

## ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE SUELOS DEL ESTADO DE YUCATÁN MÉXICO: ENFOQUE GEOMORFOPELÓGICO Y WRB

### An update soil map of The Yucatan State, Mexico: Geomorphopedological approach and WRB

<sup>1\*</sup>Francisco Bautista, <sup>2</sup>Oscar Frausto, <sup>1</sup>Thomas Ihl, <sup>1</sup>Yameli Aguilar

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701 Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, CP. 58190, Morelia, Michoacán, México.

\*leptosol@ciga.unam.mx

<sup>2</sup>Unidad Cozumel, Universidad Quintana Roo

**Artículo científico** recibido: 29 de mayo de 2014, **aceptado:** 17 de abril de 2015

**RESUMEN.** El objetivo del trabajo fue identificar las relaciones entre los ambientes geomorfológicos, geoformas y suelos del estado de Yucatán. Se elaboró un modelo digital de elevación, utilizando 58 mapas topográficos digitales a escala 1:50 000, un mapa altimétrico con curvas de nivel de 10 m, y 401 perfiles de suelo. Se identificaron los elementos del relieve al interior de las geoformas con imágenes de satélite (SPOT y LANDSAT). El mapa geomorfopedológico del estado de Yucatán se generó con base en la cartográfica geomorfológica a escala 1:50 000. Se identificaron cinco ambientes geomorfológicos: marino litoral, palustre, pseudopalustre, kárstico y tecto-kárstico. En cada uno de ellos se identificaron las geoformas (planicies y lomeríos) y suelos. El enfoque geomorfopedológico permitió la identificación y descripción de los paisajes geomorfológicos costeros y las planicies pseudopalustres. En el karst, a mayor altitud y con un clima más húmedo, la disolución de la caliza ocasiona depresiones con suelos de mayor profundidad que los Leptosoles. Esta situación se intensifica en zonas con diferente tiempo de emersión de las plataformas. En las planicies kársticas de 10 a 100 msnm los suelos muestran mayor desarrollo en las zonas de mayor altitud con climas más húmedos. Los factores formadores más importantes, en este caso, fueron: la altitud media al nivel del mar, el clima y el tiempo de emersión.

**Palabras clave:** Relieve, karst, leptosol, cambisol, luvisol, vertisol, modelo digital de elevación

**ABSTRACT.** The objective of this study was to identify the relationship between the geomorphic environments, landforms and the soils in the Yucatan State. A Digital Terrain Model (DTM) was elaborated by using 58 digital topographic maps at scale 1:50000. Then, an altimetric map with 10 meter level contours was made. The components of the relief in the landforms were identified by using satellite imagery (SPOT and LANDSAT). Information from 401 soil profiles was consulted. The geomorphic and pedological map of Yucatan was generated by mapping the geomorphology at scale 1:100000 as the cartographic base, using the soils as a legend. Then, five geomorphic environments were identified: 1) Litoral; 2) Palustral; 3) Pseudo-palustral; 4) Karstic; and 5) Tectonic-karstic. In each of the environments, there were identified the landforms (plains and low hills) and the soils. The geomorphic and pedological approach allowed the identification and description of the coastal geomorphic landscapes and the pseudo-palustral plains, which had not been described before. In the karst environment, at a higher altitude and more humidity, the limestone dissolution caused depressions in soils deeper than the Leptosols. This intensified in the zones in which the platforms emerged at different geologic periods. In the karstic plains from 10 to 100 masl, it was observed a greater soil development due to a higher altitude and more humidity. The most important formation factors in the karstic plains were: Mean sea level, climate and geologic period of emergence.

**Key words:** Relief, karst, leptosol, cambisol, luvisol, vertisol, digital elevation model

## INTRODUCCIÓN

A la luz de las nuevas tecnologías, como sensores remotos, software para el manejo de bases de datos, tecnología de geoposicionador satelital (GPS), desarrollo y aplicaciones de sistemas de información geográfica, modelos matemáticos, entre otros (Abd-Alla 2011, Finke 2012), países como Estados Unidos (Brannon y Hajek 2000), Francia (Carré *et al.* 2008), Alemania (Kempen *et al.* 2009), Rusia (Korolyuk y Ovechkin 2010), China (Sun *et al.* 2011) y Brasil (Oliveira *et al.* 2010) han decidido actualizar sus mapas de suelos, además de acciones multinacionales para actualizar los mapas de regiones y del mundo (Kozlov y Konyushkova 2009, Sánchez *et al.* 2009). En el mismo sentido, el mejoramiento de los sistemas de clasificación de suelos, como la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 1999) y la World Reference Base of Soil Resources (IUSS Working Group 2006), han apoyado la actualización de mapas de suelos, como los de China (Shi *et al.* 2010) y Europa (Tonkonogov 2008).

En particular, el relieve del estado de Yucatán, presenta dos unidades geomorfológicas diferenciadas; la primera se ubica al norte, con predominio de planicies y la segunda al sur con un sistema de planicies alternadas con lomeríos (Lugo y García 1999). Al respecto, Bautista *et al.* (2003a) identificaron dos subregiones geomorfológicas, la del norte, constituida por planicies estructurales denudativas y de disolución; y la del sur, con lomeríos en cúpula y planicies residuales. En las escalas de representación de 1:1200000 y 1:500000, se observa una simplificación del relieve, que es posible mejorar con las nuevas tecnologías geoespaciales (Kozlov y Konyushkova 2009, Sánchez *et al.* 2009). El mapa de suelos del estado de Yucatán (INEGI 1984abcde) está rezagado en términos del esquema de clasificación, por lo que se requiere actualizarlo a nivel geométrico (superficies) y taxonómico. Para ello, es necesario generar información edáfica, además de recuperar y actualizar los datos de suelos que se tienen (INEGI 1984a,b,c,d,e, Duch 1991, 1995).

El enfoque geomorfopedológico en la elaboración de mapas de suelos (Zinck 1988, 2012), con-

siste en la utilización del análisis de relieve con criterios altimétricos, inclinación y arreglo geométrico; así como información de perfiles del suelo con el sistema de clasificación WRB (IUSS Working Group 2006). Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue analizar la distribución espacial de los suelos del estado de Yucatán a escala 1:50 000, mediante la elaboración de un mapa geomorfopedológico para documentar la diversidad edáfica e identificar los factores formadores de suelos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

El estudio se realizó en el estado de Yucatán, México (Figura 1). Las principales geoformas son dos grandes planicies estructurales, la línea de costa, una zona de petenes, el semicírculo de cenotes y la sierra de Ticul (Lugo y García 1999, Bautista *et al.* 2003a). Los subtipos climáticos del estado son Aw<sub>0</sub>, Aw<sub>1</sub>, Aw<sub>2</sub>, BS<sub>0</sub> y BS<sub>1</sub> (Orellana *et al.* 1999). La vegetación corresponde a matorral de duna costera, manglar, selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia (Flores y Espejel 1994). Se observan dos tipos de calizas, uno al sureste del Plioceno-Mioceno de color crema y pardo, microcristalinas con una gran cantidad de fósiles, y en el resto de calizas del Eoceno de grano fino, silicatadas y con escasa presencia de fósiles (INEGI 1983).

### Geomorfología

Para diferenciar los paisajes geomorfológicos se utilizó el promedio y orientación de la pendiente, amplitud del relieve e intervalos hipsométricos calculados con modelos digitales de terreno (MDT) (Zinck 1988, Priego *et al.* 2010). El modelo digital de elevación se realizó con 58 mapas topográficos digitales escala 1:50 000 y curvas de nivel de 10 m, para separar las planicies costeras de las planicies kársticas hasta 40 m, y para los lomeríos y colinas intercaladas por planicies intermontanas hasta 200 m. Para la elaboración del mapa de pendientes del terreno se utilizaron dos criterios de acuerdo con los procesos geomorfológicos, uno para las planicies debido a su amplia extensión y otra para el re-

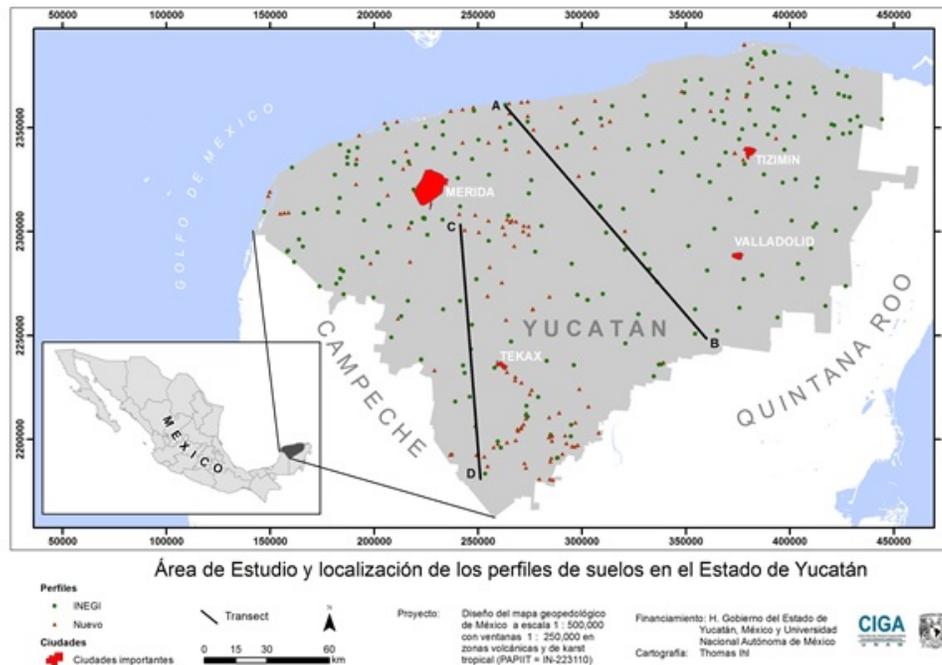


Figura 1. Localización del estado de Yucatán.

Figura 1. Location of the state of Yucatan.

lieve de colinas y lomeríos. Para la elaboración del mapa geomorfológico, se identificaron los elementos del relieve al interior de las unidades geomorfológicas utilizando imágenes SPOT pancromáticas e imágenes LANDSAT multispectrales del 2010.

Una vez identificados los paisajes geomorfológicos se realizó un análisis de los factores formadores del relieve y suelos, considerando las fracturas, el clima, y la cubierta vegetal, con la finalidad de agrupar los polígonos con base en los ambientes geomorfológicos (Zinck 1988, 2012, Bautista et al. 2011). Además de la revisión de los paisajes geomorfológicos en el campo para comprobar y redefinir los límites de las unidades.

### Elaboración de la base de datos de suelos y análisis de suelos

Se compiló la información de 142 perfiles de suelo del estado de Yucatán en las serie I (INEGI 1984a,b,c,d,e,f, Bautista et al. 2005b), para re-clasificarlos con el sistema WRB (Bautista et al.

2005b, ISSS 2006). La información de los perfiles de suelos se trabajó con la el software Base de datos multilingüal (SBDM). La SBDM permitió almacenar la información en niveles de características del sitio, morfología del perfil y propiedades químicas y físicas de los horizontes. Se realizaron 239 nuevas calcatas en las planicies kársticas, lomeríos y colinas, a lo largo del gradiente topográfico. Los sitios de muestreo se ubicaron con GPS. Se describieron los perfiles en el campo y se tomaron muestras de suelo por horizontes (FAO-ISRIC 1990, Siebe et al. 1996), a las que se les realizaron los análisis de color, textura, pH, carbonato de calcio equivalente, carbono orgánico, CIC y bases intercambiables extraíbles (FAO-ISRIC 1990).

El mapa geomorfopedológico del estado se generó con el programa Arcinfo 7.2.1, tomando como base cartográfica la geomorfología a escala 1:50 000, con leyenda de los edafopaisajes extraídos de la SBDM, el mapa se editó con el programa Arc GIS. Debido a que la superficie de los sue-

los de las planicies kársticas es en promedio de 25 m<sup>2</sup> (Bautista *et al.* 2003ab, Bautista *et al.* 2004, Bautista *et al.* 2005ab) no se siguieron los lineamientos de la WRB para la elaboración de las leyendas (IUSS Working Group 2010), ya que sería muy grande la diversidad de calificadores primarios y secundarios.

### Modelos de distribución espacial de suelos

Se realizaron dos transectos altitudinales con el modelo digital de elevación de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que permitió obtener información sobre relieve, altura, inclinación y aspecto de las laderas del área de estudio. Para luego trazar un transecto a lo largo de un gradiente altitudinal de menos 10 y hasta los 30 m en las planicies kársticas, el cual es un gradiente climático BS0 a Aw1. Un segundo transecto se trazó entre las planicies kársticas del Plioceno-Mioceno y los lomeríos alineados del Eoceno, de menos de 10 msnm hasta 200 m.

## RESULTADOS

Se identificaron los ambientes geomorfológicos: marino litoral, palustre, pseudopalustre, kárstico y tecto-kárstico (Figura 2), los cuales tuvieron superficie de 740.44, 645.26, 204.08, 35 462.86 y 1 939.31 km<sup>2</sup>, respectivamente. La importancia de estos ambientes radica en que en cada uno de ellos, los factores formadores de suelos son diferentes, lo cual a su vez genera procesos edáficos que repercuten en la morfología del perfil del suelo. El mapa de los ambientes geomorfológicos del estado permite una mayor explicación de la distribución espacial de los edafopaisajes, y la correspondencia entre ambientes geomorfológicos, edafopaisajes y la cubierta vegetal (Tabla 1).

### Ambiente marino litoral

Se localiza en el borde externo continental, en una transición entre el continente y el océano, que se forma de los sedimentos continentales y marinos. Este ambiente geomorfológico está constituido por planicies que forman una franja que se extiende a lo

largo del litoral, elevación menor a 10 msnm y superficie inclinada al océano, que se forma durante el levantamiento del fondo marino o del descenso del nivel del mar.

Los paisajes geomorfológicos se identificaron por los elementos del terreno que presentan, así como por sus posiciones y formas, las particularidades son: planicie horizontal de playas, barras y cordones litorales; planicie subhorizontal compuesta de marismas, pantanos y barras; planicie mixta no diferenciada, y planicie ondulada con cenotes, marismas, pantanos y petenes, además de los esteros de Río Lagartos, Dzilam, Celestún y Progreso.

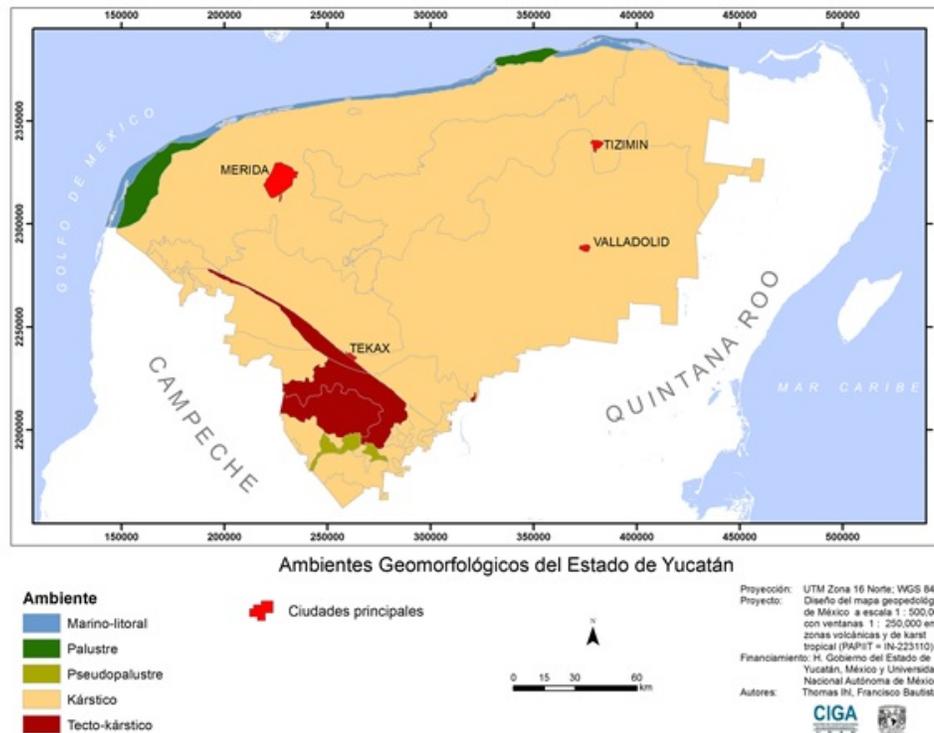
En las barras y cordones litorales se presenta una secuencia de suelos de Solonchac (SC)-Arenosol (AR)-SC (Figura 3, 4). EL SC se localiza en las partes más bajas del microrelieve y los AR en las partes altas, además de Regosol (RG) en lugar del AR. También se encuentra Histosol (HS) en pequeñas áreas. En las barras y cordones litorales se encuentran las lagunas costeras y en la zona de inundación, dentro de la planicie kárstica, se presentan los suelos HS, SC y Leptosol (LP) (Tabla 2).

### Ambiente palustre

El ambiente geomorfológico palustre está formado por planicies bajas acumulativas, con inundación periódica, presentando procesos de hidromorfismo en los suelos, con características y ecotonos de ambientes de la región carbonatada y terrígena. En estas planicies (AB) se forman los petenes, que son islas de vegetación de selva mediana en las partes altas del microrelieve (4 m) rodeadas de vegetación hidrófila y halófila, formando microcatenas de Gleysol (GL)/LP, SC/LP y HS/LP (Tabla 2).

### Ambiente pseudopalustre

El ambiente geomorfológico pseudopalustre se localiza al sur del estado y está compuesto por planicies que se inundan de forma temporal en la época de lluvias, formando un conjunto de planicies con niveles altitudinales secuenciales formados durante el Eoceno. En la zona sur del estado de Yucatán oscilan de 30 a 110 m, se diferencian en siete planicies con pendientes suaves de hasta de



**Figura 2.** Ambientes geomorfológicos de Yucatán.

**Figura 2.** Geomorphological environments of Yucatan.

tres grados de inclinación a manera de escalones claramente diferenciados, algunas de estas planicies presentan elevaciones aisladas en su interior, que llegan a superar los 50 m de altura, con superficies escalonadas que resaltan niveles de base local. Estas planicies tienen una cubierta vegetal de selva baja subperenifolia de inundación temporal. Los suelos presentan edafopaisajes de Vertisol (VR)/LP, con Vertisoles y Stagnosoles (ST) en las parte bajas del relieve y LP en las partes altas (Tabla 2).

### Ambiente kárstico

Las planicies kársticas constituyen una gran zona de transición entre los lomeríos con la zona costera. Se identificaron cuatro clases que fueron los pisos altitudinales entre 10 y 40 msnm, la inclinación del terreno y el relieve, que puede ser horizontal, ligeramente ondulado, semiondulado y ondulado. Las formas kársticas en la superficie varían en inten-

sidad y en grosor, por un lado, las planicies horizontales y subhorizontales de 20 a 30 m y las semionduladas a onduladas mayores de 30 msnm. Una característica importante es que las colinas al interior de cada nivel altitudinal no superan los 10 m, lo que indica un proceso de denudación gradual. Las planicies con altitudes de 40 a 60 msnm tienen colinas de 10 a 20 m de altitud. La planicie kárstica de 10 msnm (ID= B) se formó a partir de calizas del Plioceno-Mioceno y presenta montículos menores a 2.5 m de altura; esta gran planicie puede dividirse en horizontal, semiondulada y ondulada (Tabla 3). El LP es el grupo de suelos dominante; al norte predominan los Leptosoles líticos y al sur los Leptosoles réndzicos. Otros calificadores primarios del grupo LP son húmicos y esqueléticos.

La planicie kárstica de hasta 20 msnm (ID= C) se formó a partir de un complejo de calizas micriticas y margas, formadas durante el Plioceno-

**Tabla 1.** Factores formadores de suelos en el estado de Yucatán.

**Table 1.** Soil forming factors in the state of Yucatan.

Ambiente/ Geoforma	Geología/ material parental	Cima	Comunicades Vegetales	Grupo de Suelo
Marino-Litoral	Cuaternario	BS <sub>1</sub> , BS <sub>0</sub>	Matorral, herbazal, Halófitas	AR, RG, SC, GL
Planicies subhorizontal costeras	Sedimentos Calcáreos	Aw <sub>0</sub> Ax'w <sub>0</sub> Ax'w <sub>1</sub>		
Palustre Planicies onduladas	Cuaternario Calizas Sedimentos palustres	BS <sub>0</sub> , BS <sub>1</sub> Aw <sub>0</sub>	Manglar, Tular y Popal	GL, HS, SC, LP
Kárstica Planicies subhorizontales, Onduladas y colinosas Lomeríos aislados	Plioceno-Mioceno y Eoceno Calizas	Aw <sub>0</sub> Axw <sub>1</sub> Axw <sub>0</sub>	SBE SBC SMSP	LP LV, VR,
Tecto-kárstica Lomeríos alineados	Eoceno Calizas	Aw <sub>0</sub> Axw <sub>0</sub> Axw <sub>1</sub>	SBC LP, CM, SMSC	LV
Pseudo palustre Planicies onduladas	Eoceno Calizas	Aw <sub>0</sub>	SMSC Tular,	VR, LP ST, LP

SBE= selva baja espinosa, SBC= Selva baja caducifolia, SMSC= Selva mediana subcaducifolia, AR= Arenosol, RG= Regosol, SC= Solonchack, GL= Gleysol, HS= Histosol, LP= Leptosol, CM= Cambisol, LV= Luvisol, VR= Vertisol, ST= Stagnosol.

**Tabla 2.** Geoformas en los ambientes litoral-marino y palustre con sus respectivos suelos.

**Table 2.** Landforms in the coastal-marine and marsh environments with their corresponding soils.

ID	Unidades	Altitud (msnm)	Pendiente (grados)	Suelo
Marino-litoral				
A	Planicie	Menos de 10	0-0.5	AR/SC
Palustre				
AB1	Planicie	Menos de 10	0-0.5	GL/HS/SC
AB2	Planicie	Menos de 10	0-0.5	GL/HS/SC
Pseudopalustre				
F2	Planicie	30-40	1-3	VR/LP
F3	Planicie	40-50	1-3	VR/LP
F4	Planicie	50-60	1-3	CM/ST/LP
F5	Planicie	60-70	1-3	ST/LP
F6	Planicie	70-80	1-3	VR/LP
F7	Planicie	80-100	1-3	VR/LP
F8	Planicie	100-120	1-3	

GL= Gleysol, HS= Histosol, SC= Solonchac; LP= Leptosol; VR= Vertisol, CM= Cambisol, ST= Stagnosol.

Mioceno y el Eoceno. Estas planicies de transición presentan edafopaisajes de LP/Cambisol (CM) (Figura 4). Los regímenes údicos y ústicos han ocasionado una mayor disolución de la caliza motivo por el cual ya aparece el CM.

La planicie de 30 msnm (ID= D) se formó a partir de un complejo de calizas y margas durante el Plioceno-Mioceno y el Eoceno, presenta un mayor índice de humedad, que está asociado con la

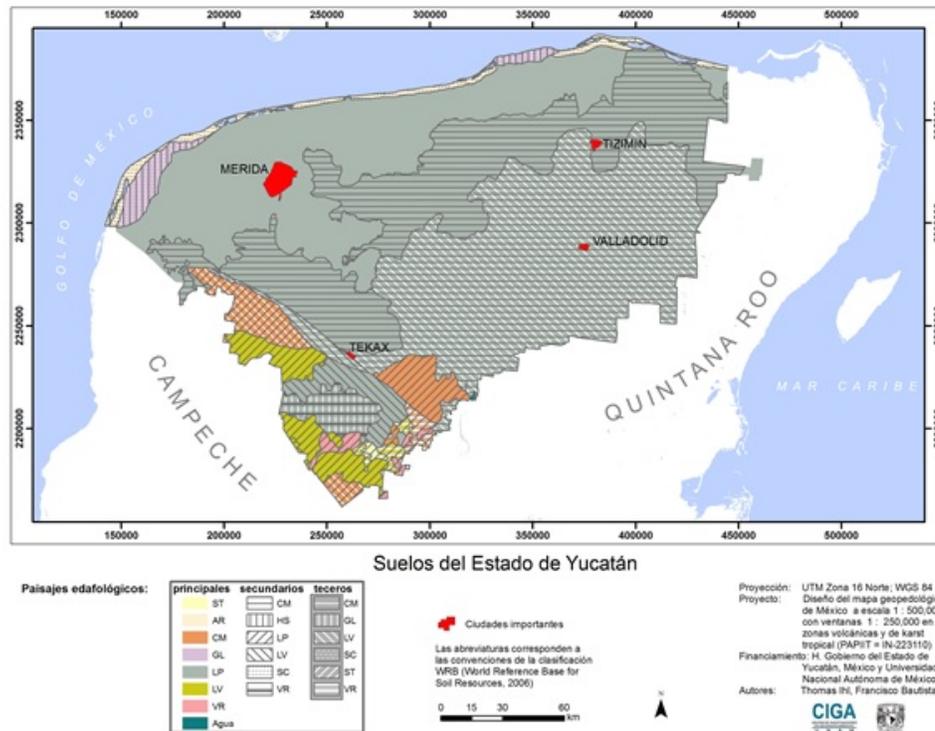


Figura 3. Mapa de suelos de Yucatán.

Figura 3. Soil map of Yucatan.

vegetación de selva mediana que se encuentra en la zona; predomina el régimen ústico. En esta planicie de mayor desarrollo kárstico los suelos presentan mayor desarrollo, el grupo CM comienza a presentar una mayor superficie en asociación con los LP, el grupo Luvisol (LV) ocupa el tercer lugar en superficie y el LV se encuentra en las partes bajas del relieve.

La planicie de hasta 40 msnm (ID= E) se formó a partir de un complejo de calizas micríticas y margas durante el Eoceno; se divide en ondulada, con elevaciones menores a 40 m de altura, y ondulada con elevaciones y depresiones con más de 20 m de desnivel. En éstas, los suelos dominantes son LV, CM y LP, con régimen de humedad údico. Las planicies kársticas con pequeñas colinas (ID= J) se localizan en altitudes que varían de 50 a 100 msnm, tienen elevaciones pequeñas, niveladas con laderas suaves, alargadas con una base difícil de delimitar.

Los suelos dominantes son los CM, seguidos de LP y los LV o VR.

Las elevaciones aisladas o lomeríos kársticos (ID= H) son formas positivas del relieve (menor de 10 metros de altura), en la que se reconocen cimas, laderas y pie; se encuentran formadas por LP. Los lomeríos kársticos (ID= K) se originan por la disolución diferencial de la caliza, formando un conjunto de lomas con diferencias de altitud de 30 a 90 m con respecto al nivel base; presentan los tipos de lomeríos: la superficie se encuentra antes de los 90 m, pero las cúpulas kársticas son muy notables, llegan a altitudes de hasta 110 m (K1); la máxima altitud es de 90 m pero regularmente la altitud se encuentra a menos de 50 m (K2); la altitud está entre 90 y 150 m, con formas del relieve irregulares y variadas, y zonas ligeramente planas (K3); y la altitud oscila entre 70 y 110 m, con cúpulas kársticas (K4). En los lomeríos kársticos de mayor altitud

**Tabla 3.** Transectos altitudinales que muestran la relación relieve-suelos. Transecto A-B con planicie costera RG/SC; planicies kársticas de escaso desarrollo del relieve y suelos con secuencia de desarrollo LP, CM, LV. Transecto C-B con planicie kárstica (PK), lomerío alineado o tecto-karst (L-TK) y Lomeríos kársticos (LK).

**Table 3.** Altitudinal transects showing the relief-soils ratio. Transect A-B with coastal plain RG/SC; karstic plains with scarce relief development and soils with development sequence LP, CM, LV. Transect C-B with karstic plain (PK), aligned hills or tecto-karst (L-TK) and karstic hills (LK).

ID	Geoforma	Altitud (msnm)	Pendiente	Suelo
B.1abcd	Planicie	10	0-0.5	LP
B.2ab	Planicie	10	0.5-1	LP
B.3ab	Planicie	10	0.5-1	LP
C1abcde	Planicie	10-20	0.5-1	LP/CM
C2ab	Planicie	10-20	0.5-1	LP/CM
C3abcd	Planicie	10-20	0.5-1	LP/CM
D1	Planicie	20-30	0.5-1	LP/CM/LV
D2	Planicie	20-30	0.5-1	LP/CM/LV
D3abcd	Planicie	20-30	1-3	LP/CM/LV
D4abc	Planicie	20-30	1-3	LP/CM/LV
D5ab	Planicie	20-30	1-3	LP/CM/LV
D6ab	Planicie	20-30	1-3	LP/CM/LV
E1	Planicie	30-40	1-3	CM/LP
E2	Planicie	30-40	1-3	CM/LP
F1	Planicie		1-3	LP/LV
J1	Planicie	50	1-3	CM/LP/VR
J2a	Planicie	50-70	1-3	CM/LP/LV
J2b	Planicie	50-70	1-3	CM/LP/VR
J3	Planicie	70-100	1-3	CM/LP/LV
H1	Lomerío	10-20		LP
H2	Lomerío	10-20		LP
H3	Lomerío	70		LP
K1	Lomerío	90-110	6-12	LV/LP
K2	Lomerío	50-90	6-12	LV/LP/VR
K3	Lomerío	90-150	6-12	LV/ST/LP/
K4	Lomerío	70-110	6-12	VR/LP
L1	Lomerío	Menor de 100	3-6	LP/LV/CM
L2	Lomerío	100-150	6-12	LP/LV
L3	Lomerío	Mayor de 150	12-18	LP/VR/ST
G	Depresión	Menos de 20	1	

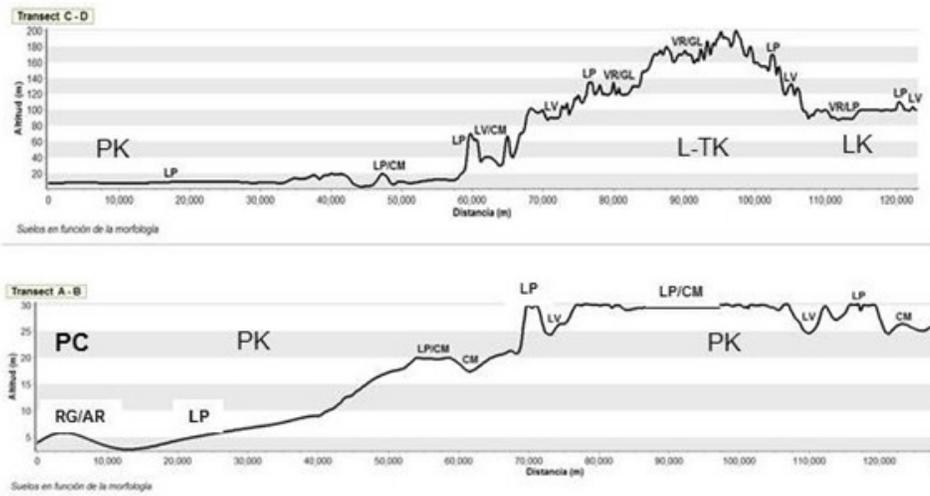
LP= Leptosol; LV= Luvisol; VR= Vertisol ST= Stagnosol; CM= Cambisol.

(ID= K) predominan los suelos del nivel base, como LV o VR seguidos de LP de las partes altas. En el nivel de base, la conductividad hidráulica es baja y en época de lluvias pueden llegar a inundarse.

### Ambiente tecto-kárstico

Este ambiente geomofológico está constituido por tres lomeríos altos alineados y una depresión que da lugar a la formación de la laguna

de Chichankanab; estos lomeríos se originaron de las fallas de Ticul y Sayil, con escarpe tectónico inactivo. Las rocas se formaron durante el Eoceno (Tabla 3). Las diferencias entre los lomeríos se encuentran en su pendiente y altitud, a menor altitud menor pendiente. Los LP son dominantes en las lomas, en el nivel de base se pueden encontrar LV o VR y en la cercanías a las lomas los CM (Figura 4).



**Figura 4.** Transectos altitudinales que muestran la relación relieve-suelos. Transecto A-B con planicie costera RG/SC; planicies kársticas de escaso desarrollo del relieve y suelos con secuencia de desarrollo LP, CM, LV. Transecto C-B con planicie kárstica (PK), lomerío alineado o tecto-karst (L-TK) y Lomeríos kársticos (LK).

**Figura 4.** Altitudinal transects showing the relief-soils ratio. Transect A-B with coastal plain RG/SC; karstic plains with scarce relief development and soils with development sequence LP, CM, LV. Transect C-B with karstic plain (PK), aligned hills or tecto-karst (L-TK) and karstic hills (LK).

## DISCUSIÓN

El ambiente de karst es el de mayor extensión en el estado. Las calizas-coquina de la parte norte y este del estado son del Plioceno-Mioceno y al centro y sur se presentan calizas y margas del Eoceno (SGM 2006b). El relieve en su conjunto se considera del tipo karst de mesa, por el predominio de estructuras tabulares monoclinales, organizado en planicies estructurales a diferentes niveles de altitud de 20 a más de 200 msnm (Lugo *et al.* 1992). La identificación de unidades geomorfológicas con base en la altura media al nivel del mar con intervalos de 10 m es adecuada para ambientes de karst (Lugo y García 1999, Ihl *et al.* 2007), debido a que esta situación influye en el relieve y en los suelos (Figura 4). Se reconocen los pisos altimétricos de las planicies de 0 a 40 msnm, de inundación temporal, los lomeríos con influencia estructural y los arreglos estructurales de pliegue-bloque (Lugo *et al.* 1992); sin embargo, para estudios de mayor escala es necesario un análisis de los elementos del relieve kárstico, densidad y tamaño de dolinas, úvalas, pol-

jes, montículos, colinas y lomas (Applegate 2003 y Denizman 2003).

Por la escala no es posible mostrar la forma y extensión del mosaico de suelos asociados, situación diferente en cada unidad geomorfológica, la asociación LP/CM que se encuentra en la mayoría de las planicies kársticas indica que no es necesario dividir las regiones geomorfológicas en unidades, pero en el detalle del relieve se encuentran diferencias claras entre unidades. Al respecto, Bautista *et al.* (2003b, 2004) indicaron que en las regiones B y C reportan microcatenas LPlirz-LPli, LPhskca-CMlenro, CLlepsk-CMlen y LPhsk-LVro; en tanto que Bautista *et al.* (2005a) reportan las unidades de suelo LPli, LPhsk, LPrz, LPeu y CMle, en una superficie de 1 350 m<sup>2</sup> en la planicie kárstica de 10 msnm (B1a). La utilización del nuevo esquema de clasificación denominado WRB (IUSS, 2006) en comparación con el de INEGI (1984) permite identificar una mayor edafodiversidad, ya que el término Rendzina incluye a los LPhsk, LPrz, LPmo, LPeu, CM y Calcisoles con diversos calificadores primarios y secun-

**Tabla 4.** Geoformas en los ambientes litoral-marino y palustre con sus respectivos suelos.

**Table 4.** Landforms in the coastal-marine and marsh environments with their corresponding soils.

Clase	Pedogénesis	Expresión morfológica	Evidencia clave	Horizontes	Alteación mineral	Karst yucateco
0	Nula	Sin suelo	Roca	D, R	No	
1	Casi nula	Protosuelo	Roca	C,D,R	Detectable	LPnl, LPhsk
2	Muy baja	Muy débil	Poco suelo	ACR	Ligero	LPLi, LPhsk , LPsk
3	Baja	Débil	Ligero B	ABwCR	Débil	LPrz, LPhu
4	Baja-media	Moderado	Ligero Bt	ABwCD	Débil	LP, CM
5	Media	Fuerte	Normal E y Bt	ABtCR	Débil	LVha
6	Madura	Muy fuerte	E y Bt gruesos	AEBtCtR	Moderada	LVap
7	Muy madura	Muy fuerte	Máximo Bt	AEBtBtCtR	Moderada	
8	Alta	Fuerte	Presencia de Bto	AEBtBtoCtR	Fuerte	
9	Muy alta	Moderado	Transicional	EABtoCtR	muy fuerte	
10	Extrema	Ligero	Presencia de Bo	EABoBoCtR	Completa	

darios; sin embargo, la escala de trabajo y el área que ocupan no permite su incorporación al mapa, por lo que se utilizó sólo el grupo LP, aunque la zona de estudio se considera como karst con diferentes niveles de desarrollo (Bautista *et al.* 2003a, 2005b, 2011).

A mayor altitud y con un clima húmedo ( $Aw_0$  y  $Aw_1$ ), la disolución de la caliza ocasiona depresiones kársticas con suelos de mayor profundidad que los LP aún en rocas formadas durante el mismo periodo (Plioceno-Mioceno), como en el caso del transecto A-B. Esta situación se intensifica en zonas con diferente época de emersión de las plataformas (Bautista *et al.* 2011) y en rocas formadas en diferentes épocas. En las planicies kársticas de 10 a 100 msnm formadas durante el Plioceno-Mioceno, tanto por la mayor altitud y el clima húmedo, los suelos muestran mayor desarrollo y la cobertura vegetal pasa de selva baja espinosa a selva mediana subcaducifolia (Figura 4, Tabla 4).

La serie I del INEGI (1984abcdef) reporta suelos Phaeozem, Calcisoles y Lixisoles, lo cual puede ser un error, debido a que no se cuenta con evidencias suficientes para reportarlos (IUSS Working Group WRB (2006). En el caso de los Phaeozems que reporta el INEGI (1984abcdef), el porcentaje de fragmentos gruesos puede generar la idea de un horizonte mólico por el contenido de carbono orgánico; sin embargo, por el espesor del horizonte y por los altos porcentajes de fragmentos gruesos

que hay en el estado no se llega a formar tal horizonte (IUSS Working Group WRB 2010).

Los suelos Calcisol se localizan en la planicie kárstica de 10 msnm en pequeñas superficies. Cuando hay calcio no litificado, queda la duda si el carbonato de calcio es secundario (pedogenético) o primario (de la roca), lo que se puede comprobar con posteriores estudios de micromorfología. Sin embargo, el clima  $Aw_0$  es percolante (Orellana *et al.* 1999) y por lo tanto no está clara la formación de este calcio secundario en la zona de clima  $BS_0$  y  $BS_1$ , en donde hay selva baja espinosa y la precipitación no es percolante. Es posible que la presencia de los Calcisoles se deba a climas antiguos y se esté perdiendo este rasgo con el clima actual.

El Lixisol fue reportado por Bautista *et al.* (2005 b) en lugar del Nitisol del INEGI; parece ser un error ya que estos suelos se forman bajo un tiempo prolongado y/o un proceso de iluviación de arcillas intenso que no ocurre en el estado de Yucatán (ISSS 2006). Tampoco se presenta el tipo de estructura nuciforme de los Nitisoles. En este trabajo, los Lixisoles fueron reclasificados como Luvisoles de acuerdo con Bautista *et al.* (2011), en cuanto a los calificadores primarios en los que hay más cambios es en el grupo Luvisol, debido a que los calificadores ródico y crómico son secundarios, por lo que en este caso los calificadores primarios son técnico, léptico, vértico y háptico. El grupo Leptosol es variado en cuanto a calificadores

primarios y secundarios, ya que es el grupo dominante, con calificadores primarios nudilítico, lítico, hiperesquelético, rénzico, mólico, técnico, vértico y cámbico en las planicies kársticas, mientras que en las planicies palustres los calificadores principales de los Leptosoles son fólico, hístico, sálico y gléyico.

## CONCLUSIONES

El enfoque geomorfopedológico permitió la elaboración de un mapa de suelos que presenta congruencia entre los ambientes geomorfológicos, paisajes geomorfológicos y la diversidad de suelos. Los factores formadores más importantes en el caso de las planicies kársticas fueron: la altitud media al nivel del mar y el clima. La pedogénesis en el ambiente geomorfopedológico kárstico toma secuencia

LPnl, LPhsk; LPli, LPhsk, LPsk; LPrz, LPhu; LP, CM; LVha; y LVap de acuerdo con los edopaisajes y la diversidad edáfica, que corresponde a una pedogénesis casi nula, muy baja, baja, baja-media, media y madura, respectivamente.

## AGRADECIMIENTOS

Al fondo mixto CONACYT- Gobierno del Estado de Yucatán por el financiamiento a los proyectos YUC-2006-C05-66159; CONACYT 090315, 24214/49275; a la DGAPA-UNAM por el financiamiento del proyecto PAPIIT 223110-3. Al INEGI por la base de datos de suelos (Serie I). A Frank Farmer e Ismael Ignacio Chuc Piña por la traducción del resumen.

## LITERATURA CITADA

- Abd-Alla RA (2011) Creation of GIS digital land resources database of the Nile delta, Egypt, for optimal soil management. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 19: 641-650.
- Applegate P (2003) Detection of sinkholes development on shaly Ordovician limestones, Hamilton county, Ohio, using digital topographic data: dependence of topographic expression of sinkholes on scale, contour interval, and slope. *Journal of cave and karst studies* 65:126-129.
- Bautista-Zúñiga F, Batllori-Sampedro E, Ortiz-Pérez MA, Palacio-Aponte G, Castillo-González M (2003a) Geoformas, agua y suelo de la Península de Yucatán. En: Colunga-García Marín P., Larqué-Saavedra A. (ed.). *Naturaleza y Sociedad en el Área Maya*. Academia Mexicana de Ciencias-CICY, Mérida Yucatán. pp: 21-36.
- Bautista F, Jiménez-Osornio J, Navarro-Alberto J, Manu A, Lozano R (2003b) Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra Latinoamericana* 21: 1-11.
- Bautista F, Estrada H, Jiménez J, González J (2004) Relación entre relieve y suelos en zonas Cársticas. *Terra Latinoamericana* 22: 243-254.
- Bautista F, Díaz S, Castillo M, Zinck AJ (2005a) Soil heterogeneity in karst zone: Mayan Nomenclature, WRB, multivariate analysis and geostatistics. *Euroasian Soils Science* 38: S80-S87.
- Bautista F, Palma-López D, Huchin-Malta W (2005b) Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán. En: Bautista F, Palacio G (eds.) *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán. pp: 105-122.
- Bautista F, Palacio G, Quintana P, Zinck AJ (2011) Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatán, Mexico. *Geomorphology* 135: 308-321.
- Brannon GR, Hajek BF (2000) Update and recorelation of soil surveys using gis and statistical analysis. *Soil Science Society of America Journal* 64: 670-680.

- Carré F, Reuter HI, Daroussin J, Scheurer O (2008) From a large to a small scale soil map: top-down against bottom-up approaches. In: Hartemink AE, McBratney AB, Mendonça-Santos ML (Eds). Digital soil mapping with limited data. Springer Verlag. Netherlands. pp: 203-212.
- Denizman C (2003) Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwannee river basin, Florida. *Journal of cave and karst studies* 65: 29-35.
- Duch J (1991) Fisiografía del estado de Yucatán: Su relación con la agricultura. Centro Regional de la Península de Yucatán, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México. 223p.
- Duch GJ (1995) Los suelos, la agricultura y la vegetación en Yucatán. En: La milpa en Yucatán. Un sistema de producción agrícola tradicional. Tomo 1. Hernández XE, Baltasar EB, Levy TS (eds.). Colegio de Postgraduados. México. pp: 97-107.
- FAO-ISRIC (1990) Guidelines for Soil Description. 3rd revised edition. Food and Agricultural Organization, Rome, Italy. 95p.
- Finke PA (2012) On digital soil assessment with models and the Pedometrics agenda. *Geoderma* 171-172: 3-15.
- Flores JS, Espejel I (1994) Etnoflora yucatanense: Tipos de vegetación de la península de Yucatán. Fascículo 3. Ed. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México. 135p.
- Follmer LR (1998) A scale for judging degree of soil and paleosol development. *Quatern Interna* 51-52: 12-13.
- Ihl T, Frausto O, Rojas J, Giese S, Goldacker S, Bautista F, Bocco G (2007) Identification of geodisasters in the state of Yucatan, Mexico. *Neues Jahrbuchfür Geologie und Paläontologie* 246: 299-311.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (1983) Carta geológica 1:250000. México D.F. Secretaría de Programación y Presupuesto.
- INEGI (1984a) Mapa edafológico 1:250000 Cancún F16-8. INEGI. México.
- INEGI (1984b) Mapa edafológico 1:250000 Cozumel F16-1. INEGI. México.
- INEGI (1984c) Mapa edafológico 1:250000 Felipe Carrillo Puerto FCP E16-1. INEGI. México.
- INEGI (1984d) Mapa edafológico 1:250000 Mérida F16-10. INEGI. México.
- INEGI (1984e) Mapa edafológico 1:250000 Tizimín F16-7. INEGI. México.
- INEGI (1984f) Mapa edafológico 1:250000 Calkini F15-9-12. INEGI. México.
- IUSS Working Group WRB (2006) World Reference Base for Soil Resources 2006. World Soil Resources Reports 103. FAO, Rome. 128p.
- IUSS Working Group WRB (2010) Guidelines for constructing small -scale map legends using the World Reference Base for Soil Resources. Addendum to the World Reference Base for Soil Resources. [http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf\\_documents/WRB\\_Legend.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/images/resources/pdf_documents/WRB_Legend.pdf). Fecha de consulta 5 de agosto de 2013.
- Kempen B, Brus D, Heuvelink G, Stoorvogel J (2009) Updating the 1:50,000 Dutch soil map using legacy soil data: A multinomial logistic regression approach. *Geoderma* 151: 313-326.
- Korolyuk TV, Ovechkin SV (2010) Approaches to modernization of the state soil map of Russia on the basis of the methods of digital soil mapping. *Eurasian Soil Science* 43: 488-498.

- Kozlov DN, Konyushkova MV (2009) State of the art and prospects of digital soil mapping: The results of the third global workshop (Logan, USA, 2008). *Eurasian Soil Science* 42: 699-702.
- Lugo JI, Aceves-Quesada JF, Espinasa-Pereña R (1992) Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán: UNAM-Instituto de Geología 10: 143-150.
- Lugo J, García M (1999) El relieve de la Península de Yucatán. En: García FA, Córdoba OJ, Chico PLP (Eds.) *Atlas de Procesos territoriales en Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán México. pp: 159-162.
- Oliveira F, Alvarez V, Baveye P (2010) Brazilian soil science: From its inception to the future and beyond. 34: 589-599.
- Orellana R, Balam M, Bañuelos I (1999) Balance Ombrotérmico. *Evaluación Climática*. En: García FA, Córdoba OJ, Chico PLP (eds.) *Atlas de procesos territoriales en Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán México. pp: 282-293.
- Priego A, Bocco G, Mendoza M, Garrido A (2010) Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes: Fundamentos y métodos. INE, SEMARNAT, UNAM. México, D.F. 104p.
- Sánchez PA, Ahamed S, Carré F, Hartemink AE, Hempel J, Huising J, *et al.* (2009) Digital Soil Map of the World. *Science* 325: 680-681.
- SGM 2005 Carta geológica minera Cankiní F15-9-12 Servicio Geológico Mexicano.
- SGM 2006a Carta geológica minera Cancún F15-9-12 Servicio Geológico Mexicano.
- SGM 2006b Carta geológica minera Mérida F16-10 Servicio Geológico Mexicano.
- Shi XZ, Yu DS, Xu SX, Warner ED, Wang HJ, Sun WX, *et al.* (2010) Cross-reference for relating Genetic Soil Classification of China with WRB at different scales. *Geoderma* 155: 344-350.
- Siebe C, Janh R, Stahr K (1996) Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. *Publicación especial 4*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Texcoco, Estado de México, México. 54p.
- Soil Survey Staff (1999) *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2nd edition. Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436p.
- Stafford K, Mylroie J, Taborasi D, Jensen J, Mylroie J (2005) Karst development on tinian, commonwealth of the northern marian islands: control on dissolution in relation to the carbonate island karst model. *Journal of Cave and Karst Studies* 67:14-27.
- Sun X, Zhao Y, Zhang G, Wu S, Man Y, Wong M (2011) Application of a Digital Soil Mapping Method in Producing Soil Orders on Mountain Areas of Hong Kong Based on Legacy Soil Data. *Pedosphere* 21: 339-350.
- Tonkonogov VD (2008) The first Russian version of the World Reference Base for Soil Resources (WRB). *Eurasian Soil Science* 41: 660-663.
- Zinck AJ (1988) *Physiography and soils*. ITC Lecture note SOL 4.1. International Institute for geoinformation science and earth observations. Enschede, The Netherlands. 156p.
- Zinck AJ (2012) *Geopedología: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. ITC Special Lecture Notes Series. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands. 123p.

