

Distribución de Suelos en ambientes tectokársticos en la porción este de la Península de Yucatán, México.

Fragoso-Servón Patricia¹, Francisco Bautista², Alberto Pereira¹, Oscar Frausto¹

¹Universidad de Quintana Roo

pfragoso@uqroo.edu.mx,

²Centro de Investigación en Geografía Ambiental.

Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán

Resumen

La Península de Yucatán se caracteriza por ser una zona kárstica y por la presencia de gran cantidad de fracturas y fallas. Para analizar la distribución de los suelos de la porción este de la península se utilizó el enfoque geomorfoedafológico por dos vías: por un lado, el análisis morfométrico y por otro, la evaluación de la información edafológica, considerando los datos del sitio de muestreo, la descripción de perfiles y los resultados analíticos.

Los ambientes donde se combinan altas densidades de procesos de disolución y fracturamiento se encuentran en tres áreas: a) en las planicies subhorizontales al norte de Quintana Roo, sobre unidades litológicas recientes, donde la vegetación dominante es de selva mediana subperennifolia, predominan los Leptosoles solos o combinados con Luvisoles e incluso Vertisoles en los que hay gran cantidad de depresiones kársticas; b) en planicies acolinadas del centro-oeste del Estado, en formaciones del Eoceno, donde los suelos dominantes son Phaeozems/Luvisol/Cambisol y Leptosol/Luvisol, que son utilizados para pastizales y cultivos; finalmente c) en las unidades litológicas más antiguas, sobre lomeríos y montañas al suroeste, los suelos dominantes son Leptosoles/ Phaeozems/ Vertisoles en los que se desarrolla una selva mediana subperennifolia.

Al norte de Quintana Roo, los suelos delgados y pedregosos, aunados a la densa karsticidad y las fallas, conforman una zona muy susceptible a colapsos y procesos erosivos, lo que restringe el uso potencial del suelo. Actualmente el turismo de cenotes, cavernas y el senderismo son intensos en esta zona, además, hay agricultura sobre Cambisoles y Luvisoles. Al suroeste del Estado, en lomeríos, se presentan los suelos más profundos (Phaeozems y Vertisoles) en las zonas bajas del relieve, donde el uso de suelos se ve restringido por el relieve. En el centro-oeste del Estado, en planicies acolinadas hay suelos potencialmente más productivos y sin la limitante del relieve relativamente pronunciado, por lo que son susceptibles a mayor diversidad de usos.

Palabras clave: Karst, Fallas, Suelos, Ambientes

Introducción

En México el desarrollo de karst ocupa el 20% del territorio nacional. La Península de Yucatán, en el sureste del país, es la zona kárstica más extensa. A pesar de su importancia, por su relación con las aguas subterráneas, el impacto de la construcción de viviendas y vías de comunicación, así como del desarrollo turístico, no han sido suficientemente estudiados (Gutiérrez, 2008).

Son pocos los estudios sobre karst en la península. Entre ellos sobresalen los trabajos de Gaona et al. (1980), Lugo et al. (1992), Héraud-Piña (1996), Bautista et al. (2011), Bauer et al. (2011). En el estado de Yucatán destacan los realizados por Bautista et al. (2004), Aguilar (2014); en Campeche el de Palacio et al. (2005); en Quintana Roo, los trabajos de García et al. (2000), Frausto e Ihl (2008), Fragoso (2014) y estudios espeleológicos en cuevas y cenotes como los de Coke (2004), Mecham (2005, en QRSS, 2012) y Ordoñez y García (2010).

El relieve kárstico se forma por la disolución de rocas calcáreas formadas por calcita, y dolomita y evaporitas como el yeso. Se caracteriza por la formación de depresiones cerradas (de tamaños que van desde formas milimétricas como los lapices, hasta grandes extensiones como los poljes) por la rápida infiltración del agua, la casi nula presencia de corrientes superficiales, un sistema subterráneo de agua y la abundancia de cuevas y cavernas (de Waelle, et al, 2011).

De acuerdo a los trabajos sobre karst en la península de Bocco et al (1996), Bautista et al. (2004), Frausto e Ihl (2005), Aguilar et al. (2010) y Fragoso et al. (2014) las depresiones exokársticas mayores (dolinas, uvalas y poljes) son las que se han desarrollado principalmente en la región y ocupan una gran área.

La Península de Yucatán no ha dejado de emerger. La actividad neotectónica ha provocado levantamiento de bloques, algunos de ellos basculados (Morales, 2009), lo que ha originado un sistema de fracturas orientadas al

norte y noroeste. Las fracturas y las fallas son las estructuras que controlan la posición de las formas kársticas, debido a que en ellas se promueve la disolución más intensa (Lugo et al., 1992; Bautista et al., 2004).

La distribución de fallas y fracturas y formas kársticas no es homogénea. Por el contrario, a pesar de encontrarse distribuidas en gran parte de la península, tienden a concentrarse más en algunos sitios (Fragoso et al., 2014). Los sitios que tienen procesos avanzados de disolución kárstica y donde se concentra más la presencia de fallas y fracturas pueden ser denominadas sitios tectokársticos.

son escasos los estudios sobre los suelos que se desarrollan sobre relieves kársticos a escalas mayores a 1:250,000. El desarrollo de nuevos métodos de análisis y de nuevos enfoques en la generación y manejo de datos, así como el uso de criterios morfológicos, permiten hoy en día elaborar una cartografía especializada y actualizada, como en los trabajos de Bautista et al. (2004), Aguilar et al. (2010) en la parte norte de la península y en la porción este, como en los trabajos de Fragoso (2015) y Reyes (2016).

El objetivo de este trabajo fue analizar la distribución espacial de los suelos de la porción este de la península, considerando los factores formadores y elaborar el mapa de los suelos en un ambiente que combina condiciones de alta densidad kárstica y densidad alta y media de fallas y fracturas, a escala 1: 50,000, utilizando la nomenclatura de la base referencial mundial del recurso suelo (WRB) 2007.

Zona de estudio

La porción este de la Península de Yucatán está ocupada por el estado de Quintana Roo, el que se encuentra entre los paralelos 17°49' y 21°36' norte y los meridianos 86°44' y 89°24' oeste, en una superficie de 50 843 km² y 865 km de litorales hacia el este con el Mar Caribe.

El clima dominante es cálido subhúmedo (Aw), distribuyéndose cerca de la costa el más húmedo (Aw_2) y gradualmente hacia el oeste el más seco (Aw_0).

La península es una estructura sedimentaria formada durante el Mesozoico, sobre la cual se depositaron arenas y estructuras de origen orgánico marino a lo largo del terciario (Ordoñez y García, 2010). Está formada por rocas carbonatadas, evaporíticas y clásticas como la caliza, la dolomita, el yeso y la arenisca (López-Ramos, 1975). Las formaciones más antiguas (Cretácico y Paleoceno) se ubican en el sur y las más recientes (Plioceno y Cuaternario) en el norte y este del territorio.

En el norte y el este de la península predominan las planicies (Figura 1), y hacia el oeste se van presentando planicies y mesetas kársticas, ondulaciones y lomeríos bajos con hondonadas, con una altura media de 50 msnm (Lugo-Hubp et al., 1992; Cervantes et al., 1990).

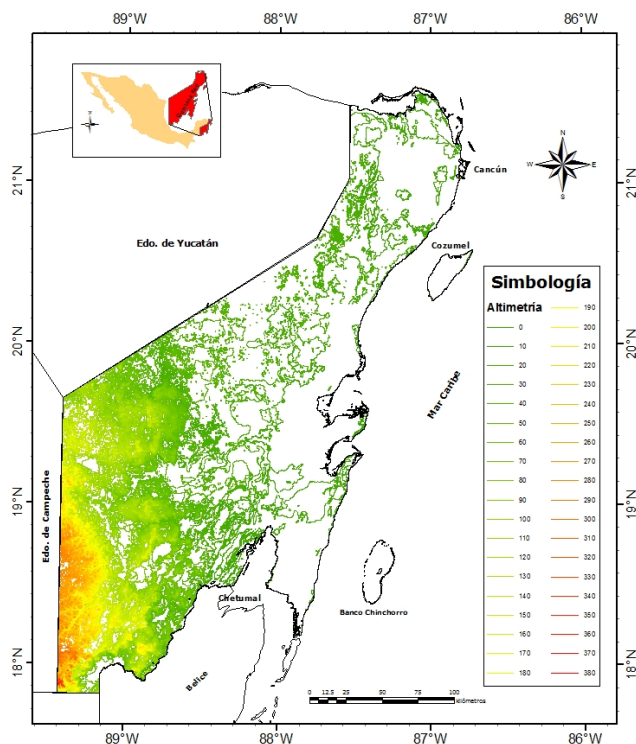


Figura 1. Curvas de nivel de Quintana Roo. La base de datos es del INEGI (2005)

La vegetación está constituida por asociaciones vegetales características de clima cálido. En la parte norte, el área más seca presenta vegetación de selva baja caducifolia, hacia el sur, con un aumento en la precipitación y presencia de suelos más profundos, la vegetación cambia a selva mediana subperennifolia y perennifolia en donde se encuentran especies de importancia maderable; en el extremo sur la vegetación es de mayor altura, llegando a encontrarse zonas con selva alta subperennifolia. Son también notables las zonas de sabana en lugares con inundación temporal y la vegetación de duna costera.

Metodología

Para la caracterización de los ambientes en la parte este de la Península de Yucatán se utilizó el enfoque geomorfoedafológico desarrollado por Zinck (1989; 2012) en el cual se parte de la premisa de que las geoformas y los suelos comparten los mismos factores formadores. Los aspectos morfológicos y edáficos tienen una gran importancia en la delimitación de unidades y en la regionalización natural del terreno, permitiendo una adecuada representación espacial de la distribución de suelos. Al utilizar este enfoque se pudieron definir con precisión los ambientes morfogenéticos (Zinck, 2012).

De acuerdo a este enfoque se trabajó en dos vías: el análisis morfométrico y la evaluación de la información edafológica.

Para el análisis morfométrico se analizaron 80 cartas topográficas vectoriales en formato shape de ESRI a escala 1:50,000 del INEGI, se consultaron imágenes de satélite Landsat 7 ETM de 2010 para la definición de geoformas y la distribución de las depresiones kársticas, fracturas y fallas.

Las depresiones kársticas fueron clasificadas por su tamaño, utilizando el índice de compacidad de Gravelius; para la densidad un algoritmo de convolución utilizando un núcleo ortogonal y para la clasificación en categorías se usó el algoritmo de Jenks (Fragoso et al., 2014).

Definidas las zonas de alta densidad kárstica y densidades media y alta de lineamientos estructurales (fallas o fracturas) que aquí llamaremos fallas, se realizaron más de 100 muestreos, con descripción de perfiles, análisis fisicoquímicos y verificaciones de campo.

Se analizó la información geomorfológica y edáfica de manera conjunta para elaborar el mapa de distribución de suelos, a través de un análisis de agrupamiento utilizando el coeficiente de Gamma de Goodman-Kruskal y un análisis de clasificación en el programa Weka 3.

Resultados

Los ambientes tectokársticos son morfométricamente complejos, presentan zonas con una densidad media y alta de fallas y una densidad alta de depresiones kársticas.

La distribución de fallas en la porción este de la península no es homogénea. Por el contrario, a pesar de que se encuentran repartidas en la mayor parte del área de estudio, tienden a concentrarse más en las zonas norte y centro y ser más dispersas en el sur (Figura 2). Como cabría esperar, las zonas con densidad media abarcan áreas bien definidas y distribuidas alrededor de las zonas de alta densidad y en la parte medio-oeste del estado, principalmente.

Las dolinas, uvalas y poljes son las formas kársticas dominantes en el área de estudio. Las formas más frecuentes son las uvalas (58.8%), es decir aquellas depresiones con menos de 1 km² y formas alargadas, seguida por las dolinas (de forma circular) y en menor proporción (5.9%) los poljes (presentan áreas de más de 1 km²). Las zonas con mayor densidad kárstica (Figura 3) se encuentran distribuidas de forma heterogénea, principalmente del centro del Estado y hacia el norte, en las zonas cercanas a la costa y en el extremo sur.

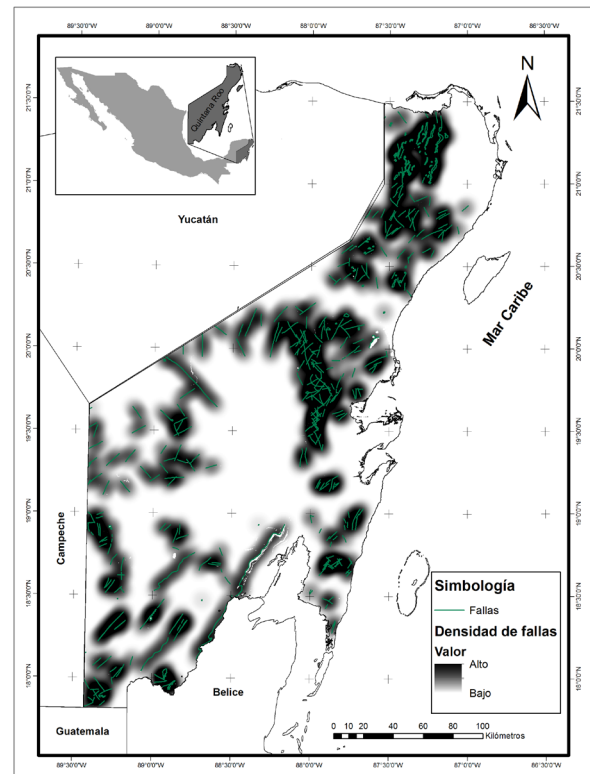


Figura 2. Densidad de fallas y fracturas a partir de la base de datos del INEGI (2005).

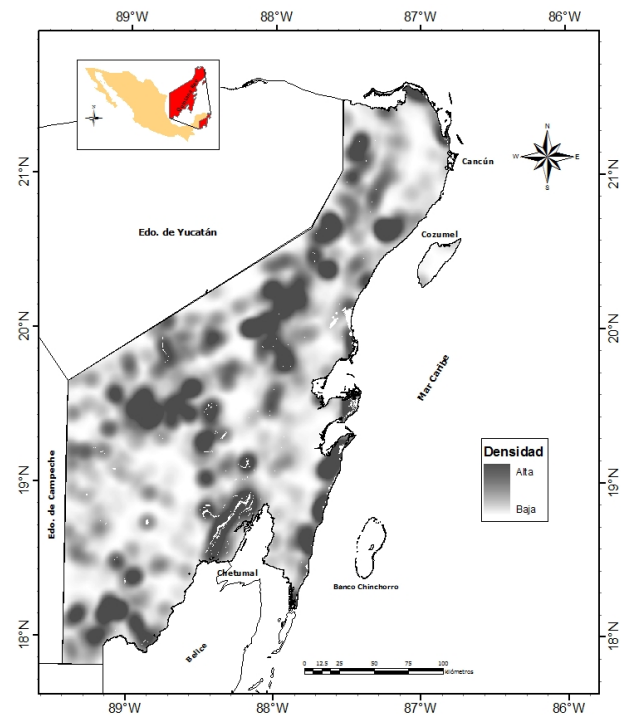


Figura 3. Densidad de depresiones kársticas según Fragoso et al. (2014)

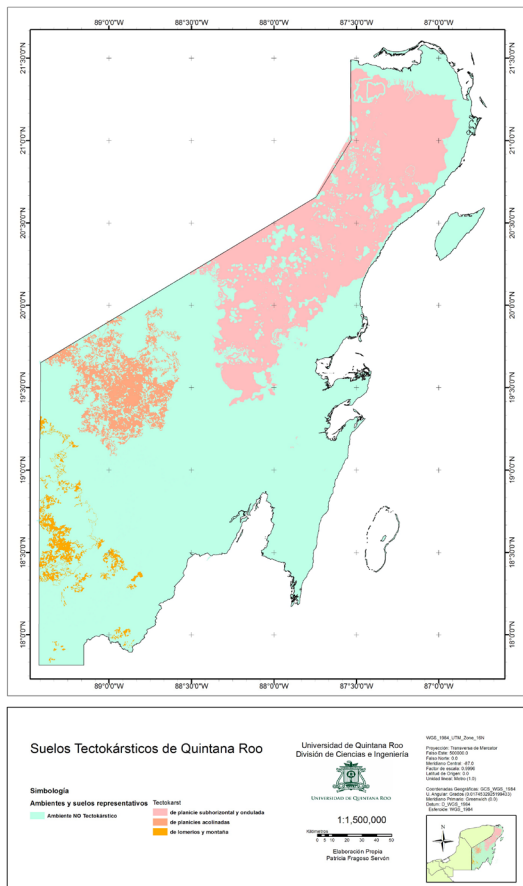


Figura 4. Zonas con alta densidad kárstica y alta a media densidad de fallas

Las zonas con alta densidad kárstica y alta y media densidad de fallas se encuentran en tres áreas (Figura 4).

Los análisis de interpolación utilizados para la construcción de los mapas de densidad tomaron como base un algoritmo de convolución simple (Krigin), dado que los puntos de cada uno de los cuerpos de agua y depresiones kársticas fueron considerados en función de su extensión, lo que hizo posible considerar los diferentes grados de desarrollo del proceso de disolución.

Para el caso de la construcción de las poligonales usadas para la asignación de atributos, la técnica propuesta por Priego et al. (2010) fue ajustada para usar datos a escala 1:50,000, resultando una zonificación morfométrica más precisa, que fue verificada en campo antes de ser usada como marco para la asignación de los demás atributos.

En las planicies subhorizontales al norte de Quintana Roo, sobre formaciones geológicas recientes (Plioceno y Cuaternario), con una vegetación dominante de selva mediana subperennifolia, los suelos que ocupan una mayor área son los Leptosols, solos o combinados con Luvisols e incluso Vertisols. En el extremo noroeste, donde hay gran cantidad de depresiones kársticas (Figura 5), se encuentra una zona dominada por suelos rojos debida a la presencia de óxidos de hierro, Luvisols asociados con Cambisols y suelos color café oscuro, como

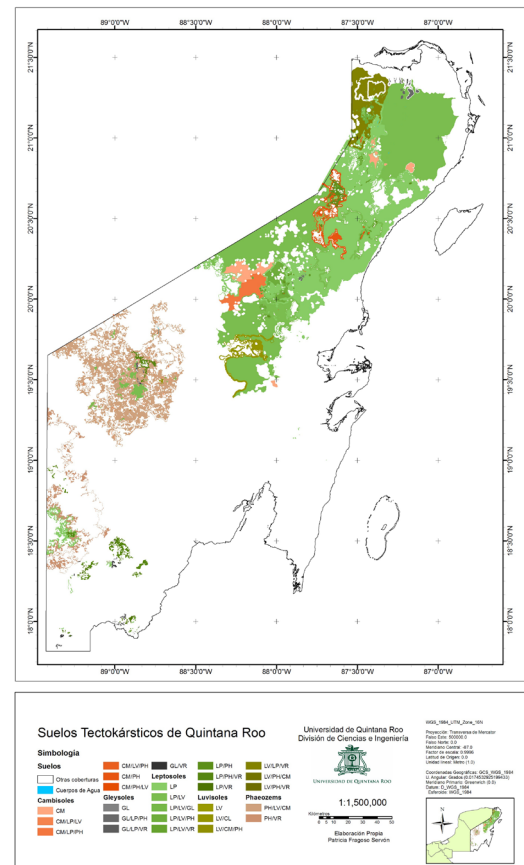


Figura 5. Suelos presentes en el ambiente tectokárstico de Quintana Roo.

los Phaeozems y Vertisols. Hacia el sur, donde se encuentran zonas de transición, la roca calcárea es más resistente al intemperismo y se encuentran los Cambisols como suelo primario, que también están asociados con Luvisols y Phaeozems, sobre los que se practican actividades agrícolas.

En planicies acolinadas del centro-oeste del Estado, en formaciones del Eoceno, se presentan suelos con mayor profundidad. En esta zona los suelos dominantes son Phaeozems/Luvisols/Cambisols y Leptosols/Luvisols que son utilizados para pastizales y cultivos. En algunas zonas se presentan suelos que se inundan o tienen mal drenaje como los Gleysols.

La tercera zona se encuentra en las formaciones más antiguas, sobre lomeríos y montañas bajas (de acuerdo con su disección vertical) al suroeste del Estado. Allí los suelos dominantes son Leptosols, Phaeozems y Vertisols donde se desarrolla selva mediana subperennifolia. Los Leptosols dominan en las zonas con mayor pendiente y, en zonas con menor inclinación, se desarrollan los Phaeozems, mientras que en las zonas bajas se acumulan materiales que han favorecido el desarrollo de suelos más profundos como los Vertisols.

Discusión y Conclusiones

Los procesos kársticos y la presencia de fallas junto con el relieve son factores que explican la variabilidad ambiental y la presencia de ciertos grupos de suelos en la porción este de la Península de Yucatán. De acuerdo con Lugo et al. (1992) la ruptura de las rocas forma fisuras, fracturas, fallas y diaclasas que facilitan que la disolución de las rocas calcáreas sea más intensa. Por su parte, Bautista et al. (2004) señalan que la abundancia de precipitaciones y la bien conservada vegetación de esta parte de la península, favorecen la disolución de la roca y con ello la acumulación de materiales que ayudan al desarrollo de horizontes petrocálcicos en la parte baja del perfil, dando inicio al desarrollo de Leptosols.

Dependiendo del tipo de roca y su pureza, su disolución puede originar otros suelos como los Cambisols. En ellos la disolución de la roca es más intensa, el perfil muestra una gran cantidad de fragmentos de roca mezclada con tierra fina de color café a rojo y, en perfiles de suelos más desarrollados, los fragmentos de roca se encuentran a una mayor profundidad respecto al nivel de superficie predominando las coloraciones rojizas en la parte superior. En estados más avanzados de desarrollo se acumula arcilla en los horizontes Bt dando origen a los Luvisols. Esta es la secuencia de procesos que dominan en la parte norte del área de estudio.

Sobre las planicies, los Leptosols son los suelos dominantes en las zonas con una alta karsticidad y alta densidad de fallas, formando una zona muy susceptible a procesos erosivos verticales y colapsos de dolinas. Bautista et al. (2011, 2015) y Aguilar (2014) reportaron la presencia de los mismos suelos para la porción norte del estado de Yucatán, donde se registran condiciones semejantes. En el estado de Campeche, Palacio et al. (2005) caracterizaron ambientes kársticos considerando el relieve (pero no las fallas), reportando los mismos suelos en las zonas de planicie.

Hacia el sur y al oeste de Quintana Roo, el relieve pasa de planicies subhorizontales a planicies onduladas, acolinadas y lomeríos, donde la disolución de la roca es más intensa, originando otros tipos de suelos.

En la parte centro-oeste, en planicies onduladas y acolinadas, dominan los Phaeozems y, como suelos secundarios, Cambisol, Luvisol y Vertisol que, con el efecto de un relieve suave de mediana energía, son los suelos con mayor desarrollo en esta parte del Estado.

En este estudio se encontró que hacia el sur, en la zona de lomeríos se dan las condiciones para el desarrollo de Leptosols, Phaeozems y suelos más profundos como los Luvisols, Vertisols e incluso Gleysols en las zonas bajas del relieve. En

esta zona el uso de suelos se ve restringido por el relieve.

La porción este de la península se caracteriza por la karstificación y por una gran cantidad de fracturas y fallas que incrementan la rugosidad del terreno a escalas grandes, lo que favorece la acumulación de materiales, tanto de origen orgánico como inorgánico, que permiten el desarrollo de diversos suelos.

El uso potencial del suelo lo restringen las condiciones y procesos antes descritos. Actualmente en el norte del Estado, el turismo de cenotes, cavernas y el senderismo son intensos como lo destaca Reyes (2016). Sobre los manchones de suelos más desarrollados de Cambisoles y Luvisoles se practica la agricultura.

Hacia el centro y sur del Estado, donde hay suelos más desarrollados hay una mayor diversidad de usos posibles sobre los suelos dominantes.

Los resultados muestran que, de los suelos presentes en el Estado, aquellos con mayor potencial de uso se han desarrollado en condiciones intermedias de energía del relieve, densidad de fallas y densidad de karstificación, mismos que corresponden a las áreas que se definen como tectokársticas.

Resta verificar si bajo el mismo conjunto de condiciones se presenta igual variedad de suelos con alto potencial de uso en otros espacios de la Península de Yucatán, como las zonas bajas de Campeche en el oeste o la zona de colinas del sur de Yucatán.

En los ambientes tectokársticos de la porción este de la Península de Yucatán el relieve juega un papel importante en la distribución de los suelos. En las planicies del norte dominan los Leptosols y Cambisols, en la base de los lomeríos del sur Phaeozems con Vertisols y en las zonas intermedias (planicies acolinadas) es donde se encuentra la mayor diversidad de suelos.

Agradecimientos

Al proyecto “Programa estatal de acción ante el cambio climático de Quintana Roo” y al Proyecto “UQROO_FOMIX-2012” por las facilidades dadas para el uso de la información cartográfica, salidas de campo y uso de equipo informático para el análisis estadístico.

Referencias

- Aguilar, Y. 2014. Modelo conceptual y cartográfico de la vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas en karst tropical, con un enfoque geopedológico y uso de árboles de decisión. Tesis Doctoral. Centro de Investigación en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. 204 p.
- Aguilar, Y., Mendoza, M., Frausto, O., Bollo, M., Bautista, F. 2010. Spatial distribution of karstic depressions in tropical karst plains. Presentado en la Reunión anual de la Unión Geofísica Mexicana, Geos, México, pp. 115–116.
- Bauer, P., Gondwe, B., Charvet, G., Marí, L., Rebolledo, M., Merediz, G. 2011. The Yucatan Peninsula karst aquifer, México. *Hydrogeology Journal* 19(3):507-524
- Bautista, F, Frausto, O, Ihl, T., Aguilar, Y. 2015. Actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán, México: enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 2(6): 303-315.
- Bautista, F., Estrada, H., Jiménez, J.J., González, J.A. 2004. Relación entre el relieve y unidades de suelo en zonas cársticas de Yucatán. *Terra Latinoamericana* 22: 243–254.

- Bautista, F., Palacio, G., Quintana, P., Zinck, J.A. 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, Mexico. *Geomorphology* 135, 308–321.
- Bocco, G., Mendoza, M.E., Velázquez, A., Torres, A., Torres, M.A. 1996. Regionalización ecológica del estado de Michoacán. Informe Técnico. DERN. Morelia, Michoacán. 98 p.
- Cervantes, Y., Cornejo, S., Lucero, R., Espinosa, J., Miranda, E., Pineda, A. 1990. Atlas Nacional de México volumen II. Instituto de Geografía, UNAM.
- Coke, J. 2004. Geography of caves in Quintana Roo. *Association for Mexican Cave Studies Activities Newsletter* 27, 93–97.
- De Waele, J., Gutiérrez, F., Parise, M., Plan, L. 2011. Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. *Geomorphology* 134, 1–8.
- Frausto, O., Ihl, T. 2008. Capítulo 2. Mapa de formas exocársticas del norte de Quintana Roo a escala 1: 50000. In: *Estudio Geohidrológico Del Norte de Quintana Roo, México*. pp. 41–54.
- Fragoso, P. 2015. Análisis espacial de los suelos de Quintana Roo con un enfoque geomorfoedafológico. Tesis Doctoral. Universidad de Quintana Roo, México. 163 p.
- Fragoso, P., Bautista, F., Frausto, O., Pereira, A. 2014. Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, V, 31, num 1, p. 127-137
- García, G., Padilla, J., Salazar, E. 2000. Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico del estado de Quintana Roo. In: Vester, F.M.H. (Ed.), *Influencias de Huracanes En El Paisaje de Yucatán Consideraciones Para El Diseño de Corredores Biológicos Y Su Monitoreo*. Reporte de trabajo, CICY, UQROO, UNAM, ECOSUR, pp. 32–53.
- Gaona, S., Gordillo, T., Villasuso, M. 1980. Cenotes, karst característico: mecanismos de formación. *Revista del Instituto de Geología*, V, 4, num 1, p. 32-36.
- Gutiérrez, M. 2008. *Geomorfología*. Pearson/Prentice Hall, Madrid. 885 p.
- Héraud-Piña, M. 1996. *Le Karst du Yucatan: Pays des mayas*. Presses Universitaires de Bordeaux, Bordeaux. 88 p.
- INEGI. 2005. *Cartas Topográficas, 1:50000*. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México.
- López-Ramos, E. 1975. Geological Summary of the Yucatan Peninsula. In: Nairn, A.E.M., Stehli, F.G. (Eds.). *The Gulf of Mexico and the Caribbean*. Springer US, pp. 257–282.
- Lugo-Hubp, J., Aceves, J., Espinosa, R. 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología*. UNAM 101, 143–150.
- Mecham, 2005. Quintana Roo Speleological Survey [Documento WEB]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrss.htm> (consultado 12.19.13).
- Morales, J.J. 2009. La península que surgió del mar. Secretaría de Educación del Gobierno del Estado de Yucatán, México. 152 p.
- Ordóñez, I., García, M. 2010. Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México). *Revista Electrónica de Medioambiente* pp. 15–35.

- Palacio, G., Medina, V., Bautista, F. 2005. Diagnóstico ambiental de la costa del estado de Campeche: enfoques geomorfológico, pedológico y geopedológico. In: Caracterización Y Manejo de Suelos en La Península de Yucatán. UACAM-UADY-INE, México pp. 59--72.
- Priego Santander, Á., Bocco, G., Mendoza, M.E., Garrido, A. 2010. Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes 1st ed., México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología. Disponible en: <http://books.google.es/books?id=VaoA4Tg6mYEC>.
- QRSS. 2012. Quintana Roo Speleological Survey [www Documento]. URL <http://www.caves.org/project/qrss/qrssesp.htm>
- Reyes, N. 2016. Identificación y caracterización de los suelos del área protegida de X'Cacel-X'Cacelito. Tesis de Licenciatura. Universidad de Quintana Roo. México. 98 p.
- Weka 3. Data Mining Software in Weka, <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/index.html>
- Zinck, J.A. 1989. Physiography and Soils. ITC, Netherlands. 155 p.
- Zinck, J.A. 2012. Geopedología. ITC, Enschede, Netherlands. 123 p.

Manuscrito recibido: 26 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 6 enero de 2017

Manuscrito aceptado: 20 enero de 2017