

RASGOS GEOMORFOLÓGICOS MAYORES DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

José Lugo-Hubp*
José Fernando Aceves-Quesada y*
Ramón Espinasa-Pereña*

RESUMEN

El análisis de 165 mapas topográficos de escala 1:50,000, que cubren la península de Yucatán, permitió la elaboración de seis mapas en escala muy pequeña, a saber: 1—morfoisohipsas, 2—alturas máximas, 3—amplitud del relieve, 4—geomorfología general, 5—formas cársticas y 6—lineamientos. La península consiste en dos unidades principales; la septentrional, del Cuaternario, muy joven, con planicies de menos de 50 m s.n.m.; la meridional, más antigua, con relieve y desarrollo de un karst que inicia su formación en el Mioceno y continúa en la actualidad, de lo que resultan planicies y lomeríos de hasta 400 m s.n.m. En ambas, la morfología está controlada por la estructura geológica profunda y el tiempo de formación del relieve. Los lineamientos hacia el interior de la península predominan en dirección NE, con sus correspondientes al NW; hacia la costa oriental son paralelos a ésta (NE y NNE). La zona de mayor concentración de dolinas se observa en la parte septentrional, y se considera debida a fracturas provocadas por domos salinos profundos. Por su desarrollo, las formas cársticas de la superficie y el subsuelo corresponden a distintas etapas, cuaternarias y precuaternarias, en lo que han influido la neotectónica y las oscilaciones del nivel del mar por las glaciaciones.

Palabras clave: geomorfología, karst, Yucatán, México.

ABSTRACT

The detailed analysis of 165 topographical maps at a scale of 1:50,000, which cover the Yucatán Peninsula, allowed the elaboration of the following six maps, at a very small scale: 1—morphoisohypsas, 2—maximum heights, 3—relief amplitude, 4—general geomorphology, 5—karst landforms, and 6—lineaments. The peninsula consists of two main units; the northern, late Quaternary in age, with plains of at least 50 m a.s.l., and the southern, older, with karst and relief that began its development during the Miocene and continues today, with plains and hills that reach up to 400 m above sea level. On both, the morphology is controlled by the deep geologic structure and the time elapsed since the formation of the relief. Lineaments within the peninsula follow a NE direction, with corresponding lineaments to the NW. Towards the eastern portion they are parallel to the coastline (NE and NNE). The largest concentration of dolinas is in the northern portion, and it is considered due to fractures caused by deep evaporite diapirs. Superficial and subsurface karst forms were formed at different stages, during the Quaternary or even pre-Quaternary times, and have been influenced by neotectonics and glaciation-related sea level oscillations.

Key words: geomorphology, karst, Yucatán, Mexico.

INTRODUCCIÓN

El tema sobre el relieve de la península de Yucatán, incluyendo el conjunto de las formas de origen cárstico que dominan en el paisaje de la misma, ha sido escasamente tratado. Por esta razón, los autores de este estudio proporcionan una información variada en una escala pequeña.

La región estudiada, situada en el extremo oriental de la República Mexicana (Figura 1), consiste, desde el punto de vista geológico, en una plataforma con potentes estratos, principalmente de rocas carbonatadas. En la superficie, éstas son reconocidas en una clara secuencia que va desde el Paleógeno hasta el Cuaternario (Figura 2).

Desde otro punto de vista y de acuerdo con diversos autores (cf. Raisz, 1959), se trata de una provincia fisiográfica. La topografía tiene poco contraste en altitud, resultando así singular dentro del contexto nacional. Carece de una red fluvial. El escurrimiento es casi totalmente subterráneo, lo que ha dado origen a un gran sistema de formas cársticas, que incluye los cenotes, poljés y sistemas de cuevas, con incluso cientos de metros de profundidad y decenas de kilómetros de longitud.

Lo anterior tiene estrecha relación con el clima y la actividad tectónica del período Cuaternario. En el primer caso, la alternancia de las épocas de glaciación y deshielo corresponde a descensos y ascensos del nivel del mar, respectivamente, lo que es mejor conocido para la última glaciación que culminó hace aproximadamente 18,000 años.

La precipitación pluvial media anual (Vidal-Zepeda, 1989) varía, desde menos de 125 mm en el extremo occidental de la península, hasta más de 1,500 mm en la costa opuesta, incluyendo a la isla Cozumel. En la mayor parte de la superficie, el valor va de 800-1,200 mm.

La actividad neotectónica vuelve evidente la constitución geológica de la península. Las rocas sedimentarias marinas terciarias atestiguan un levantamiento gradual, por lo menos desde el Oligoceno. La porción septentrional de la zona estudiada es una superficie nivelada de poca altitud, elevada sobre el nivel del mar seguramente en el Cuaternario. Por lo mismo, ha estado sujeta a transgresiones y regresiones. El final del Pleistoceno significó un ascenso del nivel del mar, de 130 m según Emery (1977), que cubrió grandes extensiones de tierras emergidas de la Florida y Yucatán. La plataforma continental excepcionalmente ancha—más de 180 km al occidente de Yucatán—es una evidencia de lo expuesto.

*Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F.

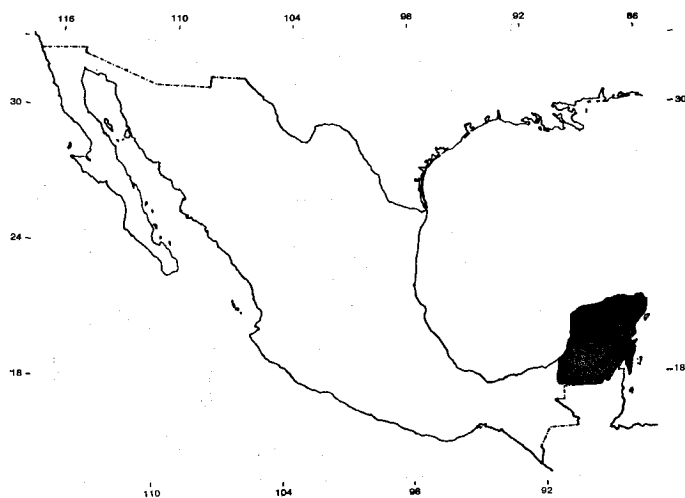


Figura 1.- Localización de la zona estudiada (en negro) en la República Mexicana.

Lo anterior es de importancia, porque la evolución del relieve, especialmente del *karst* de la península, está relacionada con la neotectónica y las glaciaciones. Los mapas topográficos en escala pequeña que cubren el territorio nacional, con curvas de nivel sucesivas de 100, 200 ó 500 m, representan con fidelidad el relieve montañoso dominante del país, pero resultan pobres para la península de Yucatán. Por ello, se realizó el análisis del relieve con todos los mapas topográficos de escala 1:50,000 que cubren la península (Figura 3), con el objetivo de obtener una información más amplia sobre el relieve, por medio de diversos métodos cartográficos geomorfológicos.

GEOLOGÍA

Los estudios geológicos más detallados de la península de Yucatán son los de Butterlin (1958), Bonet (1963) y López-Ramos (1975).

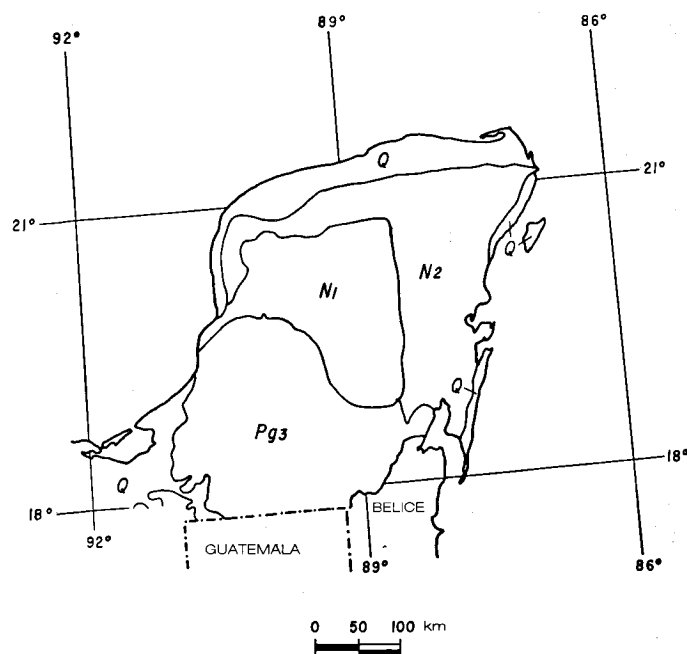


Figura 2.- Geología de la península de Yucatán (tomado de López-Ramos, 1975). Q—Cuaternario; N2—Neógeno superior; N1—Neógeno inferior; Pg3—Paleógeno superior; Oligoceno.

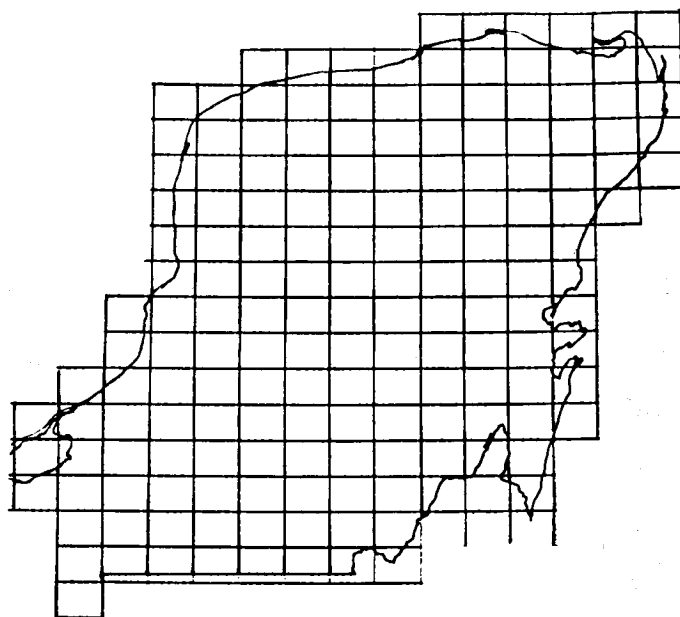


Figura 3.- La zona estudiada dividida en superficies que corresponden a los mapas de escala 1:50,000 que la cubren.

La plataforma de rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas presenta un grosor de incluso más de 3,500 m, descansando sobre un basamento paleozoico. Encima de éste se inicia la columna con rocas jurásicas, reconocidas en el subsuelo profundo de la porción centroseptentrional de Belice (López-Ramos, 1975). El Cretácico forma parte de toda la plataforma, en especial con la formación llamada Evaporitas Yucatán (López-Ramos, *op. cit.*), para la cual el mismo autor elaboró los mapas estructural y de isopacas (Figura 4).

El espesor de las Evaporitas Yucatán demuestra que éstas tuvieron su origen en dos cuencas principales. La primera, en el sur de la península y con extensión hacia Guatemala, donde el grosor de más de 2,000 m refleja un prolongado hundimiento—subsistencia—que se reduce gradualmente hacia el norte, siendo el espesor de unos 1,000 m hacia el centro de la península y menor que 500 m en el oriente de la misma. Las isopacas indican un hundimiento más intenso—basculamiento—de sur a norte en la parte sudoccidental y otro en sentido nororiental en la otra región de la península.

La secuencia de rocas paleogénicas se encuentra en todo el subsuelo y consiste principalmente en caliza, arenisca y evaporita (López-Ramos, *op. cit.*) del Paleoceno y Eoceno. El Oligoceno está ausente, excepto en la parte nororiental (caliza y lutita), donde se reconoce a los depósitos marinos del Neógeno y las calizas de la Formación Carrillo Puerto. Durante el Mioceno, fueron depositados los sedimentos calcáreos de la Formación Río Dulce, en el oriente (Estado de Quintana Roo).

En las zonas de relieve más alto, las capas cretácicas están a menor profundidad—500 m—lo mismo que en la planicie nororiental. En las zonas interiores continentales, estos valores aumentan a 1,000-1,500 m. Es muy probable que estas irregularidades sean producto de la configuración de los bloques del basamento, de acuerdo con López-Ramos (1975).

La península de Yucatán muestra dos unidades morfológicas principales: la primera está ubicada en el norte, y en ella predominan las planicies y las rocas sedimentarias neogénicas; en el sur, las planicies alternan con lomeríos de hasta 400 m s.n.m. en rocas sedimentarias oligocénicas. Esta configuración expresa un levantamiento a partir del Mioceno en la porción

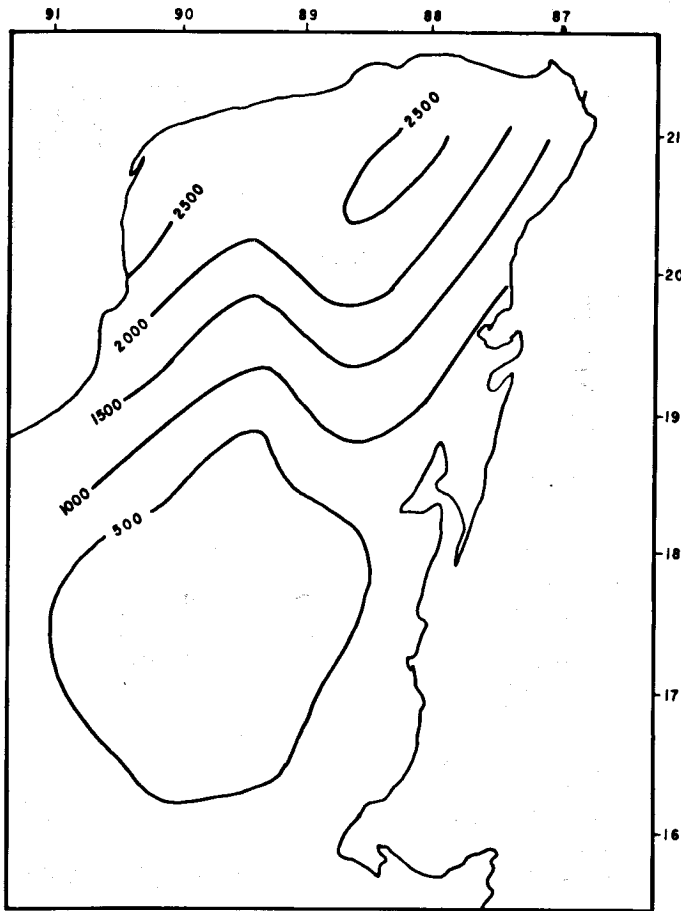


Figura 4.- Profundidad—en metros—del techo de la Formación Evaporitas Yucatán (tomado de López-Ramos, 1975).

meridional, mismo que continúa en el Plioceno y en el Cuaternario en dirección al NE. Lo anterior permite suponer que el levantamiento de mayor duración en la parte meridional esté afectado en mayor grado por una erosión diferencial que origina un relieve de lomas y planicies; mientras que en el norte se produce un relieve muy joven de planicies basculadas y, por su constitución de rocas muy resistentes, una disección en el subsuelo, controlada por la fractura de las rocas, resultando un sistema completo de formas cársticas.

La estructura general del relieve de la península tiene una relación estrecha con la estructura geológica profunda, aparentemente constituida en dos grandes bloques. Lo anterior se pretende demostrar con la elaboración de una serie de mapas morfométricos que refleja lo anteriormente expuesto.

El estudio del relieve se hizo desde los puntos de vista morfométrico y morfológico. Para contar con una información topográfica más completa, fueron tomados datos de los 165 mapas de escala 1:50,000 que cubren la península (Figura 3), los cuales permitieron elaborar mapas temáticos geomorfológicos.

CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS

Con el fin de reconocer la relación posible entre el relieve y la estructura geológica, se elaboró el mapa de morfoisohipsas, para lo cual se hizo un mapa topográfico de escala 1:2'000,000, con curvas de nivel sucesivas de 10, 20, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 m. Posteriormente, se simplificó el trazo de las curvas de nivel, eliminando los contornos irregulares producidos por la

erosión de la superficie, de tal manera que las curvas reflejaran principalmente la estructura geológica (Figura 5). De acuerdo con Aristarkhova y colaboradoras (1970), éstos son los mapas de morfoisohipsas.

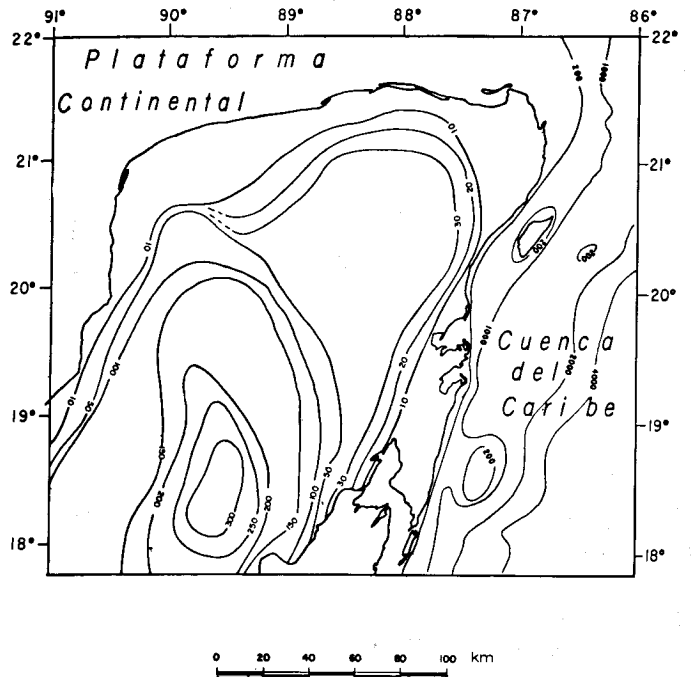


Figura 5.- Mapa de morfoisohipsas. Las isohipsas representan una generalización de las curvas de nivel. El mapa se elaboró con base en los mapas topográficos del INEGI de escala 1:50,000.

El mapa muestra dos unidades morfológicas principales: la primera, en el sur, orientada al norte con ligera desviación al oeste; y la segunda, en la porción nororiental de la península, con orientación al NE. Esto apoya los conceptos sobre la estructura de la península en dos grandes unidades, que corresponden a dos etapas principales de formación del relieve, a partir del Mioceno y del Cuaternario.

Evidentemente, este método no es de aplicación universal, pero en la península de Yucatán resulta muy favorable por la juventud del relieve, que expresa las estructuras geológicas mayores.

Para tener una información complementaria de la altimetría, fue elaborado un mapa de alturas máximas, obteniendo en cada uno de los mapas topográficos de escala 1:50,000 la altitud máxima absoluta, misma que se anotó en la superficie correspondiente, pero de escala 1:2'000,000. Posteriormente, contando con todos los datos, se realizó el mapa que sintetiza con detalle los cambios de altitud en todo el territorio (Figura 6). Este mapa muestra, en términos generales, dos zonas de altitud: una correspondiente a la porción septentrional, con menos de 50 m; y otra meridional, de hasta 400 m. En esta última, se aprecia un aumento gradual de la altitud de norte a sur en una clara alineación. Este método fue aplicado para todo el territorio nacional (Lugo-Hubp *et al.*, 1990), pero con menor detalle que en este estudio. Teóricamente, la altitud expresa la intensidad diversa del levantamiento tectónico. Aun cuando se haya producido una fuerte erosión en la porción meridional, ésta es de tipo diferencial y es poco probable que llegue a eliminar una capa completa de roca con un espesor considerable.

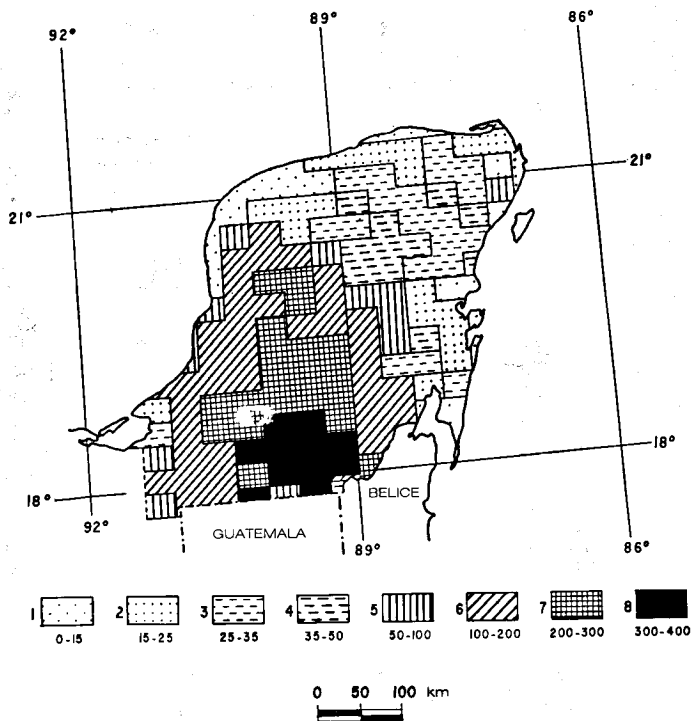


Figura 6.- Mapa de alturas máximas—valores en m s.n.m.m.

La diferencia máxima de alturas en una superficie determinada es un parámetro importante en un estudio de este tipo, por lo cual se elaboró el mapa de amplitud o energía del relieve (Figura 7), también con base en el mapa topográfico de escala 1:50,000. Los cambios de altitud extremos tienen relación con los movimientos neotectónicos, con la erosión o con ambos, lo cual es de interés en la zona de estudio, porque en la parte septentrional los efectos de la erosión fluvial son mínimos y se explica las diferencias de altitud por movimientos de levantamiento de distintas magnitudes. Por otro lado, por contar con información escasa, infortunadamente no fueron consideradas, para la elaboración de este mapa, las profundidades de las depresiones cársticas.

En la parte meridional de la península, se conjugan los movimientos verticales que han originado las superficies más elevadas, con la erosión que forma depresiones en las zonas de debilidad estructural.

El mapa de amplitud del relieve proporciona una información semejante al anterior y también se elaboró originalmente para el territorio nacional (Lugo-Hubp y Aceves-Quesada, 1990).

EL KARST

De acuerdo con Robles-Ramos (1950), la primera publicación de importancia sobre el *karst* de la península de Yucatán es la de Cole (1910). Por otra parte, Gerstenhauer (1969) llevó a cabo un estudio que comprende una regionalización geomorfológica e interpretaciones sobre la evolución del *karst*, es parte del sistema hidrológico de la península, y casi en su totalidad es subterráneo.

El origen y la evolución de las formas cársticas de la península son todavía problemas no resueltos completamente. La actividad neotectónica (Neógeno-Cuaternario) y las oscilaciones del nivel del mar en el Cuaternario son elementos que ayudan a explicar estos problemas.

Sin embargo, hay evidencias de que la emersión no es un proceso ininterrumpido. La glaciación que marca la etapa final del

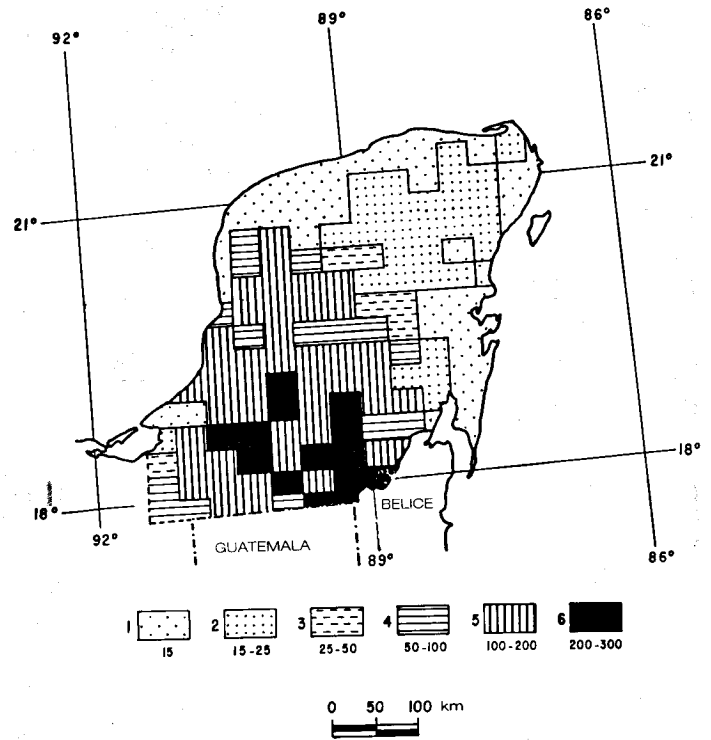


Figura 7.- Mapa de amplitud—o energía—del relieve. Los valores en metros representan diferencias máximas verticales en cada hoja topográfica de 1:50,000.

Pleistoceno en el océano representó un descenso de su nivel, en promedio de 110 m, según Emery (1977). El fin de la glaciación, hace 18,000 años, provocó un ascenso del nivel del mar, inundando sobre todo las amplias planicies de la costa atlántica, lo cual es claramente observable en Florida y Yucatán. Además de lo anterior, debe considerarse la influencia de la actividad neotectónica que ha provocado el levantamiento en forma basculada, de mayor intensidad en el sur, lo que origina sistemas de fractura orientados al norte y al noreste (Figura 8).

La estructura geológica de la superficie y el subsuelo, demuestra que la plataforma que constituye la península actual inició su emersión sobre el nivel del mar durante el Oligoceno y Mioceno en la porción meridional. El resto se levantó gradualmente a partir del Plioceno, y en el Cuaternario el ascenso continuó al norte y hacia la periferia.

Aparentemente, el *karst* se ha presentado en el relieve poco tiempo después que los sedimentos marinos se elevan, constituyendo la tierra firme. El desarrollo de la península, desde el Mioceno hasta nuestros días, permite suponer que la porción meridional fue, en ese período, semejante a la planicie septentrional actual, por lo cual es probable que el *karst* se haya iniciado con dolinas. En la medida que se produce el ascenso continental, el relieve pasa a planicies onduladas y, finalmente, a lomeríos. En esta última etapa, los movimientos verticales contribuyen a la fractura, favorecen el desarrollo ulterior del *karst* subterráneo y se incrementa la disolución de la roca en la superficie, en forma diferencial.

Gerstenhauer (1969) considera que en la península hubo dos etapas de generación del *karst*: una antigua, paleogénica, en una superficie elevada, con formas propias de clima tropical (conos cársticos); otra joven, en la planicie, de hasta 25 ó 30 m de altura. El mismo autor considera que las formas cársticas tuvieron su origen por un ascenso gradual de las aguas subterráneas de hasta 20-100 m. Esta consideración corresponde con el

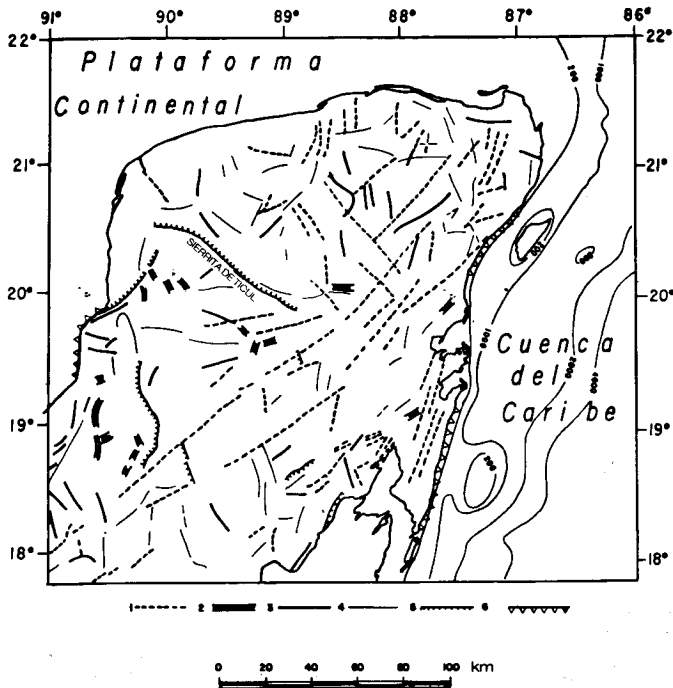


Figura 8.- Lineamientos principales determinados por distintos rasgos del relieve. 1—dolinas; 2—valles cársticos; 3—lomeríos; 4—laderas; 5—escarpes; 6—línea de costa.

relieve que, asimismo, se puede clasificar en joven y antiguo; aunque este último haya iniciado su desarrollo posiblemente durante el Mioceno, adquirió su aspecto actual en el Cuaternario.

Las rupturas de las rocas—fisuras, fracturas, fallas y diaclasas—son los elementos que controlan la posición de las formas cársticas, sobre todo las subterráneas, ya que en ellas se produce la disolución con mayor intensidad. El tipo de *karst* que se desarrolle dependerá, fundamentalmente, de otros factores litológico-estructurales, como el espesor de las capas, la inclinación y la composición mineralógica, además de las condiciones geohidrológicas y climáticas.

En la zona de aeración—*vadose zone*—las cavernas formadas por disolución y erosión mecánica presentan un desarrollo principalmente vertical y están controladas por las fracturas mayores. Debajo del nivel freático, las cavernas se forman casi exclusivamente por disolución y, dependiendo de la densidad de las fisuras, son profundas cuando ésta es baja, y viceversa (Ford, 1971; Ford y Ewers, 1978; Ford y Williams, 1989).

Aparentemente, la mayoría de las formas cársticas subterráneas de la península se ha formado en el nivel freático. Todas las cuevas de la sierrita de Ticul, así como las conocidas en la planicie del norte—con excepción de algunos cenotes muy profundos—se han desarrollado en sentido horizontal, muy cerca del nivel freático. En todos los casos, se trata de cavidades que aprovechan los planos de estratificación de las rocas. Los sistemas de cuevas profundas, generalmente inundadas, deben corresponder al desarrollo cárstico más antiguo, y el hecho de encontrarse cubiertas por agua pudiera explicarse por el ascenso del nivel del mar que se inició a finales del Pleistoceno. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, por tratarse de formas antiguas del relieve, pudieran ser heredadas y haberse formado durante el Cuaternario o antes. También, hipotéticamente, puede considerarse que una parte del *karst* se haya formado debajo del nivel del mar actual durante la última glaciación, o incluso durante las anteriores que ocurrieron en el Pleistoceno.

En el caso de un descenso del nivel del mar, se favorece la formación de estalagmitas; posteriormente, las cavidades se inundan al fin de la glaciación (Lazcano-Sahagún, 1986; Lazcano-Sahagún y Basteris, 1987; Coke, 1988). Las estalagmitas no indican, entonces, que dichas cavernas hayan sido formadas encima del nivel freático, como sugieren Gaona-Vizcayno y colaboradores (1980).

White (1988) y Ford y Williams (1989) consideran que los cambios en el nivel freático producen el colapso del techo de las cavidades al eliminar el soporte ejercido por el agua. Si éstas están cerca de la superficie, como sucede en la península de Yucatán, el colapso crea comunicación con el subsuelo. Si el nivel freático está encima de las galerías o se eleva hasta ellas por un ascenso del nivel del mar, se forma un cenote típico; por otra parte, cuando las galerías se secan, se trata de una cueva. En el primer caso, se tiene el ejemplo del cenote Sac-Actzn (Coke, 1988) y en el segundo, la caverna Aktzn Kaua y otras descritas por Redell (1977).

El término "cenote"—del maya *dzoont*, que significa hoyo en el suelo—se aplica a cualquier salón inundado que contenga agua; es la forma típica del *karst* del norte de la península. Desde el punto de vista geomorfológico, la palabra cenote debe reservarse para las cavidades verticales de dimensiones grandes o pequeñas, de paredes en forma de campana, verticales o ligeramente inclinadas, que desembocan en un acuífero. Hay cenotes de poca profundidad que generalmente comunican con galerías horizontales, parcial o totalmente inundadas; mientras que otros son grandes chimeneas verticales, inundadas, en ocasiones con más de 100 m de profundidad. Queda por explicar el origen de los cenotes muy profundos, con más de 100 m, especialmente abundantes en los alrededores de Valladolid, en el norte del Estado de Yucatán.

De acuerdo con White (1988), la disolución de evaporitas puede realizarse en los planos de estratificación, aun cuando la capa superior sea considerablemente gruesa. De esto, resultan dolinas de hundimiento cuando es areal, y de chimeneas de colapso cuando es puntual. Ford y Williams (1989) describieron estas últimas con diámetros de 1 a 1,000 m y hasta con 500 m de profundidad, con relleno del material colapsado.

En la región de Valladolid, López-Ramos (1975) mencionó la existencia de un mínimo gravimétrico que pudiera corresponder a una serie de pequeños cuerpos diapíricos de las Evaporitas Yucatán, que se introducen en las rocas carbonatadas terciarias. Esta zona corresponde con una zona de alta densidad de cenotes profundos. Por otro lado, Villasuso (*in* Lazcano-Sahagún, 1985) reporta la presencia de iones sulfato y ácido sulfhídrico disueltos en el agua más profunda del cenote Xkolac.

Es posible que estos cenotes se hayan originado como chimeneas de colapso encima de grandes espacios vacíos, creados por la disolución de las porciones más someras de diapiros de anhidrita. Los materiales producidos por el colapso—caliza—pueden ser disueltos posteriormente, gracias a la presencia de ácido sulfúrico, causado por la disolución de la anhidrita, por los ácidos carbónico y sulfhídrico, producto de la descomposición en condiciones euxínicas de la materia orgánica que cae al fondo al morir los organismos que habitan las partes más superficiales del cenote (Gaona-Vizcayno *et al.*, 1980) y a la mayor superficie que presentan estos fragmentos a la disolución respecto a la roca sin alteración.

Los cenotes están representados por miles en la península, y ante la imposibilidad de hacerlo en escala de millones, se consideró conveniente expresarlos por zonas, de acuerdo con una cuantificación en tres categorías (Figura 9). Las concentraciones mayores están localizadas al norte.

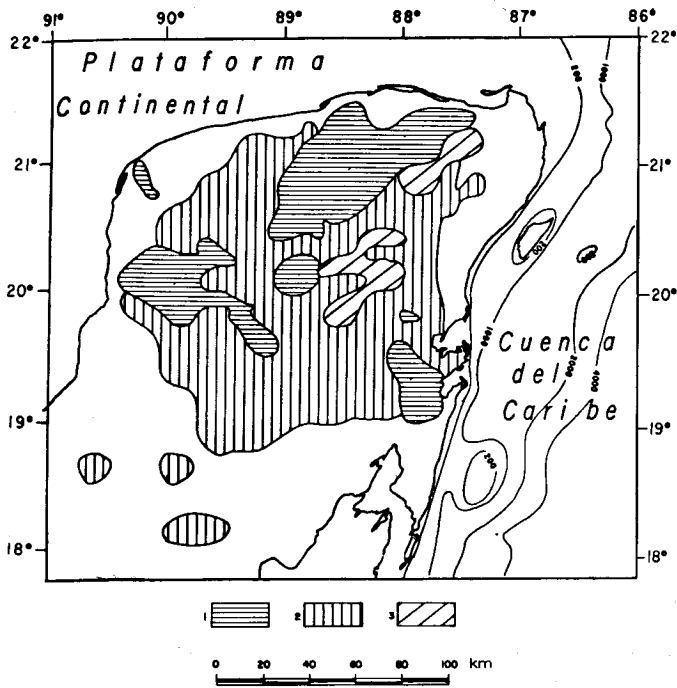


Figura 9.- Formas cársticas y concentración de dolinas en 1,000 km². 1—>100; 2—50-100; 3—<50.

EL RELIEVE DE LA PENÍNSULA

El estudio general del relieve de la península de Yucatán tiene su mejor antecedente en dos publicaciones de Robles-Ramos (1950, 1958). En la primera, este autor reconoce tres zonas morfológicas, mientras que en la segunda nueve; en ambos estudios, hay información sobre morfología, geología y karst. En un estudio posterior, Wilson (1980) hizo una zonificación geomorfológica—distritos fisiográficos—basada fundamentalmente en las formas dominantes del relieve en superficies amplias; reconoció 14 distritos, aunque para una región considerablemente mayor que abarca Belice y parte de Guatemala y de los estados de Chiapas y Tabasco, no incluidos en este artículo. Por su parte, Duch (1988) elaboró un amplio y detallado estudio físico-geográfico del Estado de Yucatán.

Con base en la morfología superficial de la península y de la altura sobre el nivel del mar, se elaboró un mapa geomorfológico de escala muy pequeña (Figura 10). Los criterios aplicados tienen relación con las edades relativas del relieve; es decir, las porciones más bajas y planas son las más jóvenes, mientras que las más antiguas corresponden a las más elevadas y de mayor contraste en altitud (amplitud o energía del relieve). Las formas cársticas varían de una zona a otra, estando presentes en toda la península (Espinasa-Pereña, 1990a, 1990b).

En el norte y noroeste de Yucatán, en la estrecha planicie de acumulación marina y en el litoral, dominan los manantiales y las recargas, en general pequeñas. Representan el proceso de descarga del agua submarina hacia el mar, misma que se ha calculado en aproximadamente 8.6 millones de metros cúbicos por kilómetro de costa cada año, de acuerdo con Lazcano-Sahagún (1986b).

La porción noroccidental de la península, donde predomina la planicie con menos de 10 m de altitud, presenta pocas evidencias de un relieve cárstico, reducido a lapiaz, del tipo de tinajas y algunos cenotes de boca ancha, con nivel somero del agua. Hay cuevas pequeñas de origen freático que culminan en sifones a

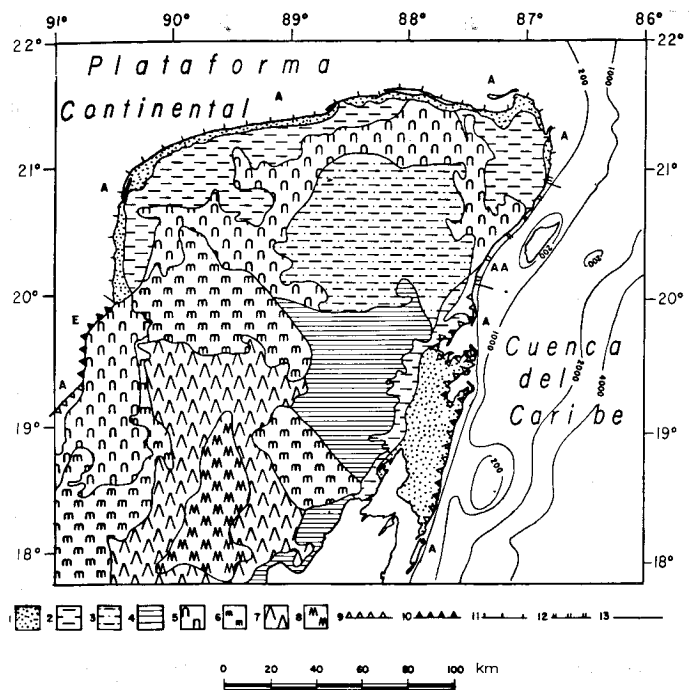


Figura 10.- Morfología de la península de Yucatán. 1—Planicie de acumulación marina, formada principalmente en el Holoceno. **Planicies estructurales:** 2—casi horizontal, de hasta 10 m de altitud, marginal a la costa; 3—casi horizontal, de 10-20 m de altitud; 4—casi horizontal, en localidades con lomeríos, altitud de 20-50 m; 5—planicie con lomeríos, marginal a la costa, elevada, 10-50 m; 6—planicies y lomeríos con altitud de 50-100 m. **Lomeríos:** 7—menores, de 100 a 200 m de altitud; 8—mayores, de 200 a 350 m de altitud. **Dinámica de la línea de costa:** 9—en retroceso hacia el continente, por sumersión o por ascenso del nivel del mar; 10—avance hacia el mar por emersión y/o por acumulación deltaica; 11—avance hacia el mar por depósitos litorales; 12—neutral o no diferenciada; 13—**Procesos dominantes en la costa:** A, acumulación; AA, acumulación y abrasión (erosión marina); E, erosión.

unos 10 m de profundidad. En apariencia, el desarrollo cárstico escaso se debe a cuatro factores: (a) poca precipitación; (b) relieve muy joven (Cuaternario); (c) débil contraste (Figura 7); y (d) una estructura geológica que consiste en caliza dispuesta en estratos delgados.

En la planicie nororiental, con una altitud de 10 a 50 m, el relieve cárstico tiene un desarrollo amplio, sobre todo con cenotes, hoyas y aguadas. Se hace referencia con estos términos a dolinas formadas por disolución de las rocas, que alcanzan hasta 100 m de diámetro y 30 m de profundidad; que tienen el fondo plano, debido al relleno de suelos, y a las que se llama aguadas cuando tienen agua en el fondo. La cueva más grande explorada en esta zona es Nohoch Nah Chich, cerca de Tulum, Estado de Quintana Roo—en la costa oriental—con más de 10 km de túneles, en su totalidad abajo del actual nivel freático, o sea, totalmente inundadas. Otro sistema semejante, del que son conocidos 6 km de longitud, se encuentra cerca de Kaua, Estado de Yucatán. Lo anterior pudiera explicarse por la litología homogénea de calizas en estratos gruesos, una mayor energía del relieve (Figura 7), inclinación de las capas, mayor precipitación, posiblemente movimientos tectónicos más intensos durante el Cuaternario y una mayor antigüedad.

La porción oriental de la península, desde el nivel del mar hasta los 50 m, consiste en varios pisos de altitud diferente, controlados por fallas (Redell, 1977). Esto se puede explicar por

la vecindad con la margen activa de Quintana Roo, donde la plataforma y el talud continentales tienen morfología de terrazas escalonadas, muy estrechas, y a poca distancia se encuentra la planicie abisal—aproximadamente a 4,000 m bajo el nivel del mar—de la cuenca de Yucatán.

En esta región de tierra firme, dominan las cuencas alargadas, sin desagüe superficial, rellenas de suelos salinos. Son comunes las grandes depresiones, con bordes escarpados, ocupadas por lagos salobres. Destaca la laguna Bacalar—en el extremo meridional de la costa—con más de 30 km de longitud. Hay numerosas cavidades horizontales inundadas, tanto de origen freático, fosilizadas, como galerías inundadas y, sobre todo, estalagmitas cubiertas por agua—ahogadas. En estas cavidades, han sido encontrados restos arqueológicos, lo que demuestra que los cambios en el nivel del agua son incluso recientes (Coke, 1987). En estas cavidades se reconoce un flujo hídrico importante.

En el occidente de la península, en un relieve de planicies y lomeríos, se localiza la sierrita de Ticul (Figura 10). Ésta consiste en dos crestas paralelas, de aproximadamente 100-150 m de altitud—200 m como máximo—separadas por un valle. Es una zona de mayor energía del relieve (Figura 7). Las formas cársticas están limitadas a numerosas cavernas, desde pequeños tiros verticales con galerías estrechas, hasta grandes salones freáticos, ovalados en planta, físciles, con más de 50 m de diámetro y 20 m de altura, conectados entre sí por galerías estrechas. Una cueva—Actzn Xpukil—tiene más de un kilómetro de galerías y, al igual que otras, se inunda en temporada. Son comunes las cuevas de desarrollo horizontal (*aktun* en maya), originándose en el nivel freático o cerca de él. Las bocas o entradas se han formado por el colapso del techo de sus salones o galerías.

Los lomeríos de la porción meridional de la península corresponden a la sierra de Bolonchin, que está constituida por numerosas colinas redondeadas, de 100 a 300 m de altura, y valles de fondo plano de hasta 5 km de anchura, cerrados, secos y rellenos por suelos, de hasta 10 m de espesor. Se trata de un *karst* de cúpulas (*kuppenkarst*) y no de conos (*kegelkarst*), como fue propuesto por Isphording (1975). La inclinación de las capas es de hasta 40°, favoreciendo el desarrollo de formas verticales. Es la zona con mayor amplitud del relieve (Figura 7). Son comunes los cauces de arroyos temporales con extremos ciegos en sumideros profundos, con incluso más de 100 m antes de alcanzar el nivel freático. Entre los más conocidos, se encuentra la gruta de Xtacumbil-xunam, en el Estado de Campeche, formada por una serie de galerías subhorizontales, interconectadas por tiros verticales de hasta 60 m de profundidad; en total es de 105 m (Espinasa-Pereña, 1990a, 1990b). Este tipo de formas cársticas sólo se ha encontrado en la sierra de Bolonchin. Isphording (*op. cit.*) clasificó a los valles cerrados como poljes, producidos por la disolución de las rocas a lo largo de líneas de falla.

Este relieve de lomeríos es el más antiguo, y es el resultado del levantamiento de la porción meridional de la península, que simultáneamente es erosionado en la superficie y en el subsuelo.

Los lineamientos dominantes en la península son al NE y sus correspondientes al NW, aunque en la zona costera de Quintana Roo son paralelos a ésta, con orientación al NNE (Figura 8), y fueron definidos por rasgos geomorfológicos observados en la escala grande, a partir de cenotes alineados, depresiones cársticas, lomeríos alargados, pies de laderas, escarpes y líneas de costa.

CONCLUSIONES

1—Las costas del mar Caribe pueden interpretarse como controladas por fracturas, lo que está apoyado, además, con la

batimetría, con su tipo rectilíneo, con su forma escarpada en gran parte, con el desarrollo cárstico intenso en la zona de Tulum y con la depresión alineada de la laguna Bacalar (ambas en la costa sudoriental).

2—Las zonas de mayor concentración de formas cársticas son interpretadas como de mayor grado de fractura, en lo cual podrían tener influencia los domos de evaporitas cretácicas que penetran a las capas superiores terciarias y originan fracturas que alcanzan la superficie.

3—El *karst* en conjunto permitió reconocer una serie de lineamientos que controlan, tanto a las dolinas menores como a las grandes depresiones, con orientación principal al NE y NW en el interior de tierra firme, y al NNE en la costa oriental.

4—Las dos grandes zonas de la península, diferenciadas por su morfología, expresan dos etapas principales de formación del relieve y del *karst*: una antigua, del Mioceno al Cuaternario, en el sur; y otra joven, esencialmente del Cuaternario, en el norte.

RECONOCIMIENTOS

Este estudio es resultado del programa Atlas Nacional de México (1987-1992), coordinado por Ana García Silberman. Los profesores Jean Tricart y Mateo Gutiérrez-Elorza revisaron el manuscrito original e hicieron valiosas observaciones. En el trabajo de gabinete colaboró Araceli Salinas y en el dibujo Armando Sánchez y Arturo Reséndiz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aristarkhova, L.B.; Polkanova, L.P.; y Shubina, N.G., 1970, Karti morfoisohips, in Guerasimov, I.P., ed., Primenienie gueomorfologuicheskikh metodov v strukturno-gueologuicheskikh issledovaniakh: Moscú, Ed. Niedra, p. 89-92.
- Butterlin, Jacques, y Bonet, Federico, 1958, Reconocimiento geológico preliminar del territorio de Quintana Roo: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 10, p. 531-570.
- 1963, Las formaciones cenozoicas de la parte mexicana de la península de Yucatán: Ingeniería Hidráulica en México, v. 17, p. 63-71.
- Coke, Jim, 1988, Cenote Sac-Actun, the white cave: Association for Mexican Cave Studies, Activities Newsletter, v. 17, p. 100-103.
- Cole, L.J., 1910, The caverns and people of northern Yucatán: Bulletin of the American Geographical Society, v. 42, p. 321-336.
- Duch-Gary, Jorge, 1988, La conformación territorial del Estado de Yucatán: Mérida, Universidad Autónoma de Chapingo, Centro Regional de la Península de Yucatán, 427 p.
- Emery, K.O., 1977, The continental shelves, in Menard, H.W., Ocean Sciences: San Francisco, W.H. Freeman, p. 33-44.
- Espinasa-Pereña, Ramón, 1990a, Propuesta de clasificación del *karst* de la República Mexicana: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, 131 p. (inédita).
- 1990b, Carso (mapa de la República Mexicana): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, hoja Geomorfología 2, núm. IV.3.4, escala 1:8'000,000.
- Ford, D.C., 1971, Geologic structure and a new explanation of limestone cavern genesis: Cave Research Group of Great Britain, Transactions, v. 13, p. 81-94.
- Ford, D.C., y Ewers, R.O., 1978, The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth: Canadian Journal of Earth Sciences, v. 15, p. 1783-1798.
- Ford, D.C., y Williams, P.W., 1989, Karst geomorphology and hydrology: Londres, Unwin and Hyman, 601 p.
- Gaona-Vizcayno, Salvador; Gordillo-de Anda, Tucheé; y Villasuso-Pino, Miguel, 1980, Cenotes; karst característico—mecanismos de formación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 4, p. 32-36.

- Gerstenhauer, Armin, 1969, Ein Karstmorphologischer Vergleich Zwischen Florida und Yucatán: Verhandlungen der deutschen Geographentages, v. 36, p. 332-341.
- Isphording, W.C., 1975, The physical geology of Yucatán: Gulf Coast Association of Geological Societies, Transactions, v. 25, p. 231-262.
- Lazcano-Sahagún, Carlos, 1985, The deep cenotes: Association for Mexican Cave Studies, Activities Newsletter, núm. 15, p. 70-75.
- 1986a, Tres abismos inundados de Yucatán: México Desconocido (México, D.F.), núm. 108, p. 6-9.
- 1986b, Los manantiales de la costa de Yucatán: México Desconocido (México, D.F.), núm. 112, p. 52-55.
- Lazcano-Sahagún, Carlos, y Basteris, R., 1987, El increíble cenote Xkekén: México Desconocido (México, D.F.), núm. 119, p. 12-14.
- López-Ramos, Ernesto, 1975, Geological summary of the Yucatán Peninsula, in Naim, A.E.M., y colaboradores, eds., The Gulf of Mexico and the Caribbean: Nueva York, Plenum Press, p. 257-282.
- Lugo-Hubb, José, y Aceves-Quesada, J.F., 1990, Amplitud del relieve (mapa de la República Mexicana): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, hoja Morfometría 2, núm. IV.3.2, escala 1:8'000,000.
- Lugo-Hubb, José; Aceves-Quesada, J.F.; y García-Arizaga, M.T., 1990, Mapas morfométricos de la República Mexicana; (1) Niveles base de erosión, (2) Niveles de cimas, (3) Profundidad de disección, (4) Densidad de disección: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, hoja Morfometría 1, núm. IV.3.1, escala 1:8'000,000.
- Raisz, Erwin, 1959, Landforms of Mexico: Cambridge, Mass., edición privada, mapa con texto, escala 1:3'000,000.
- Redell, J.R., 1977, A preliminary survey of the caves of the Yucatán Peninsula: Association for Mexican Cave Studies Bulletin, v. 6, 296 p.
- Robles-Ramos, Ramiro, 1950, Apuntes sobre la morfología de Yucatán: Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, v. 69, p. 27-106.
- 1958, Los recursos naturales del sureste y su aprovechamiento—Geología y geohidrología: Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables, v. 2, p. 55-92.
- Vidal-Zepeda, Rosalía, 1989, Precipitación (mapa de la República Mexicana): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, núm. IV.4.6, escala 1:4'000,000.
- Wilson, E.M., 1980, Physical geography of the Yucatán Peninsula—Yucatán, a world apart: Alabama, The University of Alabama Press, p. 1-40.
- White, W.B., 1988, Geomorphology and hydrology of karst terrains: Nueva York, Oxford University Press, 464 p.

Manuscrito presentado: 1 de octubre de 1991.

Manuscrito corregido devuelto por el autor: 11 de noviembre de 1992.

Manuscrito aceptado: 11 de noviembre de 1992.