

El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología

The karst of Yucatan: its origin, morphology and biology

Héctor Estrada Medina^{1*}, Juan José Jiménez Osornio¹, Oscar Álvarez Rivera¹, Roberto Carlos Barrientos Medina²

¹Departamento de manejo y conservación de recursos naturales tropicales. Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Autónoma de Yucatán. Km 15.5 carretera Mérida-Xmatkuil s/n. C.P. 97315. Mérida, Yucatán, México.

Correo electrónico: hector.estrada@correo.uady.mx

²Departamento de Ecología. Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Autónoma de Yucatán.

*Autor de correspondencia

Resumen

El karst del estado de Yucatán, México, tiene su origen en los arrecifes coralinos y sedimentos marinos que, al exponerse a la superficie, formaron la roca caliza. Los procesos de solubilización-precipitación de esta roca han promovido la ausencia de corrientes de agua superficiales, un relieve ligeramente ondulado con planicies, depresiones y montículos, afloramientos y presencia de cenotes. Los diferentes grados de porosidad y dureza de la roca han permitido la formación desde pequeñas oquedades y acumulaciones de suelo, hasta complejos sistemas de cuevas secas y húmedas. El manejo de este tipo de áreas debe partir del conocimiento de su origen, morfología y biología para garantizar el uso sustentable de los recursos naturales. Se requiere especial atención en el manejo de la extracción de roca caliza, las actividades turísticas y productivas relacionadas con el uso de agua del acuífero, así como el volumen y calidad de las descargas de aguas residuales al suelo, cenotes y el mar.

Palabras clave: Paisaje kárstico; roca calcárea; roca caliza; carbonato de calcio; cenotes.

Abstract

The karstic environment of the state of Yucatán, México has its origin on the coral reefs and marine sediments that, after being exposed to surface conditions, formed limestone. Solubility and precipitation processes of this rock have promoted the absence of surface water currents, a slightly undulated relief with plains, depressions and mounds, fractured outcrops and presence of sinkholes. The different levels of porosity and hardness of the rock have allowed the formation of small hollows, soil pockets hollows, as well as complex systems of dry and wet caves. The management of this kind of areas must consider its origin, morphology and biology to guarantee the sustainable use of the natural resources. Special attention needs to be paid on the management of the extraction of limestone rocks, the touristic and productive activities related to the use of water from the aquifer, as well as the volume and quality of the water discharges to soil and sinkholes.

Keywords: Karstic landscape; calcareous rock; limestone; calcium carbonate; sinkholes.

Recibido: 24 de mayo de 2018

Aceptado: 13 de septiembre de 2019

Publicado: 23 de octubre de 2019

Como citar: Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J., Álvarez-Rivera, O., & Barrientos-Medina, R. C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria* 29, e2292. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2292>

Concepto de karst y su distribución

Karst o carst se refiere a un tipo especial de paisaje desarrollado en áreas dominadas por rocas relativamente solubles tales como las evaporitas (halita $[\text{NaCl}]$, anhidrita $[\text{CaSO}_4]$ y yeso $[\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$) y las calizas (dominadas por CaCO_3) (Jennings, 1971; 1985). Existen otros ambientes con paisajes similares al karst pero que no se desarrollan sobre los tipos de roca mencionados, a estos se les denominan pseudokarst (Wray, 1997). La palabra karst refiere al nombre del lugar en Eslovenia (anteriormente Yugoslavia) en donde Jovan Cvijic describió este tipo de paisaje por primera vez a finales del siglo XIX (Ćalić, 2007; Ford & Williams, 2007; Gams, 1993). A nivel mundial, las zonas de karst representan aproximadamente el 14.1% de la superficie terrestre, de las cuales 12.2% relacionado con calizas, 0.18% con evaporitas y 1.40% con pseudokarst (Halliday, 2007; Hollingsworth, 2009). En México existen $391\,700\text{ km}^2$ (2.21% del total mundial) de zonas kársticas (Gunn, 2004), de los cuales $35\,000\text{ km}^2$ (8.93% del total del país) corresponden al karst del estado de Yucatán (Kueny & Day, 2002). El 95% del estado de Yucatán es paisaje kárstico asociado a roca caliza (Williams, 2008); otras áreas con karst en México se pueden encontrar en las zonas montañosas de Chiapas, la Sierra Madre del Sur y la Sierra Madre Oriental (Gutiérrez, 2008) (figura 1).

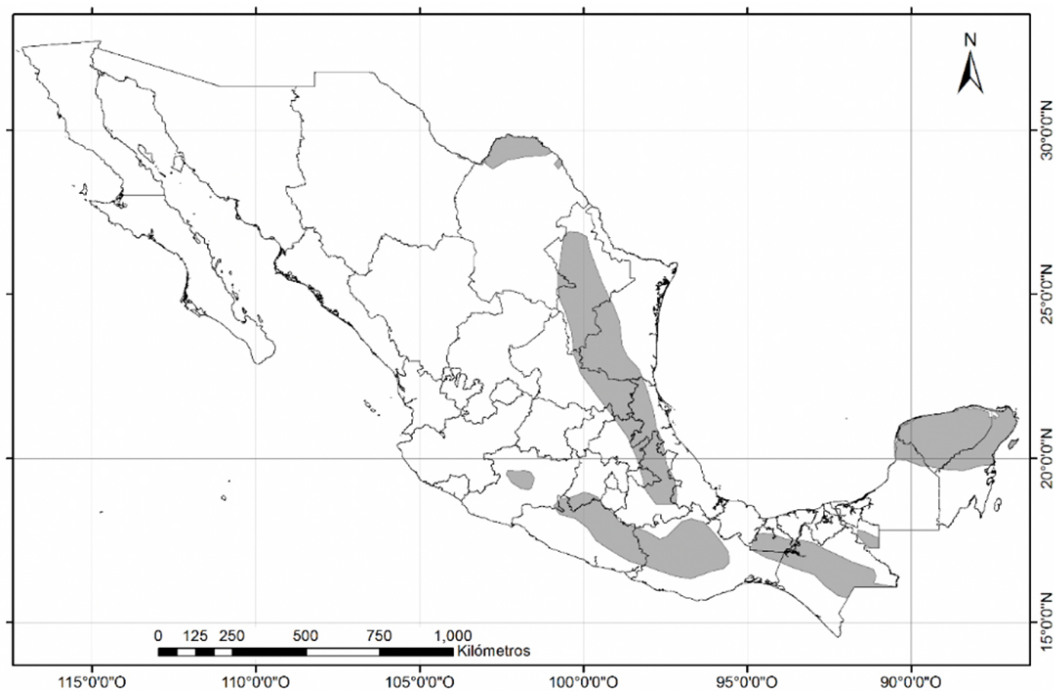


Figura 1. Zonas kársticas (de roca caliza) en México.
Fuente: Williams & Fong, 2016

Origen del karst de Yucatán

Rocas carbonatadas: origen del paisaje kárstico de Yucatán

El desarrollo de las formas kársticas requiere la presencia de un tipo de roca que pueda ser disuelta, al menos parcialmente, por el agua superficial o subterránea (Scheffers, May & Kelletat, 2015). Esta disolución depende de factores tales como la pureza, el tiempo de exposición, el espesor de las capas, la inclinación y la composición mineralógica, el grado de porosidad y la fracturación de la roca, además de factores externos como las condiciones geohidrológicas y climáticas (Beddows, Blanchon, Escobar & Torres-

Talamante, 2007; Isphording, 1976; Lugo-Hubp, Aceves-Quesada & Espinosa-Pereña, 1992; Villasuso & Ramos, 2000). Para el desarrollo de un paisaje kárstico a partir de rocas carbonatadas, es requisito que la roca tenga un contenido de CaCO_3 mayor a 70% (Ford & Williams, 2007). Yucatán es una plataforma calcárea compuesta primordialmente de roca caliza (Bonet & Butterlin, 1977; Marín, Steinich, Pacheco & Escolero, 2000), que contiene entre 89% y 99% de CaCO_3 (Cabadas, Solleiro, Sedov, Pi & Alcalá, 2010; Landa, 2007; Pacheco & Alonzo, 2003). Los estratos de roca caliza de Yucatán corresponden a la era Cenozoica (periodos terciario y cuaternario) (Bonet & Butterlin, 1977); estas rocas se formaron principalmente a partir de arrecifes coralinos que, al ser expuestos a los agentes del intemperismo, se convirtieron en sedimentos; posteriormente, estos sedimentos se convirtieron en caliza a través de la diagénesis (Espinosa, Cerón & Sulub, 1998; Lefticarui Perry, Ward, & Lefticariu, 2006). Diversos estudios muestran la presencia de tres estratos de roca: la roca consolidada, el sascab y la coquina (Duch, 1988,1991; Espinosa *et al.*, 1998; Estrada-Medina, Graham, Allen, Jimenez-Osornio & Robles-Casolco, 2013; Estrada-Medina, Tuttle, Graham, Allen & Jimenez-Osornio, 2010; Estrada-Medina, Zanatta, Valdez & Casolco, 2008), aunque algunos depósitos de paligorskita-sepiolita también han sido encontrados (Isphording, 1973; Sánchez del Río, Suárez & García-Romero, 2009). La roca consolidada, denominada localmente como laja, corresponde a afloramientos rocosos de extrema dureza, con un espesor aproximado de 3 m, que se considera un producto de la litificación (por ejemplo., recristalización de la aragonita y calcita alta en magnesio) de los sedimentos originales (Duch, 1991; Perry *et al.*, 1989; Quiñones & Allende, 1974). El sascab (del maya "sahcab", tierra blanca) es una roca no consolidada de textura arenosa y bajo contenido de magnesio (aunque algunas pueden contener dolomita) que probablemente se originó del intemperismo del material calizo original (Isphording, 1976; Littmann, 1958; Pacheco & Alonzo, 2003; Perry, Velazquez-Oliman & Socki, 2003). La coquina o conchuela es una roca fosilífera con abundantes macroporos (Estrada-Medina *et al.*, 2010) en la cual se encuentran conchas de moluscos, principalmente bivalvos y gasterópodos. La fuerza máxima de compresión uniaxial encontrada por Estrada-Medina *et al.* (2013) para muestras de estas rocas procedentes del norte de Yucatán fueron de 40 MPa para la roca consolidada, 1.5 MPa para el sascab y 5 MPa para la coquina.

Karstificación

Existen tres grupos principales de rocas sedimentarias carbonatadas que dan lugar a los paisajes kársticos, sus principales minerales son la aragonita, calcita y dolomita (Boggs, 2006). En la tabla 1 se presentan las principales características de estos tres minerales. Las rocas calizas de Yucatán están compuestas principalmente de calcita, aunque los sedimentos que las conformaron originalmente también contenían dolomita y aragonita, los cuales sufrieron alteraciones químicas al quedar expuestas a la superficie (Duch, 1988).

Tabla 1. Propiedades de los minerales más abundantes en las rocas carbonatadas de Yucatán.

Fórmula Sistema cristalino	Aragonita CaCO_3 Ortorómbico	Calcita CaCO_3 Trigonal	Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ Hexagonal
Color	Incoloro, blanco o amarillo	Incoloro o blanco	Incoloro o rosa, en ocasiones con tonalidades en amarillo o café.
Dureza de Mohs	3.5-4	3	3.5-4
Gravedad específica (g/cm^3)	2.94	2.72	2.86
Constante del producto de solubilidad (K) a 25 °C en agua de mar	6.3×10^{-9}	4.39×10^{-9}	1×10^{-17}
Constante del producto de solubilidad (K) a 25 °C en agua	4.67×10^{-9}	3.36×10^{-9}	6.02×10^{-19}

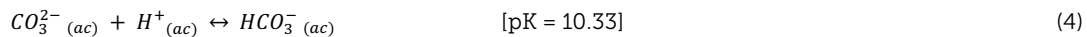
Fuente: Best, Fielding, Jarvis & Mozley (2009); Hsu (1963); Kogel, Trivedi, Barker & Krukowski (2006); Leeder (1982); Morse & Mackenzie (1990); Scoffin (1987).

La disolución de la calcita es baja ($K_{sp} = 8.30$) con una tasa de disolución directamente proporcional a la concentración de H^+ a $pH < 4$ y una tasa de disolución independiente a la concentración de H^+ a $pH > 5.5$; entre estos dos regímenes de disolución existe un tercero en el que la dependencia a la concentración de H^+ varía (Morse & Mackenzie, 1990; Sjöberg & Rickard, 1984).

El bióxido de carbono (producto de la respiración de los organismos o la descomposición aerobia) al combinarse con el agua produce ácido carbónico, precursor de los iones bicarbonato y carbonato (Ford, Palmer & White, 1988) (ecuaciones 1-5). Por lo tanto, las aguas meteóricas y la alta actividad biológica en el suelo promueven la disolución de las rocas calizas, mientras condiciones de baja humedad, baja actividad biológica y alta concentración de carbonatos promueven su precipitación (Ecuación 6). Asimismo, se ha documentado la reducción de sulfatos como un mecanismo que también promueve la disolución de la caliza en los cenotes (Stoessell, Moore & Coke, 1993). Los factores que controlan la disolución de la calcita son la temperatura, salinidad, presión, estructura cristalina, composición mineral, tamaño de partícula, adsorción y emparejamiento de iones y quelación (Pytkowicz, 1969).



$H_2CO_3^* = H_2CO_3 + CO_2$ en solución



Ecuaciones: Ford & Williams (2007); Plummer, Wigley & Parkhurst (1978). Valores de los logaritmos de las constantes de equilibrio (pK): Butler, 1991.

La disolución de la calcita de las rocas subsuperficiales está asociada con la proporción de las especies químicas carbonatadas (H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) que se encuentran disueltas en el agua del acuífero (Butler, 1991) (figura 2); esta proporción determina en gran medida el pH del agua. El pH del agua de los pozos y cenotes cerrados de Yucatán tiene valores de entre 6.53 (Samahil) y 7.56 (Homún) con un promedio de 6.88 (Perry, Paytan, Pedersen & Velazquez-Oliman, 2009), lo que indica que la especie química dominante es el ion bicarbonato (HCO_3^-).

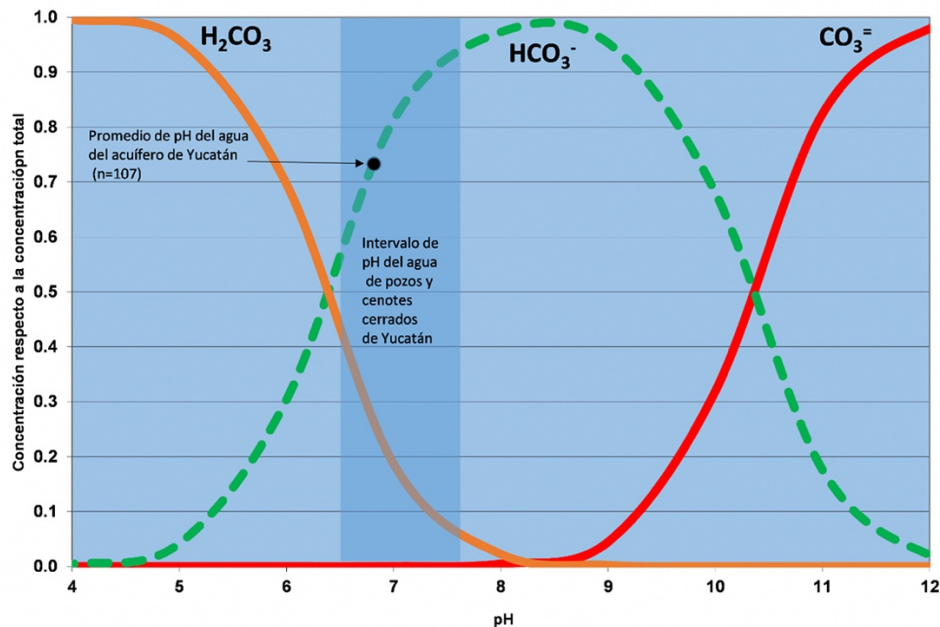


Figura 2. Distribución de las especies carbonatadas en solución en función del pH.

Fuente: Elaboración propia calculada a partir de balance de masas y las ecuaciones de equilibrio tomadas de Butler (1991). Los valores para calcular el promedio y el intervalo de pH se obtuvieron de Perry, Velazquez-Oliman & Marín (2002).

Morfología del karst de Yucatán

Formas kársticas

Además de la composición de la roca caliza y las condiciones ambientales, la evolución del karst de Yucatán se encuentra relacionada también con la neotectónica y las glaciaciones (Lugo-Hubp *et al.*, 1992). La evolución del karst se puede observar a través de las diferentes formas del relieve que se van formando a través del tiempo. Jovan Cvijic identificó en 1919 la existencia de cuatro estados de evolución del Karst: juvenil, maduro, maduro tardío y viejo (Bharatdwaj, 2006). El estado juvenil es cuando la roca caliza queda expuesta, el drenaje superficial se pierde y se desarrolla el subterráneo; el estado maduro es cuando se observa un drenaje subterráneo bien desarrollado y una cantidad máxima de cenotes y cavernas; el estado maduro tardío se caracteriza por la desaparición de los cenotes y la aparición de los poljés y las uvalas; y el estado viejo es cuando los escurrimientos superficiales vuelven a aparecer (Bharatdwaj, 2006; Sanders, 1921). Alexander Klimchouk realizó luego una definición más completa basada en la evolución geológica del karst (Klimchouk & Ford, 2000). En la península de Yucatán hubo dos etapas de formación de karst, una antigua, paleogénica, en una superficie elevada, con formaciones características de climas tropicales (conos cársticos); y otra reciente, en la planicie, de hasta 20 cm-30 cm de altura (Gerstenhauer [1972], citado en Lugo-Hubp *et al.* [1992]). Las tres formas predominantes del terreno en el karst Yucateco son las depresiones cerradas conocidas como dolinas, uvalas y poljés (Aguilar, Bautista, Mendoza, Frausto & Ihl, 2016). En general, se acepta que las dolinas son de forma circular a subcircular y varían en diámetro de unos cuantos metros hasta 1 km; las uvalas son grandes depresiones (mayores de 1 km) de formas irregulares o alargadas; y los poljés son depresiones largas, con el fondo cubierto con sedimentos y situados muy cerca del nivel freático (Čalić, 2011). Recientemente, Aguilar *et al.* (2016) identificaron 6717 depresiones en el estado de Yucatán, de las cuales 4620 fueron clasificadas como dolinas (cenotes), 2021 como uvalas y 76 como poljés. El paisaje kárstico de Yucatán se caracteriza por un relieve ondulado compuesto por planicies estructurales y lomeríos (Lugo-Hubp *et al.*, 1992), con depresiones y cavernas cuyas dimensiones se van

ampliando hacia el sur del estado (Duch, 1988). Duch (1991) estudió los patrones de asociación de las topoformas (forma, tamaño y predominancia), reconociendo 20 zonas fisiográficas. Finch (1965) identificó tres zonas kársticas en el estado: el karst de la costa, el karst central y el karst de las colinas. Los cenotes, del Maya dzonot (De Ciudad & Acuña, 1984) están localizados, principalmente, en la zona de karst central, alrededor del cráter de Chicxulub formando el conocido anillo de cenotes, con un diámetro aproximado de 160 km. Este cráter se formó por el impacto de un meteorito hace aproximadamente 65 millones de años (figura 3) (Connors *et al.*, 1996; Perry, Marín, McClain & Velazquez, 1995). Al sur-oeste de la ciudad de Mérida se encuentra un relieve de planicies y lomeríos de gran tamaño, destacando la sierrita de Ticul. En esta zona no hay cenotes, las formas cársticas están limitadas a numerosas cavernas de varios tamaños (Lugo-Hubp *et al.*, 1992).



Figura 3. Representación esquemática del cráter de Chicxulub y anillo de cenotes del estado de Yucatán.
Modificado: *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, 2003.

En cuanto a su morfología, la Península de Yucatán presenta dos unidades morfológicas principales, una en el norte donde predominan las planicies y rocas sedimentarias neogénicas y la segunda al sur donde se alternan planicies con lomeríos de hasta 400 msnm en rocas sedimentarias oligocénicas (Lugo-Hubp *et al.*, 1992). En el estado de Yucatán existen dos principales formas de relieve: planicies y montículos; sin embargo, también existen otras formaciones como las planicies inclinadas, planicies onduladas y planicies escalonadas de geometría diversa (Lugo & García, 1999). En Yucatán el karst se considera, en general, maduro (Steinich & Marín, 1997), pero con menor evolución en la zona centro-norte cerca del anillo de cenotes (Marín, Perry, Essaid & Steinich, 2001) y un grado de madurez tardío hacia el denominado cono sur. Bosák (2008) realizó una clasificación y caracterización de los tipos de karst, considerando el tiempo de exposición de la roca, la geología y geografía, identificando a las zonas de karst del caribe como cuencas de sedimentación, con un tiempo corto de exposición de la roca, por lo que

evolutivamente se encuentran entre los más recientes del mundo. El karst del estado de Yucatán, por sus características, puede incluirse dentro de esta clasificación.

Suelos

Aunque los suelos dominantes en el estado de Yucatán son los Leptosols, se pueden encontrar también Arenosols, Regosols, Solonchaks, Gleysols e Histosols (cerca de la línea de costa) y Luvisols, Vertisols y Stagnosols en el resto del estado (Bautista, Frausto, Ihl & Aguilar, 2015).

Aunque la roca caliza es el material que subyace a estos suelos, no es el principal material parental; los principales materiales parentales son los sedimentos marinos, residuos volcánicos ricos en ilita, caolinita, esmectita, montmorillonita y clorita y, polvos transportados por el viento desde África que aportan entre 33 g y 75 g de fósforo/ha/año (Cabadas *et al.*, 2010; Das, Evan & Lawrence, 2013); siendo los principales factores formadores de suelos la edad superficial y el clima (principalmente la precipitación), los cuales contribuyen en la disolución de la roca caliza y disminución de los carbonatos del suelo (Bautista, Palacio-Aponte, Quintana & Zinck, 2011).

Específicamente, los materiales parentales de los suelos rojos arcillosos profundos (Luvisols) son una mezcla de materiales volcánicos y componentes metamórficos y graníticos transportados por el viento (Cabadas *et al.*, 2010; Solleiro-Rebolledo & Cabadas, 2011), combinados con los residuos de la roca caliza (Perry *et al.*, 2003). Los suelos que se desarrollan en la parte superior del microrelieve no presentan carbonatos pedogénicos secundarios, mientras que los suelos desarrollados en las partes bajas sí lo hacen (Krasilnikov *et al.*, 2013). Los suelos someros del norte de Yucatán presentan principalmente caolinita y los profundos del sur presentan montmorillonita, sobre todo aquellos que no tienen buen drenaje (Isphording, 1976). En general, los suelos de Yucatán tienen valores altos de carbono orgánico (entre 3.8% y 31.7%) (Delgado-Carranza, Bautista-Zúñiga, Calvo-Irabien, Aguilar-Duarte & Martínez-Tellez, 2017), siendo los suelos de los humedales (Herrera *et al.*, 2016) y de las partes altas del microrelieve (Bautista-Zúñiga, Jiménez-Osorio, Navarro-Alberto, Manu & Lozano, 2003) los que presentan los valores más altos; sin embargo, estos últimos poseen menor cantidad de tierra fina y altos porcentajes de pedregosidad y rocosidad (Delgado-Carranza *et al.*, 2017). Las condiciones kársticas de Yucatán han dado lugar a cuatro tipos generales de suelo, los suelos arenosos (presentes en la costa), los suelos orgánicos (asociados a humedales) y dos tipos más en el interior del estado, los de planicie (rojos) y los de montículo (negros). Una diferencia muy marcada entre estos dos últimos tipos de suelos es que el contenido de carbonatos promedio de carbonatos es de 45% en suelos negros y 5% en suelos rojos (Estrada-Medina, Canto-Caché, De los Santos-Briones & O'Connor-Sánchez, 2016). En general, la fertilidad química de suelos negros es mejor que la de los suelos rojos (Aguila, 2007), aunque los suelos rojos presentan mejores propiedades físicas que permiten una mayor facilidad para realizar actividades agrícolas.

Hidrología del karst

Debido a sus características, el karst del estado de Yucatán es del tipo holokarst, ya que este hace referencia al paisaje kárstico donde toda el agua es drenada al subsuelo (Ford *et al.*, 1988); esto es debido al alto nivel de fracturación de la roca superficial y la porosidad de las rocas subsuperficiales (Lesser & Weidie, 1988). Este holokarst ha permitido la formación de un gran acuífero, el cual es la única fuente de agua potable en el estado y está conformado por un lente de agua dulce flotando sobre agua salada (Marín, Pacheco & Méndez, 2004), con intrusión salina reportada en la zona sur del anillo de cenotes y hacia el nororiente de la sierrita de Ticul (Perry *et al.*, 2009). El flujo hidrológico es completamente subterráneo y fundamentalmente radial que va de sur a norte, hacia las zonas de costa (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011). Una de las principales características de la hidrología de Yucatán es la presencia de cenotes, cuerpos de agua formados por disolución y colapso de la roca caliza (Gaona-Vyzcaino, Gordillo-de Anda & Villasuso-Pino,

1980). Se estima que en el estado de Yucatán existan aproximadamente entre 7000 y 8000 cenotes (Beddows *et al.*, 2007). El proceso de disolución también promueve la formación de depresiones circulares en la roca caliza dura, denominadas sartenejas o haltunes (del Maya *ha*, que significa agua, y *tun*, que significa piedra) las cuales acumulan agua de lluvia, variando su tamaño de unos cuantos centímetros hasta varios metros (De Ciudad & Acuña, 1984; Finch, 1965; Flores, 2010; Wilson, 1980). En el sur del estado donde los afloramientos son escasos y los suelos son más profundos, se forman las aguadas, también conocidas como ollas de agua, jagüeyes o aljibes, las cuales son depresiones sobre suelos no permeables, donde se acumula el agua de escurrimientos superficiales (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [Sagarpa, s.f.]. Estas pueden ser naturales o construidas por el hombre. También existen otras depresiones llamadas rejolladas, cenotes colapsados cuya base se encuentra sobre el nivel del manto freático, en las que el agua arrastra materiales superficiales que se depositan en el fondo, pero el agua no se acumula; generando microambientes con suelos más profundos y húmedos, mayor humedad relativa y temperaturas más moderadas con respecto a las áreas circundantes (Duch, 1991; Munro-Stasiuk, Manahan, Stockton & Arden, 2014).

Biología del karst en Yucatán

Bacterias y hongos inferiores

Existen pocos estudios acerca de la biodiversidad de estos grupos de microorganismos en el estado de Yucatán, su estudio puede ayudar a entender procesos ecológicos y humanos y proveer soluciones biotecnológicas para la salud, la industria y otros sectores (Rojas-Herrera, Zamudio-Maya, Arena-Ortiz, Pless & O'Connor-Sánchez, 2011). Gamboa, Heredia, Reyes & de la Rosa (2010) realizaron un estudio de la diversidad de bacterias y hongos en cenotes y la selva de Yucatán, encontrando 278 especies de bacterias y 133 de hongos microscópicos, la mayor parte de ellos no pudieron ser identificados a nivel de especie. Estrada-Medina *et al.* (2016) encontraron que en los suelos rojos dominan las acidobacterias, mientras que en los suelos negros dominan las actinobacterias, acidobacterias y proteobacterias. Bala, Murphy & Giller (2003) encontraron que las leguminosas *Calliandra calothyrsus*, *Gliricidia sepium* y *Leucaena leucocephala* de Yucatán estuvieron asociadas a un mayor número de bacterias que los individuos de las mismas especies en otras seis localidades de cinco países tropicales.

Flora

La vegetación en condiciones kársticas está restringida por la profundidad del suelo, su contenido de agua, disponibilidad de nutrientes, déficit hídrico, fracturas y porosidad de las rocas y volumen de fragmentos rocosos (Estrada-Medina *et al.*, 2010; Kang *et al.*, 2014; Luna-Flores, Estrada-Medina, Jiménez-Osornio & Pinzón-López, 2012). Las leguminosas representan la familia de plantas más diversa en el estado con 174 especies, estas plantas están bien adaptadas a las diferentes condiciones kársticas, pues se encuentran distribuidas desde la duna costera hasta las selvas bajas y medianas y en la vegetación secundaria (Flores, 2010). Los mecanismos de adaptación aún se mantienen desconocidos, pero es posible que uno de ellos sea la capacidad de las leguminosas de fijar nitrógeno, lo que les da una ventaja competitiva (Leirana-Alcocer, Hernández-Betancourt, Salinas-Peba & Guerrero-González, 2009). El huaxín (*Leucaena leucocephala*) es una de las especies de leguminosas más común en el estado de Yucatán, por su uso como especie forrajera y porque suele dominar en los primeros estados de sucesión de la vegetación. Las raíces de algunas especies han evolucionado para poder crecer a través de las fisuras de la roca e incluso solubilizándolas en búsqueda de humedad. Este es, al parecer, el caso del álamo (*Ficus cotilefonia*), una especie arbórea rupícola que se considera indicadora de cenotes, ya que se encuentra frecuentemente asociada a los cenotes y sus raíces suelen colgar de los techos de las bóvedas de estos (Flores, 2010). También es muy común encontrarla sobre las paredes y techos de casas abandonadas, construidas de piedra caliza. Del mismo modo, en las rejolladas existen especies de árboles que normalmente no se

encuentran en la vegetación circundante, pero se encuentran en otras latitudes donde la humedad es más alta, tales como el cacao (*Theobroma cacao*), la huaya (*Melicoccus bijugatus*), el mamey (*Pouteria sapota*), el mango (*Mangifera indica*); además, se pueden encontrar también helechos, musgos y selaginelas (Flores, 2010). En los cenotes se pueden encontrar especies lacustres como el carrizo (*Phragmites australis*), flotantes como la lenteja de agua (*Lemna minor*) y la flor de agua (*Nymphaea ampla*), y sumergidas como la elodea (*Egeria densa*) y la *Vallisneria americana* (Flores & Espejel, 1994).

Fauna

En cuanto a la fauna, existen organismos pertenecientes a varios grupos: peces, crustáceos, gasterópodos, anfibios y reptiles y murciélagos que se han especializado para sacar provecho de las condiciones específicas del karst. El grupo de los peces de Yucatán cuenta con componentes endémicos con características morfológicas únicas (Schmitter-Soto *et al.*, 2002), como es el caso de los peces ciegos (*Typhlias pearsei* y *Ophistemon infernale*), que son animales que han evolucionado perdiendo los ojos para adaptarse a las condiciones de poca luz de las cavernas subacuáticas (Niven, 2008). En cuanto a los crustáceos (decápodos, copépodos y cladóceros), estos se relacionan a sitios donde existe mezcla de agua dulce y salada (ambientes anquihalinos), como los que se presentan en los cenotes (Álvarez, Iliffe, Benitez, Brankovits & Villalobos, 2015). Los gasterópodos (por ejemplo, caracoles y babosas) suelen ser abundantes cerca de los cuerpos de agua intermitentes y de los suelos pedregosos (principalmente en la época de lluvias). La humedad promueve la liberación de calcio de la roca y del suelo, materia prima para construir las conchas de los caracoles (Fournié & Chétail, 1984), lo que ha sido positivamente correlacionado con su abundancia y diversidad (Hotopp, 2002; Skeldon, Vadeboncoeur, Hamburg & Blum, 2007). Bautista-Zúñiga, Delgado-Carranza & Estrada-Medina (2008) demostraron que en Yucatán la densidad de caracoles es mayor que la de lombrices de tierra. Se han contabilizado 60 especies de gasterópodos asociadas a cenotes y aguadas (Bequaert & Clench, 1936) y 46 especies terrestres (Naranjo-García, 2014). Existen 18 especies de anfibios en Yucatán, esto representa solo el 5% del total nacional (Chablé, 2010). Estas especies han evolucionado para aprovechar las aguadas y sartenejas para depositar sus huevos, como la rana nativa, *Craugastor yucatanensis* (rana ladadora yucateca) (Charruau, Cadeño-Vázquez & Köhler, 2015). Finalmente, para los murciélagos las cuevas y cenotes resultan ambientes sumamente importantes para su conservación, especialmente para especies como *Chrotopterus auritus*, *Eptesicus furinalis* y *Micronycteris microtis* (MacSwiney, Vilchis, Clarke & Racey, 2007); así mismo, MacSwiney, Clarke & Racey (2004) encontraron que la diversidad de los quirópteros se incrementa en los lugares donde hay cenotes.

Riesgos y problemas ambientales en condiciones de karst

Contaminación del acuífero

Es bien conocido que los sistemas kársticos son muy frágiles y vulnerables por sus características hidrológicas (Day, 2010; LeGrand, 1973). Incluso el entendimiento de cómo debe definirse un acuífero kárstico aún está siendo discutido (Worthington, Jeannin, Alexander, Davis & Schindel, 2017). El acuífero kárstico de Yucatán tiene un balance positivo, pues la cantidad de agua que se extrae no sobrepasa la recarga natural (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2015); el único balance hidrológico realizado a nivel estatal reporta 44 877 Mm³ de precipitación total anual, 35 902 Mm³ de evapotranspiración, recarga neta de 8975 Mm³, extracción de 547.01 Mm³ y una disponibilidad de 8427.99 Mm³ anuales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2002). Sin embargo, este volumen no considera la descarga natural comprometida, para la cual no se cuenta con un registro oficial. Tomando en cuenta esta información, se considera que el acuífero del estado de Yucatán está subexplotado (Cervantes-Martínez, 2007; INEGI, 2002). Los efectos de la extracción de agua son rápidamente dispersados, gracias a la rápida conductividad hidráulica del acuífero (González-Herrera, Sánchez-y-Pinto & Gamboa-Vargas, 2002); no obstante, la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es muy elevada, sobre todo en aquellas áreas donde el

acuífero es muy superficial o los suelos son muy someros (Escolero *et al.*, 2002; González-Herrera, Martínez-Santibañez, Pacheco-Ávila & Cabrera-Sansores, 2014; Marín *et al.*, 2000). En un trabajo más reciente, Aguilar *et al.* (2014; 2016) identifican las zonas de extrema vulnerabilidad de acuerdo con atributos de relieve, suelo y clima, destacando el anillo de cenotes y otras áreas al oriente del estado como campos de dolinas. Los suelos son un primer filtro para los contaminantes que se infiltran con la lluvia, teniendo cada tipo de suelo (dependiendo de sus características) diferentes capacidades de retención de contaminantes (Aguilar *et al.*, 2011). En áreas donde existe sascab, este podría estar también actuando como un filtro; no obstante, aún no existen estudios al respecto. Los principales contaminantes del acuífero de Yucatán provienen de la porcicultura, la avicultura, así como la nixtamalización del maíz, los residuos de fertilizantes y los pesticidas, los tiraderos a cielo abierto y las fosas sépticas (Batllori, 2016). Rendón (2016) encontró ocho diferentes plaguicidas organoclorados en el agua de cenotes de Yucatán, incluyendo Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT), un plaguicida que se supone no se usa desde los años setentas, por lo que se presume que puede ser residual. Debido a que el estado de Yucatán cuenta con un acuífero libre, cuyo flujo va hacia la costa y Golfo de México (Villasuso & Ramos, 2000). Es importante realizar un manejo adecuado de fertilizantes y plaguicidas en el interior del estado para evitar la contaminación de los ecosistemas costeros y el Golfo de México (Delgado *et al.*, 2010).

Inundaciones

Los riegos de inundaciones prolongadas en el estado de Yucatán son mínimas, pues por un lado la fracturación de la roca superficial y la alta porosidad de la roca subsuperficial permiten una rápida filtración del agua (Estrada-Medina *et al.*, 2013) y, por el otro, las altas temperaturas promedio evaporan rápidamente el agua superficial (Orellana, 1999). Las inundaciones más persistentes se presentan en las partes cercanas a la costa donde la roca caliza expuesta está poco fracturada o en el sur del estado donde existen suelos arcillosos poco permeables (Duch, 1988, 1991).

Hundimientos y colapsos

La karstificación de las rocas solubles puede ocasionar hundimientos en la superficie del terreno, manifestándose en la aparición de depresiones cerradas denominadas dolinas de subsidencia (Gutiérrez, 2004). La dureza de la roca dura superficial o coraza calcárea disminuye el riesgo de hundimientos, pero los colapsos podrían ocurrir en lugares donde esta capa de roca sea muy delgada, el acuífero este muy cercano a la superficie y la disolución exceda la neoformación de los carbonatos o, bien, el peso de los asentamientos humanos sea demasiado. Es en las zonas cercanas a la playa donde se tiene el menor espesor de la roca y la mayor cercanía al acuífero (Batllori-Sampedro, González-Piedra, Díaz-Sosa & Febles-Patrón, 2006), mientras que es en el sur del estado, con la mayor cantidad de lluvia (Orellana, 1999), donde el agua tiene mayor potencial de disolver la caliza.

Extracción de roca caliza

El uso de la caliza como material de construcción ha permitido el desarrollo de minas de extracción o bancos de materiales denominados localmente sascaberas. Las piedras se utilizan para cimientos, bardas y albarradas (muros sin mezcla), y para producir grava y arena la caliza es materia prima para la producción de cal, carbonato de calcio y cemento (Secretaría de Economía [SE], 2016). El número de bancos de materiales registrados en Yucatán es de aproximadamente 150 (Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2015). La producción de arena y grava producida en Yucatán representa el 9.4% del total nacional (INEGI, 2011). El problema con las sascaberas es que eliminan toda la vegetación y el sustrato rocoso hasta casi llegar al manto acuífero, lo que permite una entrada de contaminantes de una manera más directa al acuífero.

Conservación del karst

El karst de Yucatán es un paisaje único cuyas características lo hacen ser un ambiente de gran interés geológico, hidrológico, biológico y económico. Hasta el 2002 existían en el estado 4407 km² de áreas de karst dentro de algún esquema de protección (Kueny & Day, 2002). En 2011 se decretó la reserva estatal biocultural del Puuc, lo cual añadió 1358.48 km² de áreas en conservación (Diario Oficial del Estado de Yucatán [DOGEY], 2011), y en 2013 se decretó la reserva estatal geohidrológica del anillo de cenotes con una superficie de 2192.08 km² (DOGEY, 2013). El total de la superficie bajo algún esquema de protección asciende a 7957.56 km², lo que representa el 20.13% de la superficie estatal.

Aunado a esta política, las estrategias de conservación deben considerar como aspectos centrales la conservación de la biodiversidad y demás recursos naturales, con énfasis en el suelo y agua, a través de estrategias concretas como 1) regular la extracción de los recursos bióticos y abióticos del karst, 2) frenar el crecimiento desordenado de los asentamientos humanos y actividades productivas, 3) regular el uso de agroquímicos y el vertido de aguas residuales al suelo, cuerpos de agua y acuífero y 4) eficientizar el uso del agua en todos los sectores de la sociedad (público en general, turístico, agropecuario e industrial).

Conclusiones

El karst de Yucatán requiere estudios más profundos sobre las propiedades de la roca y la dinámica de los procesos que dieron lugar a su origen y evolución, para poder entender mejor las condiciones de este ambiente que han dado lugar a sus rasgos morfológicos característicos. El entendimiento de estos procesos permitirá realizar un manejo más sustentable de los recursos naturales, así como mejores evaluaciones de la vulnerabilidad del territorio ante eventos naturales o antropogénicos (huracanes, incendios, sequías, intrusión salina, contaminación del suelo y agua, etc.) que promuevan la conservación de este ambiente y su biodiversidad asociada.

Entre los estudios que deben ser prioritarios están la variabilidad espacial y temporal de la calidad del agua, el monitoreo de los niveles del acuífero, la identificación detallada de las rutas de las corrientes subterráneas y sus desembocaduras, las tasas de infiltración de los contaminantes normados (regulados por las normas oficiales mexicanas) y emergentes (microplásticos, hormonas, medicamentos, etc.) en el suelo y subsuelo (especialmente aquellos contenidos en las aguas residuales), los efectos de la extracción de material calcáreo, los efectos del cambio climático sobre las formas kársticas, etc.

Referencias

- Aguila, A. E. (2007). *Soil Fertility in calcareous tropical soils from Yucatan, Mexico, and villa clara, cuba, affected by land use and soil moisture effects*. Göttingen, Germany: Cuvillier Verlag Göttingen.
- Aguilar, Y., Bautista, F., & Díaz-Pereira, E. (2011). Soils as natural reactors for swine wastewater treatment. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 13(2), 199-210.
- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E. Frausto, O., & Ihl, T. (2016). Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 78(2), 51–60. doi: <https://doi.org/10.4311/2015ES0124>
- Álvarez, F., Iliffe, T. M., Benitez, S., Brankovits, D., & Villalobos, J. L. (2015). New records of anchialine fauna from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Check List, the Journal of biodiversity data*, 11(1), 1-10. doi: <http://dx.DOI.org/10.15560/11.1.1505>
- Bala, A., Murphy, P., & Giller, K. E. (2003). Distribution and diversity of rhizobia nodulating agroforestry legumes in soils from three continents in the tropics. *Molecular Ecology*, 12(4), 917-929. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1365-294X.2003.01754.x>

- Batllore, S. E. (2016). Condiciones actuales del agua subterránea en la península de Yucatán. En: G. M. Chávez (Ed.). *Manejo del agua a través del tiempo en la península de Yucatán* (pp. 201-261). Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán- Centro de Investigaciones Regionales Dr. Hideyo Noguchi- Unidad de Ciencias Sociales- Fundación Gonzalo Río Arronte IAP- Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán.
- Batllore-Sampedro, E., González-Piedra, J. I., Díaz-Sosa, J., & Febles-Patrón, J. L. (2006). Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas*, 59, 74-92.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B. R. N., Charvet, G., Marín, L. E., Rebolledo-Vieyra, M. & Merediz-Alonso, G. (2011). Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 19(3), 507–524. doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0699-5>
- 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., Palacio-Aponte, 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(3-4), 308-321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.02.014>
- Bautista-Zúñiga, F., Delgado-Carranza, C., & Estrada-Medina, H. (2008) Effect of legume mulches and cover crops on earthworms and snails. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 8(1), 45-60.
- Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A., & Lozano, R. (2003). Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Terra Latinoamericana*, 21(1), 1-11.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., & Torres-Talamante, O. (2007). Los cenotes de la península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, 83, 32-35.
- Bequaert, J., & Clench, W. J. (1936). A second contribution to the molluscan fauna of Yucatan. *Carnegie Institution Washington Publication*, 457, 61–75.
- Best, J. L., Fielding, C. R., Jarvis, I., & Mozley, P. (2009). Sedimentology: Millenium Reviews. *The Journal of the International Association of Sedimentologists*. NJ. USA: John Wiley & Sons.
- Bharatdwaj, K. (2006). *Physical geography. Hydrosphere*. New Delhi: Discovery Publishing House.
- Boggs, S. (2006). *Principles of sedimentology and stratigraphy*. N.J. USA: Prentice Hall.
- Bonet, F., & Butterlin, J. (1977). Reconocimiento Geológico de la Península de Yucatán. En: F. Luna Kan (Ed.). *Enciclopedia Yucatanense: Mérida*. Ciudad de México: Gobierno del estado de Yucatán.
- Bosák, P. (2008). Karst processes and time. *Geologos*, 14(1), 19–36.
- Butler, J. N. (1991). *Carbon dioxide equilibria and their applications*. Michigan, USA: CRC Press.
- Cabadas, H. V., Solleiro, E., Sedov, S., Pi, T., & Alcalá, J. R. (2010). The complex genesis of red soils in Peninsula de Yucatan, Mexico: Mineralogical, micromorphological and geochemical proxies. *Eurasian Soil Science*, 43(13), 1439-1457. doi: <https://doi.org/10.1134/S1064229310130041>
- Ćalić, J. (2007). Karst research in Serbia before the time of Jovan Cvijić. *Acta carsologica*, 36(2), 315-319.
- Ćalić, J. (2011). Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. *Geomorphology*, 134(1-2), 32-42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.029>
- Cervantes-Martínez, A. (2007). El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatán. *Teoría y Praxis*, 3, 143-152.
- Chablé, S. J. (2010). Anfíbios. En: R. Durán, & M. Méndez (Eds.). *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (pp. 258-259). Mérida: Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)- Programa de Pequeñas Donaciones del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (PPD-FMAM)- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio)- Secretaría de Desarrollo Humano y Medio Ambiente (Seduma).

- Charrau, P., Cedeño-Vázquez, J. R., & Köhler, G. (2015). Amphibians and reptiles. En: G. A. Islebe, S. Calmé, J. L. León-Cortés, & B. Schmook (Eds.). *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula* (pp. 257-293). México: Springer.
- De Ciudad, R. A., & Acuña, R. (1984). *Calepino Maya de Motul. México*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Connors, M., Hildebrand, A. R., Pilkington, M., Ortiz-Aleman, C., Chavez, R. E., Urrutia-Fucugauchi, J., Graniel-Castro, E., Camara-Zi, A., Vasquez, J., & Halpenny, J. F. (1996). Yucatan karst features and the size of Chicxulub crater. *Geophysical Journal International*, 127(3), F11-F14. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb04066.x>
- Das, R., Evan, A., & Lawrence, D. (2013). Contributions of long-distance dust transport to atmospheric P inputs in the Yucatan Peninsula. *Global Biogeochemical Cycles*, 27(1), 167-175. doi: <https://doi.org/10.1029/2012GB004420>
- Day, M. (2010). Challenges to sustainability in the Caribbean karst. *Geologia Croatica*, 63(2), 149-154. doi: <https://doi.org/10.4154/gc.2010.12>
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R., & Bautista, F. (2010). Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: the case of Yucatan, Mexico. *Agricultural Water Management*, 97(10), 1423-1433. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.006>
- Delgado-Carranza, C., Bautista-Zúñiga, F., Calvo-Irabien, L. M., Aguilar-Duarte, Y. G., & Martínez-Tellez, J. G. (2017). El carbono orgánico en Leptosols con distribución discontinua en la península de Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(10), 31-33. doi: <http://dx.doi.org/10.19136/era.a4n10.688>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (4 de enero de 2018). *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018
- Diario Oficial del Estado de Yucatán (DOGEY). (1 de noviembre de 2011). *Decreto que establece el área natural protegida denominada reserva estatal biocultural del Puuc*. Gobierno del estado de Yucatán. Recuperado de <http://sds.yucatan.gob.mx/archivos/marco-juridico-publicaciones-oficiales/archivos/201111011591.pdf>
- Diario Oficial del Estado de Yucatán (DOGEY). (28 de octubre de 2013). *Decreto que establece el área protegida denominada reserva estatal geohidrológica del anillo de cenotes*. Gobierno del estado de Yucatán. Recuperado de https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/sistema_nacional/documentos/ANPL/Yuc/1-Dec-RESERV-ANILLO-CENOTES.pdf
- Duch, G. J. (1988). *La conformación territorial del estado de Yucatán: los componentes del medio físico*. Estado de México, México: Centro Regional de la Península de Yucatán- Universidad Autónoma de Chapingo.
- Duch, G. J. (1991). *Fisiografía del estado de Yucatán: su relación con la agricultura*. México: Universidad Autónoma de Chapingo.
- Escolero, O. A., Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, A. J., Cabrera, S. A., & Alcocer, J. (2002). Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: the Merida Yucatan, Mexico case study. *Water Resources Management*, 16(5), 351-367. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1021967909293>
- Espinosa, L., Cerón, M., & Sulub, Y. A. (1998). Limestone rocks of the Yucatan peninsula. Description of the lithology and physical properties based on the results of exploration, investigation and laboratory tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(4-5), 410-411.
- Estrada-Medina, H., Canto-Canché, B. B., De los Santos-Briones, C., & O'Connor-Sánchez, A. (2016) Yucatán in black and red: Linking edaphic analysis and pyrosequencing-based assessment of bacterial and fungal community structures in the two main kinds of soil of Yucatán State. *Microbiological Research*, 188-189, 23-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.04.007>
- Estrada-Medina, H., Graham, R. C., Allen, M. F., Jiménez-Osornio, J. J., & Robles-Casolco, S. (2013). The importance of limestone bedrock and dissolution karst features on tree root distribution in northern Yucatán, México. *Plant and soil*, 362(1-2), 37-50. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1175-x>

- Estrada-Medina, H., Tuttle, W., Graham, R. C., Allen, M. F., & Jiménez-Osornio, J. J. (2010). Identification of underground karst features using Ground-Penetrating Radar (GPR) in northern Yucatan, Mexico. *Vadose Zone Journal*, 9(3), 653–661. doi: <https://doi.org/10.2136/vzj2009.0116>
- Estrada-Medina, H., Zanatta, A., Valdez A., & Casolco, S. R. (2008). Evaluación de las propiedades mecánicas de las rocas calizas de Yucatán: Su importancia en el crecimiento radicular. *Journal de Investigación de la escuela de graduados e innovación Tec de Monterrey Campus Puebla*, (julio, 2008).
- Finch, W. A. (1965). *The karst landscape of Yucatan*. Washington, USA: Clearinghouse.
- Flores, J. S., & Espejel, C. I. (1994). *Etnoflora Yucatanense. Tipos de vegetación de la Península de Yucatán*. México: Universidad Autónoma de Yucatán, Sostenibilidad Maya.
- Flores, J. S. (2010). Vegetación de cenotes, rejolladas, haltunes y cavernas. En: R. Durán, & M. Méndez. (Eds.). *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (p.143). C Mérida: Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)- Programa de Pequeñas Donaciones del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (PPD-FMAM)- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio)- Secretaría de Desarrollo Humano y Medio Ambiente (Seduma).
- Ford, D., Palmer, A., & White, W. (1988). Landform Development; Karst. En: W. Back, J. S. Rosenshein, & P. R. Seaber. (Eds.). *Hydrogeology (The Geology of North America, Volume O-2)* (p. 576). Colorado, USA: Geological Society of America.
- Ford, D., & Williams, P. (2007). *Karst Hydrology and Geomorphology*. England: Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Fournié, J., & Chetail, M. (1984) Calcium Dynamics in Land Gastropods. *American Zoologist*, 24(4), 857-870. doi: <https://doi.org/10.1093/icb/24.4.857>
- Gamboa, A. M. M., Heredia, A. G., Reyes, E. M., & de la Rosa, G. S. (2010). Bacterias y hongos microscópicos. En: R. Durán, & M. Méndez. (Eds.). *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (pp.168-169). C Mérida: Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)- Programa de Pequeñas Donaciones del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (PPD-FMAM)- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio)- Secretaría de Desarrollo Humano y Medio Ambiente (Seduma).
- Gams, I. (1993). Origin of the term “karst”, and the transformation of the classical karst (kras). *Environmental Geology*, 21(3), 110-114. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00775293>
- Gaona-Vizcayno, S., Gordillo-de Anda, T., & Villasuso-Pino, M. (1980). Cenotes, karst característico: Mecanismo de formación. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 4(1), 32-36.
- Gerstenhauer, A. (1972). Der Einfluss des CO₂-Gehaltes der Bodenluft auf die KalklSsung. *Erdkunde*, 26, 116-120.
- González-Herrera, R., Martínez-Santibañez, E., Pacheco-Avila, J., & Cabrera-Sansores, A. (2014). Leaching and dilution of fertilizers in the Yucatan karstic aquifer. *Environmental Earth Sciences*, 72(8), 2879-2886.
- González-Herrera, R., Sánchez-y-Pinto, I., & Gamboa-Vargas, J. (2002). Groundwater-flow modeling in the Yucatan karstic aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 10(5), 539-552. doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0216-6>
- Gunn, J. (2004). *Encyclopedia of caves and karst science*. NY, USA: Taylor & Francis Group.
- Gutiérrez, F. (2004). El riesgo de dolinas de subsidencia en terrenos evaporíticos. Investigación y mitigación. En: S. Nisio, S. Panetta, & L. Vita (Eds.). *Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio* (pp.367-378). Roma, Italia: Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (APAT).
- Gutiérrez, R. (2008). Compilation and Production of a Karst map of Mexico. *American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts*. #H21D-0854. California, EU.
- Halliday, W. R. (2007). Pseudokarst in the 21st century. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69(1), 103–113.
- Herrera Silveira, J. A., Camacho Rico, A., Pech, E., Pech, M., Ramírez Ramírez, J., & Teutli Hernández, C. (2016). Dinámica del carbono (almacenes y flujos) en manglares de México. *Terra Latinoamericana*, 34(1), 61-72.

- Hollingsworth, E. (2009). *Karst Regions of the World (KROW)—Populating global karst datasets and generating maps to advance the understanding of Karst occurrence and protection of karst species and Habitats worldwide* (Tesis de Maestría). University of Arkansas, USA.
- Hotopp, K. P. (2002). Land snails and soil calcium in central Appalachian mountain forest. *Southeastern Naturalist*, 1(1), 27-44. doi: [https://doi.org/10.1656/1528-7092\(2002\)001\[0027:LSASCI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1656/1528-7092(2002)001[0027:LSASCI]2.0.CO;2)
- Hsu, K. J. (1963). Solubility of dolomite and composition of Florida ground waters. *Journal of Hydrology*, 1(4), 288-310. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(63\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(63)90020-9)
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2002). *Estudio hidrológico del estado de Yucatán*. México. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224165/702825224165.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2011). *La industria minera ampliada. Censos económicos 2009*. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/CE_2014/702825089214.pdf.
- Isphording, W. C. (1973). Discussion of the occurrence and origin of sedimentary palygorskite-sepiolite deposits. *Clays and Clay Minerals*, 21(5), 391-401. doi: <https://doi.org/10.1346/CCMN.1973.0210515>
- Isphording, W. C. (1976). Weathering of Yucatan Limestones: The Genesis of Terra Rosas. En: A. E. Weidie, & W. C. Ward (Eds.). *Carbonate Rocks and Hydrogeology of the Yucatan Peninsula, Mexico* (pp.259-274). New Orleans, USA: Geological Society- American Association of Petroleum Geologists (AAPG)- Society for Sedimentary Geology (SEPM).
- Jennings, J. N. (1971). *Karst. An introduction to systematic geomorphology*. Inglaterra: MIT Press Classic
- Jennings, J. N. (1985). *Karst geomorphology*. New York: Blackwell Inc.
- Kang, M., Tao, J., Wang, J., Ren, C., Qi, Q., Xiang, Q. Y., & Huang, H. (2014). Adaptive and nonadaptive genome size evolution in Karst endemic flora of China. *New Phytologist*, 202(4), 1371-1381. doi: <https://doi.org/10.1111/nph.12726>
- Klimchouk, A. & Ford, D. (2000). Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. En: A. B. Klimchouk, D. C. Ford, A. N. Palmer, & W. Dreybrodt (Eds.). *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers* (pp.45-53). Alabama, USA: National Speleological Society Huntsville.
- Kogel, J. E., Trivedi, N. C., Barker, J. M., & Krukowski, S. T. (2006). *Industrial minerals & rocks: Commodities, markets, and uses*. CO, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M. C., Ahrens, R. J., Cruz-Gaistardo, C. O., Sedov, S., & Solleiro-Rebolledo, E. (2013). *The soils of Mexico*. Netherlands: Springer.
- Kueny, J. A., & Day, M. J. (2002). Designation of protected karstlands in Central America: a regional assessment. *Journal of Cave and Karst Studies*, 64(3), 165-174.
- Landa, J. F. (2007). *Caracterización del residuo silicatado de las calizas como material parental de los suelos de la Península de Yucatán* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Leeder, M. R. (1982). *Sedimentology: Process and Product*. London: Springer.
- Lefticariu, M., Perry, E. C., Ward, W. C., & Lefticariu, L. (2006). Post-Chicxulub depositional and diagenetic history of the northwestern Yucatan Peninsula, Mexico. *Sedimentary Geology*, 183(1-2), 51-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.09.008>
- LeGrand, H. E. (1973). Hydrological and ecological problems of karst regions. *Science*, 176(4076), 859-864. doi: <https://doi.org/10.1126/science.179.4076.859>
- Leirana-Alcocer, J. L., Hernández-Betancourt, S., Salinas-Peba, L., & Guerrero-González, L. (2009). Cambios en la estructura y composición de la vegetación relacionados con los años de abandono de tierras agropecuarias en la selva baja caducifolia espinosa de la reserva de Dzilám: Yucatán. *Polibotánica*, 27, 53-70.

- Lesser, J. M., & Weidie, A. E. (1988). Region 25, Yucatan Peninsula, Hydrogeology. *The Geological Society of North America*, 2, 237-241. doi: <https://doi.org/10.1130/DNAG-GNA-O2.237>
- Littmann, E. R. (1958). Ancient Mesoamerican Mortars, Plasters, and Stuccos: The composition and origin of sascab. *American Antiquity*, 24(2), 172-176. doi: <https://doi.org/10.2307/277478>
- Lugo, J., & García, M. (1999). El relieve de la Península de Yucatán. En: P. A. Ponce Chico de León, A. Alonzo Aguilar, A. García de Fuentes, J. J. M. Jiménez Osornio, R. Orellano Lanza, & E. Urzaiz Lares (Coords.). *Atlas de procesos territoriales de Yucatán* (388 p.). Yucatán, México: Facultad de Arquitectura, Mérida, Universidad Autónoma de Yucatán.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J. F., & Espinasa-Pereña, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 10(2), 143-150.
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J., & Pinzón-López, L. L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 343-353.
- MacSwiney, C. M. G., Clarke, F. D., & Racey, P. A. (Septiembre, 2004). *The importance of cenotes in structuring bat communities in Yucatán, México*. Presentado en Trans-KARST 2004, Proceedings of the International Transdisciplinary Conference on Development and Conservation of Karst Regions. Hanoi, Vietnam. Recuperado de https://mafiadoc.com/trans-karst-2004_59c638061723dd800ec2a5c2.html
- MacSwiney, G. M. C., Vilchis, P., Clarke, F. M., & Racey, P. A. (2007). The importance of cenotes in conserving bat assemblages in the Yucatan, Mexico. *Biological Conservation*, 136(4), 499-509. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.12.021>
- Marín, S. L. E., Pacheco, A. J. G., & Méndez, R. R. (2004). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En: B. Jiménez, & L. Marín (Eds.). *El agua en México, vista desde la academia* (pp. 159-176). México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Marín, L. E., Perry, E. C., Essaid, H. I., & Steinich, B. (2001). Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico. En: A. H. D. Cheng, & D. Ouazar (Eds.). *Coastal Aquifers, Management-Monitoring, Modeling, and Case Studies* (pp. 257-274). Florida, USA: Lewis Publishers.
- Marín, L. E., Steinich, B., Pacheco, J., & Escolero, O. A. (2000). Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer, Mérida, Yucatán, Mexico. *Geofísica Internacional*, 39(4), 359-365.
- Morse, J. W., & Mackenzie, F. T. (1990). *Geochemistry of sedimentary carbonates*. Amsterdam: Elsevier.
- Munro-Stasiuk, M. J., Manahan, T. K., Stockton, T., & Ardren, T. (2014). Spatial and physical characteristics of rejolladas in northern Yucatán, Mexico: implications for ancient Maya agriculture and settlement patterns. *Geoarchaeology*, 29(2), 156-172. doi: <https://doi.org/10.1002/gea.21468>
- Naranjo-García, E. (2014). Biodiversidad de moluscos terrestres en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(Supplement 1), 431-440. doi: <https://doi.org/10.7550/rmb.40089>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2003). NASA visible Earh: Relief Map, Yucatan Peninsula, Mexico. Recuperado el 05/05/2017, de <https://visibleearth.nasa.gov/images/3267/relief-map-yucatan-peninsula-mexico>.
- Niven, J. E. (2008). Evolution: convergent eye losses in fishy circumstances. *Current Biology*, 18(1), R27-R29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.020>
- Orellana, R. (1999). Evaluación climática. En: P. A. Ponce Chico de León, A. Alonzo Aguilar, A. García de Fuentes, J. J. M. Jiménez Osornio, R. Orellano Lanza, & E. Urzaiz Lares (Coords.). *Atlas de procesos territoriales de Yucatán*. Yucatán, México: Facultad de Arquitectura, Mérida, Universidad Autónoma de Yucatán.
- Pacheco, M. J. I., & Alonzo, S. L. A. (2003). Caracterización del material calizo de la formación Carrillo Puerto en Yucatán. *Ingeniería*, 7(1), 7-19.
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., & Marín, L. (2002). The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review*, 44(3), 191-221. doi: <https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.3.191>

- Perry, E., Marin, L., McClain, J., & Velazquez, G. (1995). Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: Its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater. *Geology*, 23(1), 17-20. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0017:ROCSNY>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0017:ROCSNY>2.3.CO;2)
- Perry, E., Velazquez-Oliman, G., & Socki, R. A. (2003). Hydrogeology of the Yucatán Peninsula. En: A. Gómez-Pompa, M. F. Allen, S. L. Fedick, & J. J. Jiménez-Osornio (Eds.). *The Lowland Maya area: Three millennia at the human-wildland interface*. NY, USA: Food Products Press.
- Perry, E., Swift, J., Gamboa, J., Reeve, A., Sanborn, R., Marín, L., & Villasuso, M. (1989). Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatan, Mexico. *Geology*, 17(9), 818-821. doi: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0818:GAEAO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0818:GAEAO>2.3.CO;2)
- Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B., & Velazquez-Oliman, G. (2009). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: constraints on stratigraphy and hydrogeology. *Journal of Hydrology*, 367(1-2), 27-40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.026>
- Plummer, L. N., Wigley, T. M. L., & Parkhurst, D. L. (1978). The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5 to 60 °C and 0.0 to 1.0 atm CO₂. *American Journal of Science*, 278(2), 179–216.
- Pytkowicz, R. M. (1969). Chemical Solution of Calcium carbonate in sea water. *American Zoologist*, 9(3), 673–679. doi: <https://doi.org/10.1093/ich/9.3.673>
- Quiñones, H., & Allende, R. (1974). Formation of the lithified carapace of calcareous nature which covers most of the Yucatan peninsula and its relation to the soils of the region (Mexico). *Tropical Agriculture*, 51, 94–107.
- Rendón, J. (2016). Estudio cenotes península de Yucatán. En Greenpeace, *Contaminación de cenotes con plaguicidas en la Península de Yucatán*. Recuperado de http://m.greenpeace.org/mexico/Global/mexico/Docs/2016/oceanos/Informe-cenotes_GP_final.pdf
- Rojas-Herrera, R., Zamudio-Maya, M., Arena-Ortíz, L., Pless, R. C., & O'Connor-Sánchez, A. (2011). Microbial diversity, metagenomics and the Yucatán aquifer. *International Journal of Experimental Botany*, 80, 231-240.
- Sánchez del Río, M. S., Suárez, B. M., & García-Romero, E. (2009). The occurrence of palygorskite in the Yucatán peninsula: Ethno-historic and archaeological contexts. *Archaeometry*, 51(2), 214-230. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2008.00398.x>
- Sanders, E. M. (1921). The cycle of erosion in a karst region (after Cvijic). *Geographical review*, 11(4), 593-604.
- Scheffers, A. M., May, S. M., & Kelletat, D. H. (2015). Karst Landscapes: Topographies Sculptured by Dissolution of Rock. En: *Landforms of the World with Google Earth* (pp.147-161). Dordrecht, Holanda: Springer.
- Schmitter-Soto, J. J., Comín, F. A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L. E., & Steinich, B. (2002). Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, 467(1-3), 215–228. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1014923217206>
- Scoffin, T. P. (1987). *An introduction to carbonate sediments and rocks*. New York: Chapman and Hall.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa). *Ollas de Agua, Jagüeyes, Cajas de Agua o Aljibes* (s.f.). Recuperado de <http://www.campopotosino.gob.mx/index.php/biblioteca-digital/category/240-archivos?download=3907:ollas-de-agua>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2015). *Inventario de bancos de materiales*. Yucatán, México: Subsecretaría de infraestructura. Recuperado el 07/10/2019 de http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Banco_de_Materiales_2015/MEX-INBM2015.pdf
- Secretaría de Economía (SE). (2016). *Perfil de mercado de la caliza. México: Coordinación general de minería*. Recuperado el 07/10/2019 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/5566/pm_caliza_2014.pdf
- Sjoberg, E. L., & Rickard, D. T. (1984). Calcite dissolution kinetics: surface speciation and the origin of the variable pH dependence. *Chemical Geology*, 42(1-4), 119-136. doi: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(84\)90009-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(84)90009-3)

- Skeldon, M. A., Vadeboncoeur, M. A., Hamburg, S. P., & Blum, J. D. (2007). Terrestrial gastropod responses to an ecosystem-level calcium manipulation in a northern hardwood forest. *Canadian Journal of Zoology*, 85(9), 994-1007. doi: <https://doi.org/10.1139/Z07-084>
- Solleiro-Rebolledo, E., & Cabadas, H. (2011). Soil genesis in karstic environments of Yucatan: the use of mineralogical and geochemical indicators. En: International Union of Soil Science. *Landscapes & Soils through Time* (pp. 22-23). Stuttgart, Alemania: Hohenheim University.
- Steinich, B., & Marín, L. E. (1997). Determination of flow characteristics in the aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatan, Mexico. *Journal of Hydrology*, 191(1-4), 315-331. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03038-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03038-7)
- Stoessell, R. K., Moore, Y. H., & Coke, J. G. (1993). The occurrence and effect of sulfate reduction and sulfide oxidation on coastal limestone dissolution in Yucatan cenotes. *Groundwater*, 31(4), 566-575. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00589.x>
- Villasuso, M., & Ramos, R. M. (2000). A conceptual model of the aquifer of the Yucatan Peninsula, Research report-international institute for applied systems analysis. En: W. Lutz, L. Prieto, & W. Sanderson (Eds.). *Population, Development and Environment on the Yucatán Peninsula: From ancient maya to 2030*. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.
- Williams, P. (2008). *World Heritage Caves and Karst: A Thematic Study: A global review of karst World Heritage properties: present situation, future prospects and management requirements*. Suiza: World Commission on protected Areas (WCPA)-International Union for Conservation of Nature (IUCN).
- Williams, P., & Fong, Y. T. (2010). *World map of carbonate rock outcrops* v3. 0. Auckland University, New Zealand.
- Wilson, E. M. (1980). *Physical geography of the Yucatán peninsula*. En: E. H. Moseley, & E. D. Terry (Eds.). *Yucatán: a world apart*. Alabama, USA: The University of Alabama Press.
- Worthington, S. R., Jeannin, P. Y., Alexander, E. C., Davies, G. J., & Schindel, G. M. (2017). Contrasting definitions for the term 'karst aquifer'. *Hydrogeology Journal*, 25(5), 1237-1240. doi: <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1628-7>
- Wray, R. A. L. (1997). Quartzite dissolution: karst or pseudokarst. *Cave and Karst Science*, 24(2), 81-86.