con respecto a cuestiones agronómicas, Caamal *et al.*, (2001) reportan que el uso de los cultivos de cobertera y mantillos de leguminosas contribuyeron al aumento de la producción del maíz, ayudaron en el control de arvenses y en el control de plagas. Además, en el caso de los cultivos de cobertera se cosecha el grano de la leguminosa que es un producto adicional.

Los resultados de este trabajo permiten suponer que el aumento en la producción de maíz por el uso de mantillos y cultivos de cobertera estuvo relacionado con la conservación de la humedad y con la abundancia y biomasa de oligoquetos en el caso del uso de *L. leucocephala* como mantillo y de *M. deereganum* como cultivo de cobertera.

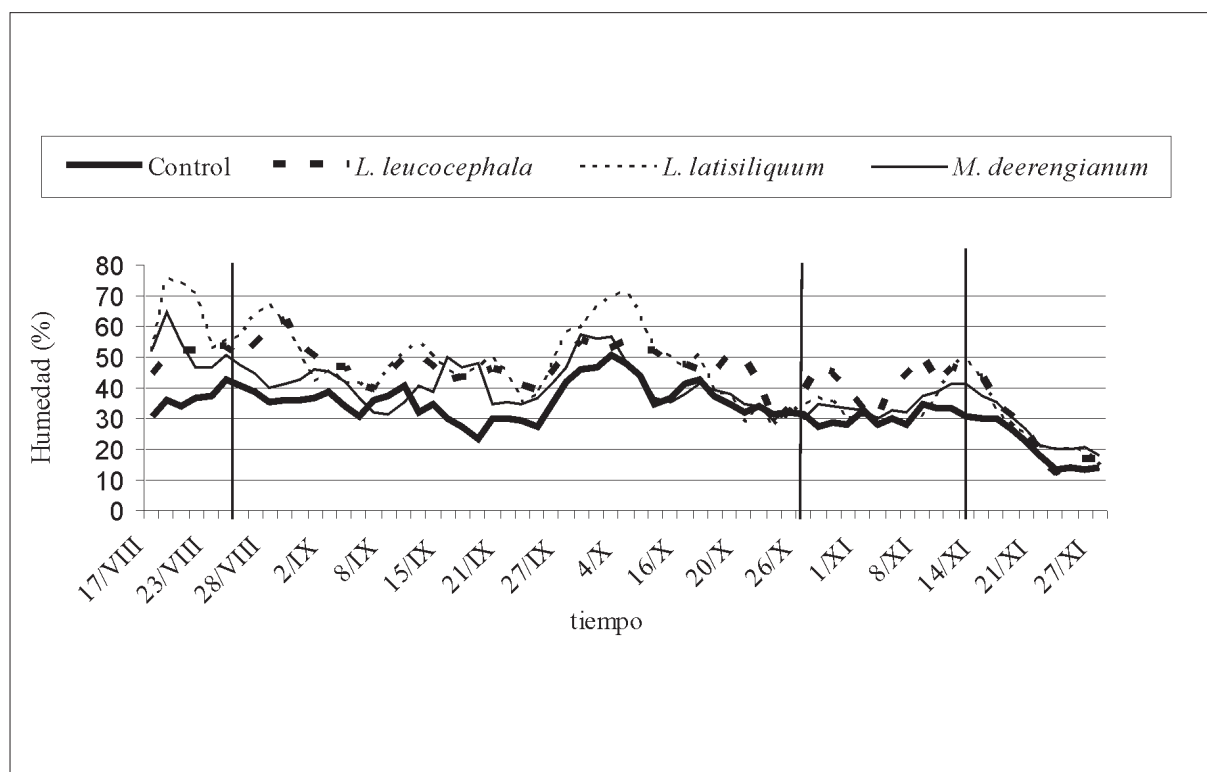


Figura 4. Retención de la humedad del suelo con mantillos y cultivos de cobertera.

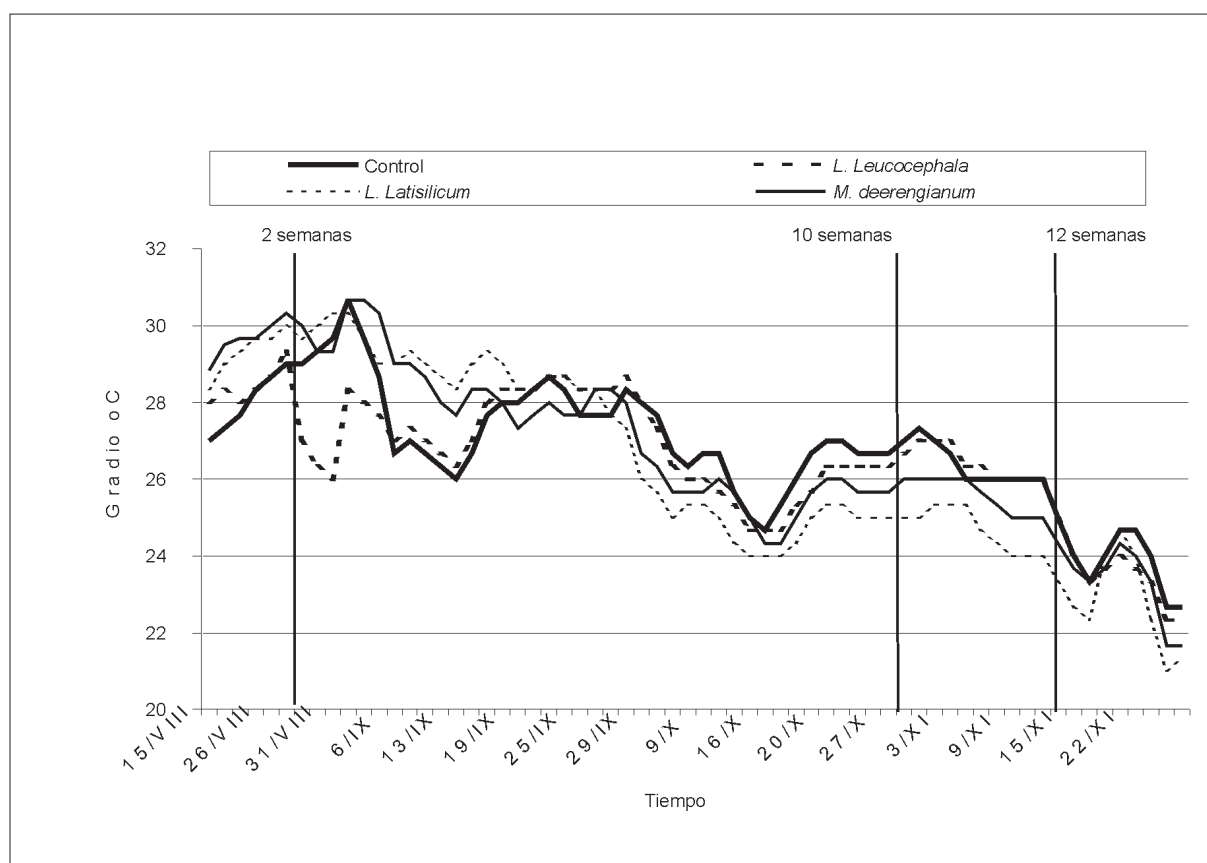


Figura 5. Temperatura del suelo a las siete horas en cultivo de maíz con mantillos y cultivos de cobertera.

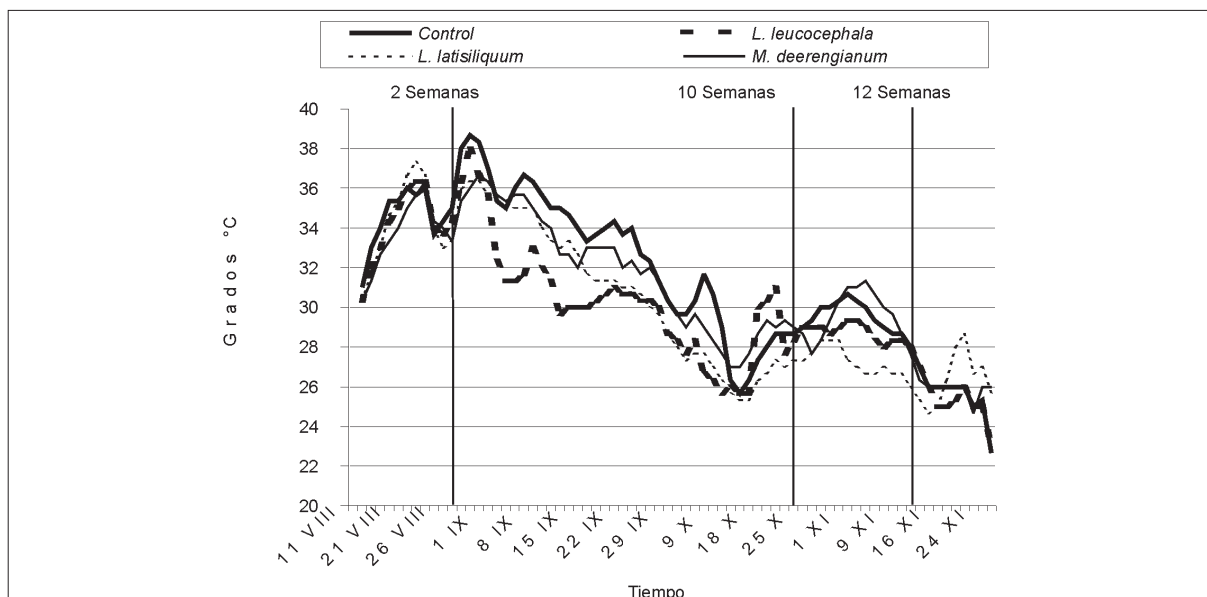


Figura 6. Temperatura del suelo a las 11 horas en cultivo de maíz con mantillos y cultivos de cobertera.

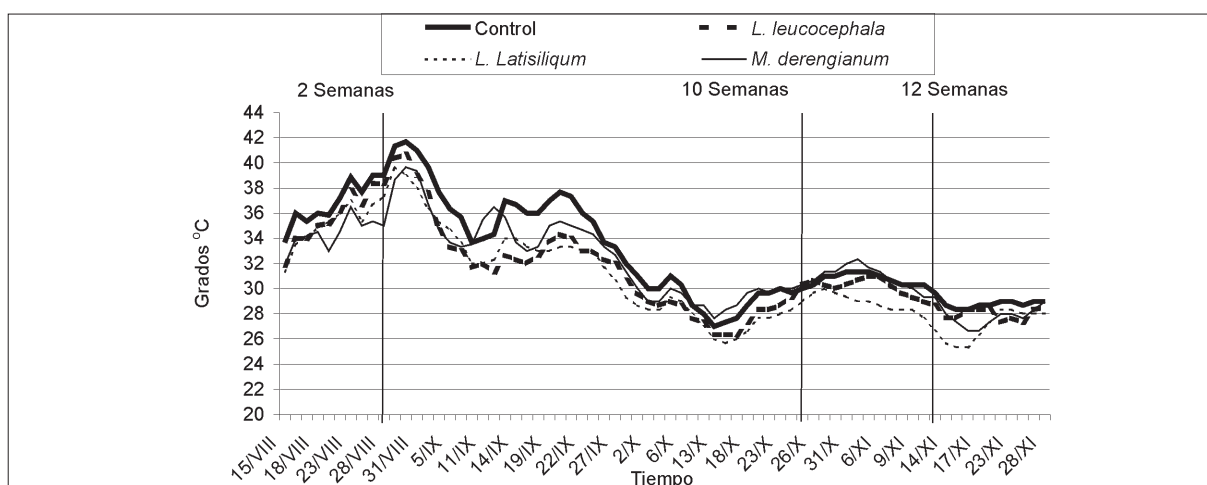


Figura 7. Temperatura del suelo a las 15 horas en cultivo de maíz con mantillos y cultivos de cobertera.

CONCLUSIONES

El mantillo de *L. leucocephala* y *M. deerengianum* y *C. ensiformis* como cultivo de cobertera ocasionan un aumento temporal en la abundancia de las poblaciones de oligoquetos. El mantillo de *L. latisiliquum* no tiene efecto en la abundancia de oligoquetos.

Los oligoquetos son más dependientes de la humedad y de la calidad del recurso que los gasterópodos.

Cuando la humedad del suelo disminuye, el uso de *M. deerengianum* como cultivo de cobertera promueve un aumento de la abundancia y biomasa de los gasterópodos.

Mantillos y cultivos de cobertera propician una mayor conservación de la humedad y una disminución de la temperatura del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (proyecto 0308P-B9506), a la Fundación Rockefeller y al proyecto CYTED por el apoyo económico. Al M en C. Arturo Caamal-Maldonado por el apoyo técnico.

REFERENCIAS

- Alvarez, J. y M. R. Willig, 1993.** Effects of treefall gaps on the density of land snail in the Luquillo experimental forest of Puerto Rico. *Biotropica*. 25(1) : 100-110.
- Anderson, J. y J. Ingram, 1993.** *Tropical soil biology and fertility: a hand book of methods*. CAB International, Wallingford, UK.
- Anderson, J. y P. Flanagan, 1989.** Biological processes regulating organic matter dynamics in tropical soils. En: Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Coleman, Oades y Uehara Eds. Niffl project. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Begon, M., J.L. Haper y C.R. Townsend, 1988.** Ecología: individuos, poblaciones y comunidades. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Brown, G., P. Hendrix y M. Beare, 1995.** Influence of earthworms (*Lumbricus rubellus*) on sorghum litter processing and nitrogen mineralization in two Ultisols. *Acta Zool. Fennica*, 196: 55-59
- Brown, G., C. Fragoso, I. Barois, P. Rijas, J.C. Patrón, J. Bueno, A.G. Moreno, P. Lavelle y V. Ordaz, 2001.** Diversidad y rol funcional de la macrofauna edáfica en los ecosistemas tropicales mexicanos. *Acta Zool Mexicana*, Número especial 1: 79-110.
- Caamal, A., 1995.** El uso de leguminosas como cobertura viva y muerte para el control de arvenses en el cultivo de maíz como alternativa al sistema de roza-tumba-quema, en Yucatán México. Tesis de "Magister Scientiae", CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Caamal-Maldonado, J., J. Jiménez-Osornio, A. Torres-Barragan y A. Anaya, 2001.** The use of allelopathic legume cover and mulch species for weed control in cropping systems. *Agron. J.*, 93 (1): 27-36.
- Curry, J. y D. Byrne, 1992.** The role of earthworms in straw decomposition and nitrogen turnover in arable land in Ireland. *Soil Biol. Biochem.*, 24(12): 1409-1412.
- Didden, W., J. Marinissen, M. Vreeken-Buijs, S. Burgers, R. de Fluiter, M. Geurs y L. Brussaard, 1994.** Soil meso- and macrofauna in two agricultural systems: factors affecting population dynamics and evaluation of their role in carbon and nitrogen dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 51: 171-186.
- Domenéch, X., 1995.** Química del suelo: El impacto de los contaminantes. Miraguano. Madrid, España.
- Fassbender, H., 1993.** Modelos edafológicos en sistemas agroforestales. CATIE-GTZ. Turrialba, Costa Rica.
- Flores S. e I. Espejel, 1994.** *Tipos de Vegetación de la Península de Yucatán*. Etnoflora Yucatanense. Universidad Autónoma de Yucatán. Fascículo 3. Yucatán, México.
- Fragoso, C., S.W. James y S. Borges, 1995.** Native earthworms of the North Neotropical Region: current status and controversies. En: P.F. Hendrix (Ed.). *Earthworm ecology and Biogeography in North America*. Lewis Publishers, USA.
- Fragoso, C., 2001.** Las lombrices de tierra en México (Annelida, Oligochaeta): Diversidad, ecología y manejo. *Acta Zool. Mexicana.*, Número especial 1: 131-171:
- García, E., 1983.** Modificaciones al sistema de clasificación climática de Copen. Apuntes de climatología. Talleres Larios. México. D.F.
- Hassink, J., A. M. Neutel y P. C. de Ruiter, 1994.** C and N mineralization in sandy and loamy grassland soils: the role of microbes and microfauna. *Soil Biology and Biochemistry* 26(11): 1565-1571.
- Hermida, J. y P. Ondina, 1995.** Estudio ecológico de *Vitrea* (*Vitrea contracta* (Westerlund, 1871) (Molusca: gastropoda: Pulmonata: Stylommatophora) en el noreste de la Península Ibérica. *An. Biol.* 20(9): 47-52.
- Kretzschmar, A., y J. Ladd, 1993.** Decomposition of C-labelled plant material in soil: the influence of substrate location, soil compaction and earthworm numbers. *Soil Biology and Biochemistry* 25(6): 803-809.
- Ketterings, Q.M., J.M. Blair y J.C. Marinissen, 1997.** Effects of earthworms on soil aggregate stability and carbon and nitrogen storage in a legume cover crop agroecosystems. *Soil Biol. Biochem.*, 29(3-4): 401-408.
- Lavelle, P., E. Blanchart, A. Martin y S. Martin, 1993.** A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. *Biotropica* 25(2): 130-150.
- Lehninger, A., 1981.** Bioquímica, las bases moleculares de la estructura y función celular. Omega, Barcelona, España
- Lehninger, A., D. Nelson y M. Cox, 1993.** Principles of biochemistry. 2a edición. Woth Pub. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Marinissen, J.C. y S.I. Hillenaar, 1997.** Earthworm-induced distribution of organic matter in macro-aggregates from differently managed arable fields. *Soil. Biol. Biochem.*, 29(3-4): 391-395.
- Martin, A. y P. Lavelle, 1992.** Effect of soil organic matter quality on its assimilation by millsonia anomala, a tropical geophagous earthworm. *Soil Biology and Biochemistry* 24(12): 1535-1538.
- Mba, C., 1993.** Field studies on two rock phosphate solubilizing Actinomycetes isolates ask biofertilizer sources. *Environ. Mana.*, 18: 263-269.
- Mba, C., 1997.** Rock phosphate solubilizing Strptosporangium isolates from cast of tropical earthworms. *Soil Biol. Biochem.*, 29(3-4): 381-385.
- Mijail, A., J. C. Villaseca y N. Zione, 1996.** Sinecología básica de moluscos terrestres en cuatro formaciones vegetales de Cuba. *Rev. Biol. Trop.*, 44 (1) : 133-146.
- Naranjo-García, E., 1994.** Estudio sobre moluscos terrestres en México. Pp 61-72. En: Naranjo, E., M.T. Olivera y O.J. Polaco (Eds). Seminario: Situación actual de la malacología médica y aplicada en América Latina. México. Capítulo Mexicano de la Sociedad Internacional de Malacología Médica y Aplicada. México D.F.
- Naranjo-García, E y O. J. Palacio, 1997.** Moluscos continentales. Pp. 425-431. En: E. González, R. Dirzo R. Vogt. (eds). Historia natural de los Tuxtlas. UNAM-CONABIO, México, D. F.
- Opperman, M., M. Wood, P. Harris y C. Cherrett, 1993.** Nematode and nitrate dynamics in soils treated with cattle slurry. *Soil Biology and Biochemistry* 25(1): 19-24.
- Parkin, T. y E. Berry, 1994.** Nitrogen transformations associated with earthworm casts. *Soil Biology and Biochemistry* 26(9): 1233-1238.
- Spiegel, M R., 1997.** Estadística. Mc Graw Hill. Madrid, España.
- Stork, N. E. y P. Eggleton, 1992.** Invertebrates as determinants and indicator of soil quality. *Am. J. Altern. Agric.*, 7 (1/2) : 38-47.
- Sing, J. S. y S.R. Gupta, 1977.** Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The botanical review*, 43 (4):449-528.



Swift, M., O. Heal y J. Anderson, 1979. Decomposition in terrestrial ecosystems. Studies in ecology volume 5. University of California press. California, Estados Unidos de América.

Tate, R., 1992. Humification and Organic Matter Stability. En Soil Organic. Matter. Biological and Ecological Effects. Krieger Ed. Florida, EEUU.

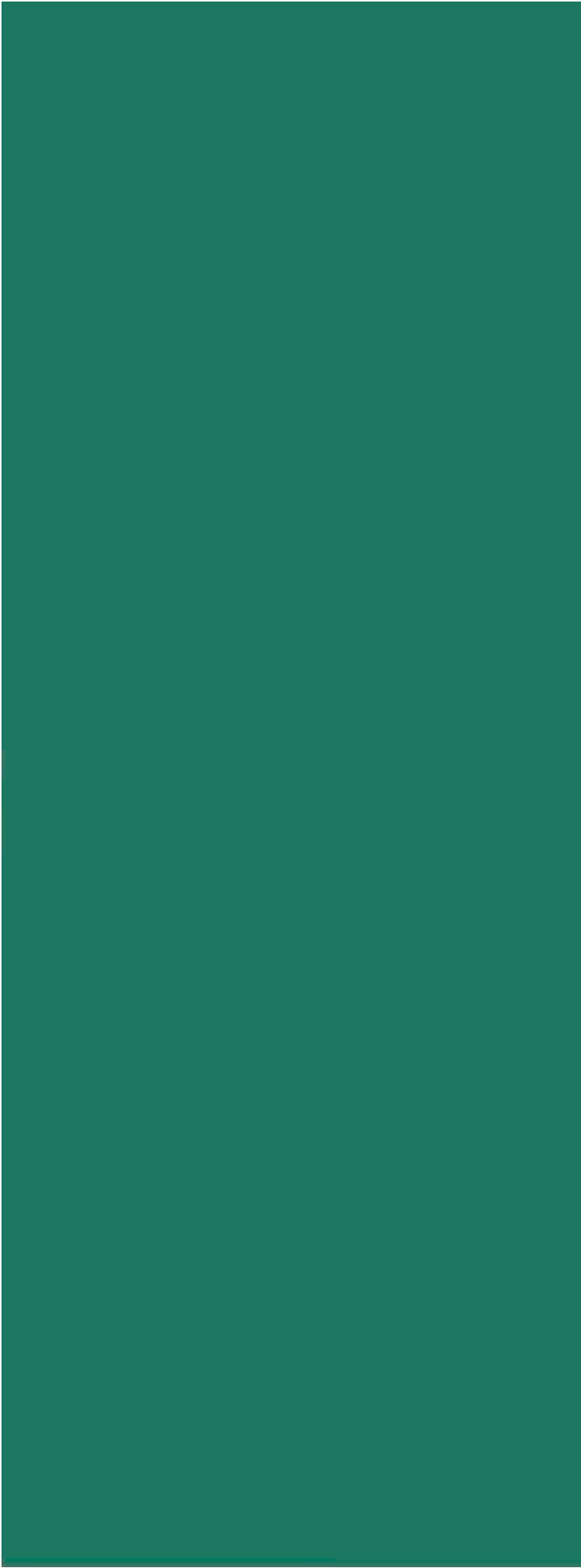
Tian, G., L. Brussaard y B. Kang, 1993. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions: effects on soil fauna. Soil Biol. Biochem., 25(6): 731-737.

Van Soest, P.J., 1963. Use of detergents in analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. J Ass. Ofic.. Anal. Chem., 46:829-835.

Vitousek, P., D. Turner, W. Parton y R. Sanford, 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: patterns, mechanisms and models. *Ecology* 75(2): 418-429.

**Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán:
Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales.**

Se realizó en Corel Ventura 10 y Corel Draw 11 en el Departamento de Difusión y Publicaciones del Centro **EPOMEX** de la Universidad Autónoma de Campeche. La composición, diseño y proceso editorial computarizado estuvo a cargo de Carlos A. Medina Hernández y Jorge A. Gutiérrez Lara.



Esta obra colectiva destaca la importancia de la información edafológica para la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales de la Península de Yucatán.

Los especialistas aquí reunidos analizan el papel de este recurso natural no renovable como base para la obtención de productos (alimentos, fibras, madera, recreación, etc.) y dan cuenta de sus ámbitos de influencia. A nivel global, las preocupaciones relativas al suelo se vinculan con la conservación de la riqueza biológica y con el cambio climático. En el marco de las regiones, el conocimiento de los suelos resulta de gran ayuda para elaborar planes de manejo de los recursos naturales y para planificar medidas de contingencia ambiental. Por último, a nivel local, la información aquí presentada puede resultar de ayuda para los procesos agrícola, pecuario y forestal.

Estudiar y conceptualizar el suelo como un ecosistema y no como un hábitat de plantas y animales, o como un simple sustrato, permitirá un mejor entendimiento de su funcionamiento, ayudará a contar con una mejor productividad y a llevar a cabo de manera más adecuada la conservación de nuestro entorno natural.



EPOMEX

