

CENOTES, KARST CARACTERISTICO: MECANISMOS DE FORMACION

Salvador Gaona-Vizcayno¹, Tuchée Gordillo-de Anda²
y Miguel Villasuso-Pino²

RESUMEN

La Península de Yucatán tiene varias manifestaciones kársticas. Una de ellas, la llamada cenote, no parece ser explicada por la teoría tradicional. Los análisis hidrogeoquímicos de sus aguas e inspecciones visuales muestran la existencia de una fuente de bióxido de carbono en el fondo del cenote, que promueve la disolución de la roca. Todo parece indicar que la producción de bióxido de carbono se debe a la actividad orgánica en las aguas del cenote; este hecho y las características hidrodinámicas del acuífero inducen la morfología tan peculiar del cenote.

ABSTRACT

The Yucatán Peninsula has several karst manifestations. One of these, called cenote, cannot be explained by the traditional theory. Hydrogeochemical analysis and sight inspections showed an existence of a carbon dioxide source at the bottom of the cenote, which promotes rock dissolution. Carbon dioxide production seems to be due to the organic activity from the cenote's water; this fact and the aquifer hydrodynamical characteristics induce the peculiar shape of this karstic manifestation.

INTRODUCCION

Una de las manifestaciones kársticas de la Península de Yucatán que se denomina cenote ha sido motivo de interés para muchos autores. El primer estudio que se ocupó de ellos fue realizado por Mercer (1975) a fines del siglo pasado. Posteriormente se siguieron estudiando desde diferentes puntos de vista, algunos relacionados por la arqueología (Guzmán, 1972), con la geohidrología (Back y Hanshaw, 1974; Stringfield y LeGrand, 1974; Gaona, Gordillo y Villasuso, 1980) y otros.

La mayoría de estos autores, cuando explica el origen de los cenotes, recurre a la teoría tradicional, la cual supone que la disolución de la roca carbonatada es producida por la acción del bióxido de carbono que adquirió el agua al infiltrarse a través de los suelos (Llopis, 1970). Después de algunos reconocimientos de campo en la península y estudios hidrogeoquímicos de sus aguas, los autores han podido constatar que esta teoría es insuficiente para explicar la existencia de los cenotes. Las observaciones parecen indicar que la formación de los cenotes se debe en buena medida a la actividad orgánica en sus aguas. Los resultados y observaciones que condujeron a esta hipótesis se presentan a continuación.

AREA DE ESTUDIO

Comprende la región noroccidental de la Península de Yucatán (Figura 1), limitada al sur por el paralelo 20° 00' N; al este por el meridiano 88° 30' W; al norte y oeste por las aguas del Golfo de México. El área está formada por sedi-

mentos del Terciario y Cuaternario formando una planicie calcárea. Desde la superficie hasta los 220 m de profundidad, la península está conformada por estratos casi horizontales de calizas masivas, recristalizadas y de buena permeabilidad. Después de los 220 m, hay capas impermeables de margas y calizas cuyos espesores se extienden varios centenas de metros (Butterlin y Bonet, 1960).

La época de lluvias se encuentra comprendida entre los meses de mayo y octubre, con un promedio anual de 967 mm (Vega, 1981). La temperatura ambiente media es de 26.5° C, y va de 8° C en el invierno a 40° C en verano, con un promedio de 59 por ciento de humedad relativa. La región está cubierta por bosque tropical caducifolios (Rzedowsky, 1978); el cultivo principal es el henequén. Los suelos, donde existen, alcanzan un espesor máximo de 1.20 m.

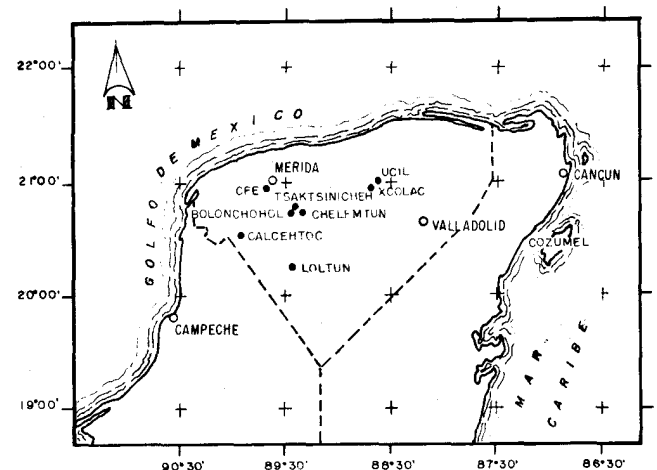


Figura 1.- Localización de los sitios estudiados.

METODO

Durante los años de 1979 y 1980 se llevaron a cabo

¹Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 México, D.F. Actualmente comisionado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Apartado Postal B-1423, Mérida, Yucatán.

varias visitas de reconocimiento, con objeto de recopilar mayor información acerca del karst regional, durante las cuales se visitaron varias cavernas y algunos sitios conocidos localmente como cenotes y aguadas. Se tomaron muestras de agua en los cenotes a diferentes profundidades, y en donde fue posible se hicieron inspecciones subacuáticas. Las muestras de agua se tomaron utilizando botellas muestreadoras de profundidad Lab-Tec II m.r. y se analizaron sus contenidos de calcio, bicarbonato y bióxido de carbono disueltos, de acuerdo al procedimiento propuesto por la American Public Health Association (1975).

Para evitar la contaminación de la muestra por la atmósfera y medir la concentración real del contenido de CO_2 disueltos, se procedió de la manera siguiente: Una vez que la botella muestreadora se sacaba a la superficie, se insertaba una jeringa en el desagüe de látex de ésta y se tomaban dos centímetros cúbicos de agua. Esta alícuota se inyectaba en un tubo de ensayo al vacío, donde posteriormente se titulaba inyectándose los diferentes reactivos. Para las mediciones de pH, también se extrajeron alícuotas con jeringa (10 cc), desprendiendo el émbolo de ésta para introducir el electrodo. Para medir los demás parámetros, se envasaba en una botella de polietileno un litro de muestra y se trasladaba al laboratorio. En varias ocasiones se llevaron a cabo mediciones en el campo y en el laboratorio para asegurarse que las muestras no fueran alteradas en su traslado. Los análisis se hicieron en el laboratorio de aguas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Yucatán, en donde se consideró que el error máximo en la medición es del 5 por ciento.

OBSERVACIONES Y RESULTADOS

En este trabajo se encontró que en la península yucateca existen cinco manifestaciones kársticas que deben tomarse en cuenta: disolución cercana a la superficie, cavernas secas, cavernas inundadas, aguadas y cenotes cuyas características se describen a continuación:

a) Disolución cercana a la superficie. En éste como en otros trabajos (Springal y Espinosa, 1972), se encontró que la roca presenta el mayor ataque por disolución en los primeros metros del subsuelo y va decreciendo con la profundidad. Casi puede asegurarse que al perforar un pozo, al menos en las inmediaciones de la ciudad de Mérida, no se encontrarán cavernas de más de 2.0 m de diámetro a profundidades mayores de 15 m.

b) Cavernas secas. En zonas alejadas de la costa existen sistemas de cavernas, que en algunas ocasiones llegan a tener varios kilómetros de longitud (Mercer, 1975; González, 1980). En estos sistemas la disolución se presenta en la dirección horizontal como túnel y en la vertical en forma de chimenea. Buenos ejemplos de estos sistemas son las grutas de Loltun (Flor de hojas anchas de piedra) y Calcehtoc (Figura 1).

c) Cavernas inundadas. Existen en la península cavernas y sistemas de éstas que, aun cuando su formación se llevó a cabo principalmente arriba del nivel freático, ahora, debido a su crecimiento o al cambio del nivel respecto a las mismas, se encuentran parcial o totalmente inundadas. En algunos casos estas cavernas iniciaron su desarrollo siguiendo alguna fractura de la roca, pero éste no es el caso general. La suposición de que se formaron por arriba del nivel freático se basa en el hecho de que se encontraron en algunas de

ellas estalactitas y sedimentos arcillosos con grietas de desecación a una profundidad de 30 m en relación con el nivel actual. En las cavernas que están parcialmente inundadas, la profundidad del agua es mayor en las zonas donde la luz del sol ilumina el espejo de agua. Cuando estas cavernas no están bien iluminadas y la circulación del aire es pobre, la actividad orgánica es baja y se encuentran recristalizaciones de carbonato de calcio por debajo del nivel freático. Algunos ejemplos de cavernas inundadas son Bolonchohol (Nueve agujeros de ratón), Tsaktinicheh (Gota de agua profunda) (Figura 2). El ejemplo de caverna parcialmente inundada más grande que se ha visitado corresponde a Chelemtun (Gota de agua metida en la piedra), que tiene 46 m de longitud, 16 m de anchura, profundidad de 16 m y una altura de domo de aproximadamente 15 m (Figuras 3 y 4).

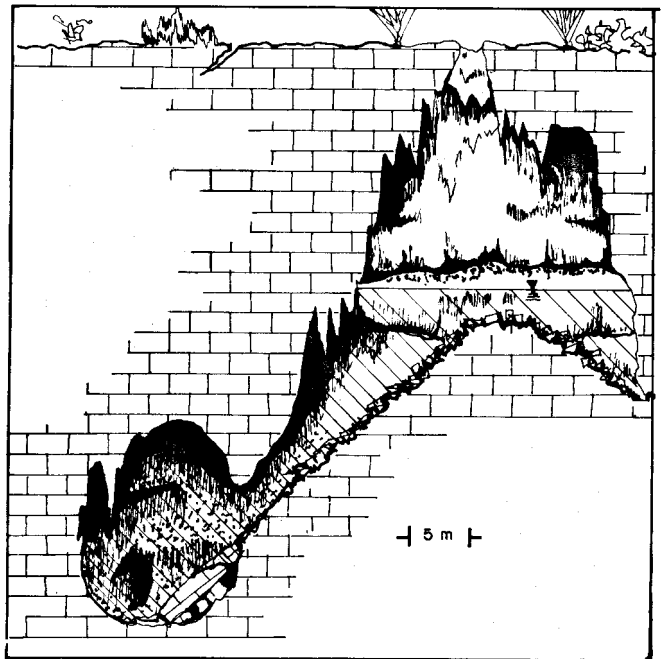


Figura 2.- Corte del cenote Bolonchohol.

d) Aguadas. Este tipo de manifestación es abundante en toda la península; consiste de un estanque en donde se almacena lluvia en forma natural. Aparentemente la comunicación de estos cuerpos con el acuífero es bastante pobre. Es en estos estanques donde se presenta la mayor actividad orgánica. Sus diámetros pueden alcanzar los 100 m, pero sus profundidades sólo llegan a los 15 m (Figura 5).

e) Cenotes. Palabra de origen maya (Ts'ono'ot = Caverna con depósito de agua, Diccionario Maya, 1980) que se utiliza para designar indiscriminadamente todas las manifestaciones kársticas que alcanzan el nivel freático. Aquí restringiremos el uso del término cenote a cierto tipo de éstas que atrajeron el interés de los autores por sus características especiales. Los cenotes son horadaciones en la roca calcárea, cuya forma recuerda la de los tubos de ensayo. Sus diámetros van de 10 a 100 m y sus profundidades en algunos casos alcanzan los 125 m. En ocasiones, generalmente los más alejados de la costa, se encuentran parcialmente cubiertos por bóvedas semiesféricas. En las inspecciones subacuáticas que se han hecho en algunos, se ha podido comprobar que no presentan canales de disolución de diámetros importantes (> 0.5 m) que lleguen o salgan de ellos y que toda relación con el resto del acuífero es a través de fractu-

ras cuyos claros no son mayores de 0.2 m (Figura 5).

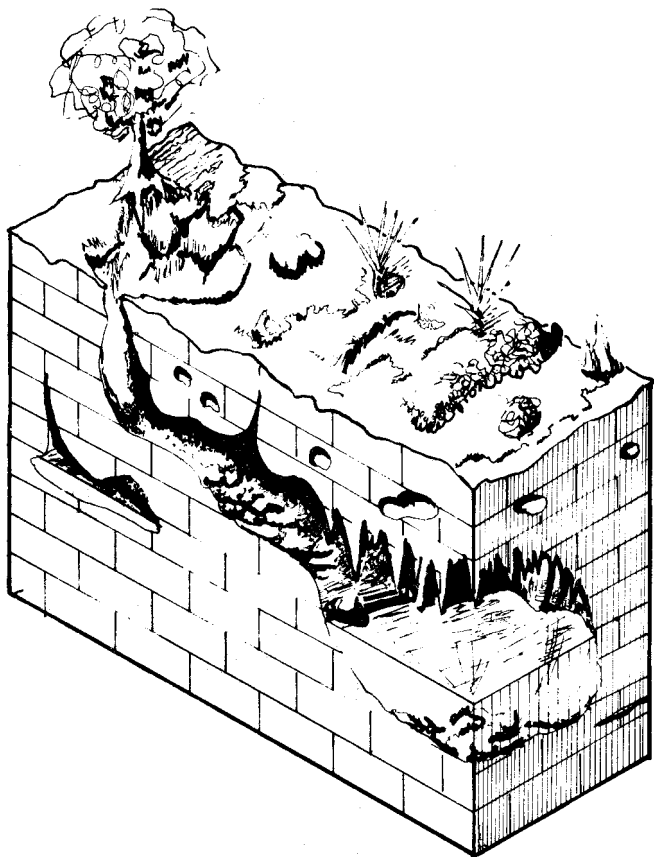


Figura 3.- Corte de caverna parcialmente inundada sin iluminación.

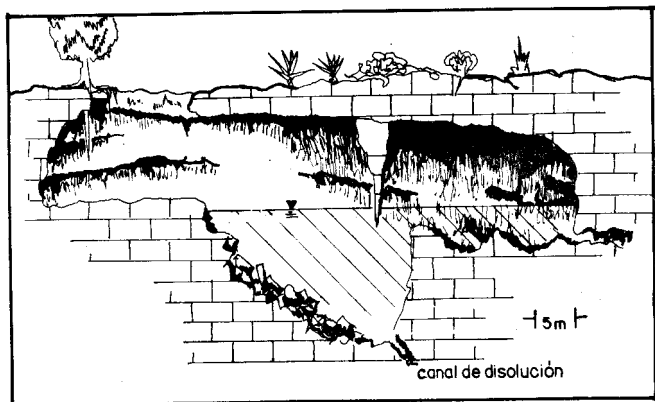


Figura 4.- Corte del cenote Xelemtun.

En todos los sitios visitados se encontró que el flujo de agua es muy lento y sólo pueden detectarse las corrientes producidas por gradientes térmicos. Además, la presencia de sedimentos finos del fondo hace pensar que nunca se han presentado alteraciones importantes a este régimen de velocidades.

Los promedios de las mediciones de bióxido de carbono, bicarbonato, calcio y magnesio hechas a las aguas de los cenotes Ucil (El que se hace angosto), Xcolac y en un pozo de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.), se presentan en las gráficas de la Figura 6. Los iones se han graficado como el logaritmo de su concentración molal en función de la profundidad; los promedios se hicieron de va-

rias medidas de muestreos llevados a cabo entre 1979 y 1980, para el caso de los cenotes, y para el pozo de la C.F.E., de dos muestreos en 1981.

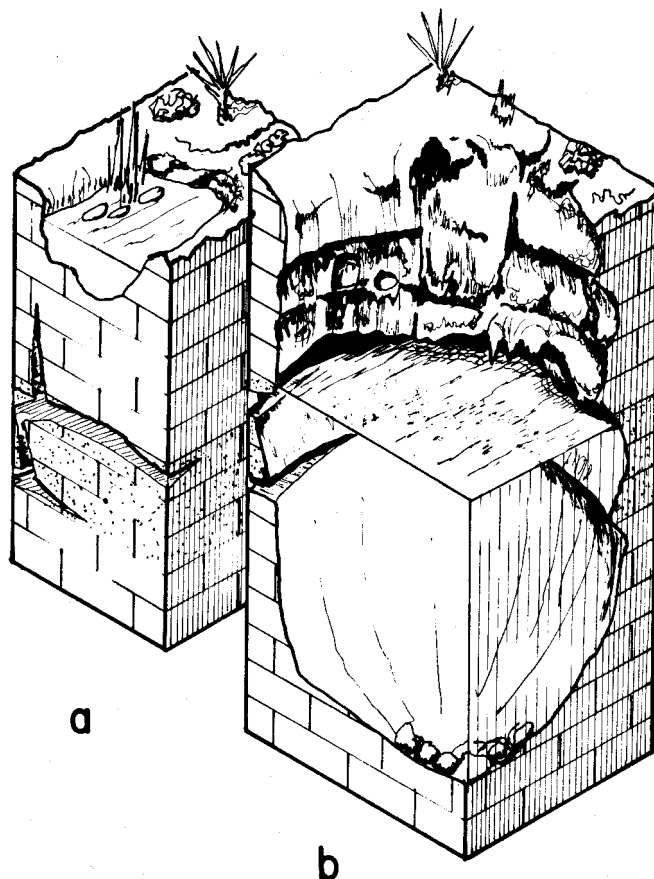


Figura 5.- Corte de una aguada (a) y un cenote (b) típicos.

DISCUSION

Los mecanismos que dan lugar a la formación de cavernas y aguadas están bien explicados en la teoría tradicional (Llopis, 1970), que propone que el bióxido de carbono producido en el sistema suelo-planta es arrastrado por el agua de lluvia al infiltrarse de la superficie y sirve de agente activo en la disolución de la roca carbonatada, a medida que el agua fluye a través de las fisuras; simultáneamente, al disolver la roca, va perdiendo su agresividad hacia la misma tendiendo a un estado de equilibrio. Así resultaría difícil explicar cómo el bióxido de carbono de los suelos podría dar origen a la formación de cenotes.

Los resultados de las mediciones de las concentraciones iónicas de las aguas parecen indicar que el CO_2 disuelto en el agua (Figura 6) está más cerca de su equilibrio con la atmósfera (10^{-5} molal) en el cenote Xcolac cuyo diámetro es de 100 m, que en el cenote Ucil, 15 m de diámetro, o en el pozo de la C.F.E., en donde prácticamente está inhibido el intercambio con la atmósfera. También puede observarse que en el orden anterior hay un enriquecimiento de CO_2 a profundidades mayores de los 60 m, clara indicación de que existe una fuente de producción de CO_2 . Se piensa que no es de origen geológico en base a la estratigrafía regional. Las medidas de bicarbonato muestran una tendencia similar a la anterior pero más suavizada, posiblemente por la rápida respuesta al equilibrio de los iones bicarbonato-carbonato.

Para los valores de calcio y magnesio, puede decirse que su concentración es constante en los primeros 40 m y, a partir de este punto, se va incrementando; en el caso del magnesio el cenote Xcolac alcanza concentraciones superiores a las del agua de mar. El incremento de calcio y magnesio es resultado del enriquecimiento de CO₂ de las aguas profundas, ya que según se aprecia, las aguas del acuífero alcanzan sus concentraciones de equilibrio a profundidades de 40 m.

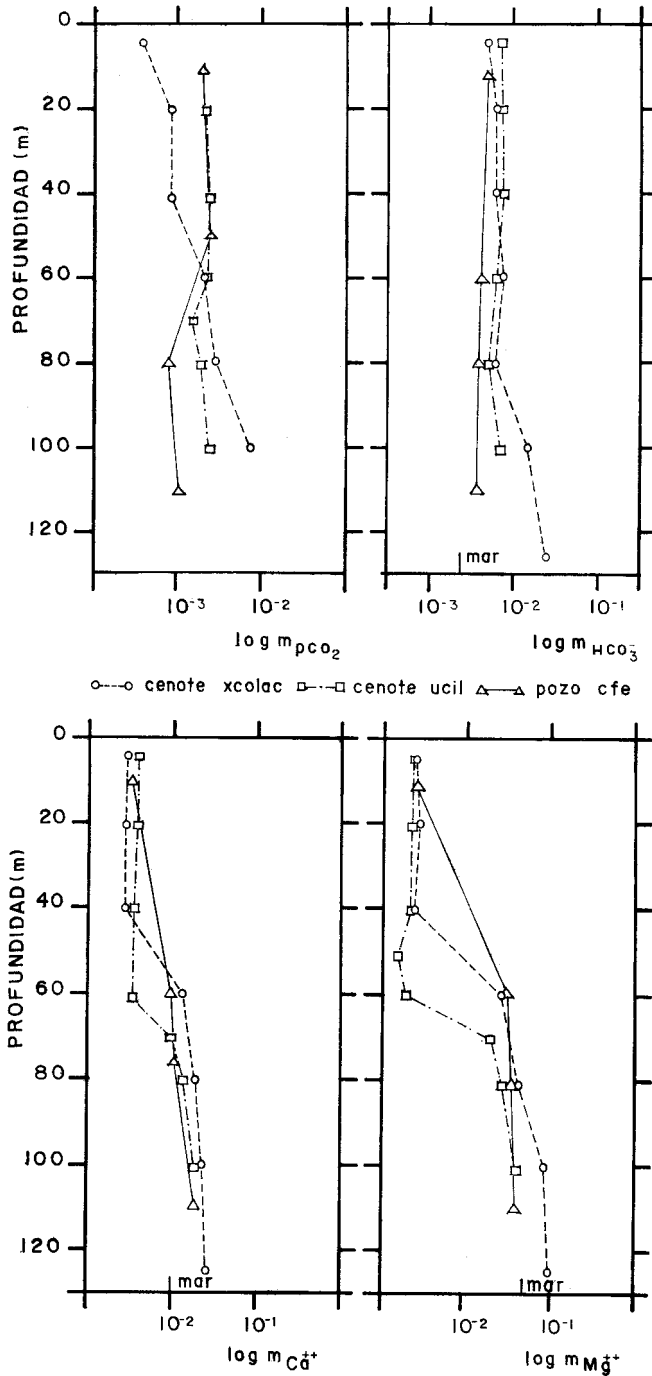


Figura 6.- Concentraciones iónicas de los cenotes Ucil y Xcolac, y del pozo de la C.F.E. en función de la profundidad.

La aparente relación que existe entre la profundidad de los cenotes y la actividad orgánica de los mismos conduce a pensar que éstos son agentes importantes en la formación del cenote. Además, las bajas velocidades de este acuífero, con un gradiente de 10^{-4} , permitirán que los organis-

mos formados en aguas someras del cenote se precipiten en dirección casi vertical y afecten especialmente al descomponerse el fondo del mismo.

La influencia de la materia orgánica en el equilibrio químico de los cenotes es determinante, como lo demuestra el hecho de que se presente recristalización en cenotes con baja actividad orgánica y no en aquéllos en donde es abundante.

Podría pensarse que los incrementos iónicos se deben a la presencia de aguas marinas, pero este hecho aún cuando tenga una influencia importante no es decisivo, pues por un lado los valores de calcio y magnesio alcanzan concentraciones mayores a las del mar y, por otro, el CO₂ del mar no alcanza los valores que aquí se presentan.

Es bastante claro que el fenómeno es complejo e intervienen varios factores que deberán ser estudiados con mayor detalle, pero de cualquier forma, los resultados han mostrado otro mecanismo diferente al tradicional para provocar los fenómenos kársticos.

AGRADECIMIENTOS

A los doctores E. de Alba y A. Rosado G. Cantón por su apoyo al desarrollo de la investigación en Yucatán; a F. Rosado y F. Nieves por su ayuda durante los viajes de trabajo; al M. en C. M. López-Lugo por sus valiosos comentarios y al Ing. C. Tamayo-Lara por su cooperación en la preparación del material gráfico. Agradecemos también en forma muy especial a los IQL J. Trejo y J. Pacheco por haber realizado los análisis hidrogeoquímicos, así como a la Brigada Móvil del área de Geología y Minería de la C.F.E. por permitir el muestreo del pozo de la planta Mérida II.

Este trabajo fue auspiciado económicamente por la Dirección General de Investigación Científica y Superación Académica de la S.E.P., y se publica gracias al Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, con el propósito de fortalecer la cooperación entre las instituciones científicas nacionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

American Public Health Association, 1975, Standard methods: Washington, D. C., 1193 p.
 Back, William, y Hanshaw, B. B., 1974, Hydrogeochemistry of the northern Yucatan Peninsula, Mexico, with a section on Mayan water practices: in: Weidie, A., ed., Field seminar on water and carbonate rocks of the Yucatan Peninsula, Mexico. Nueva Orleans, New Orleans Geol. Soc., p. 45-77.
 Butterlin, Jacques, y Bonet, Federico, 1960, Información básica para la interpretación geohidrológica de la Península de Yucatán: México, D. F., Secretaría de Recursos Hidráulicos, 28 p.
 Cordemex, 1980, Diccionario Maya Cordemex: Mérida, Yucatán, Cordemex, 360 p.
 Gaona, Salvador, Gordillo, Tuchée, y Villasuso, Miguel, 1980, Karsticity of the aquifer of Yucatan (hypothesis on its development): Edmonton, Canadá, Internal. Symp. Water-Rock Interaction, 3, Internal. Assoc. Geochem. Cosmochemistry, Alberta Res. Council, p. 16-17.

- González, Ernesto, 1980, Excavaciones en Loltun, temporada 1980: Mérida, Yuc., Centro Regional del Sureste, Instituto Nacional de Antropología e Historia, en prensa.
- Guzmán, Miguel, 1972, Arqueología subacuática: Artes de México, v. 152, p. 23-37.
- Llopis, Noel, 1970, Fundamentos de hidrogeología cársica: Madrid, Blume, 269 p.
- Mercer, H. C., 1975, The hill-caves of Yucatán: Oklahoma City, Zephyrus Press, 183 p.
- Rzedowski, Jerzy, 1978, Vegetación de México: México, D.F., Limusa, 432 p.
- Springal, G., y Espinosa, L., 1972, El subsuelo de la Península de Yucatán: México, D. F., Reunión de Mecánica de Suelos, 4, mem., p. Y-1-Y-102.
- Stringfield, V. T., y LeGrand, H.E., 1974, Karst hydrology of the northern Yucatan Peninsula, Mexico: *in*: Weidie, A., ed., Field seminar on water and carbonate rocks of the Yucatan Peninsula, Mexico. Nueva Orleans, New Orleans Geol. Soc., p. 25-44.
- Vega, G. S., 1981, Modelo estocástico de la precipitación pluvial sobre la ciudad de Mérida, Yucatán: Mérida, Univ. Yucatán, Esc. Matemáticas, tesis profesional, 59 p., (inérita).