











CAPÍTULO I “GEOLOGÍA HISTÓRICA Y CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO”

I.a ORIGEN DE LAS GEOFORMAS

Durante el Cretácico (último periodo de la era Mesozoica) la Península de Yucatán estuvo cubierta por mares someros, es decir mares de poca profundidad sobre los que se acumularon importantes espesores de carbonatos y evaporitas, que a su vez dieron origen a las calizas, dolomitas y yesos. Posteriormente a partir del periodo Eoceno, se originaron una serie de eventos geológicos que determinaron la geomorfología actual y por lo tanto el ambiente físico-geográfico de la Península.

Con esta estructura geomorfológica da inicio la era Cenozoica en su periodo Terciario, siendo este el periodo donde se estudian los cambios geológicos para la zona en estudio de esta tesis, ya que es la última era geológica y la que sigue transcurriendo en la actualidad, también es la era en la que la tierra sufrió el mayor cambio en su estructura geológica como el movimiento de continentes, formación de estructuras montañosas, las grandes cordilleras, etc.

ERA	PERIODO	LÍMITES TEMPORALES APROXIMADOS (años)		FORMAS DE VIDA ORIGINADAS
		EPOCA		
CENOZOICO	CUATERNARIO	Reciente u holoceno	10.000	Seres humanos 
		Pleistoceno	2.500.000	
	TERCIARIO	Plioceno	12.000.000	Mamíferos rumiantes y carnívoros 
		Mioceno	26.000.000	
		Oligoceno	38.000.000	
MESOZOICO	Cretácico	136.000.000	Primates - Plantas con flor 	
	Jurásico	195.000.000		
	Triásico	225.000.000		
PALEOZOICO	Pérmico	280.000.000	Dinosaurios - Mamíferos 	
		320.000.000		
	CARBONÍFERO	345.000.000	Reptiles - Bosques de helechos 	
		390.000.000		
	Devónico	430.000.000	Anfibios - Insectos 	
	Silúrico	500.000.000	Plantas terrestres vasculares 	
	Ordovícico	570.000.000	Peces - Cordados 	
Cámbrico	700.000.000	Crustáceos - Trilobites 		
PRECÁMBRICO	1.500.000.000	Algas		
	3.500.000.000	Células eucarióticas		
	4.650.000.000 +	Células procarióticas 		
	Formación de la Tierra			

En el periodo Eoceno (54 a 38 millones de años) un proceso orogénico (proceso que da origen a las cadenas montañosas) en el sur de la Península, plegó los recién formados estratos de calizas y produjo un relieve ondulado. A finales del periodo Oligoceno, éste relieve fue sometido a una fuerte erosión en los materiales dolomíticos del cretácico.

Durante los periodos Mioceno y Plioceno se originan sistemas de fracturas: uno con orientación NE-SO, cuyas expresiones se observan a lo largo del cauce del Río Hondo; y otro con orientación NO-SE, a lo largo de la “Sierra Ticul”. En el Mioceno Medio, la Península experimentó un hundimiento que favoreció la posterior precipitación de carbonato de calcio durante el Plioceno, conformando su porción septentrional.

La zona costera de la Península presentó los mayores cambios durante el Pleistoceno, debido a la inestabilidad climática ocasionada por las glaciaciones y los periodos interglaciares. Se han encontrado tres eventos geológicos que determinaron la configuración actual:

La estabilización de la línea de costa del Pleistoceno durante el periodo interglaciar Sangamon en 5 y 8 m sobre el nivel del mar, hace aproximadamente 80 000 años. El norte de la ciudad de Mérida estuvo inundada por un mar somero; se formaron las ondulaciones de playa a lo largo de la línea de costa que se asocian con los actuales humedales costeros.

El descenso de 130 m del nivel del mar durante la glaciación del Wisconsin, cuando la plataforma marina fue expuesta a procesos terrestres y atmosféricos y sujeta a la erosión de valles y cuencas, así como la sedimentación en planicies y deltas; estableciendo el estado geológico para el desarrollo de modernas lagunas costeras.

Durante la trasgresión del Holoceno, alrededor de 10000 años atrás, el nivel del mar disminuye llegando a un nivel de 3 a 4 m por debajo del nivel actual; comenzando el depósito de sedimentos carbonatados del cuaternario en las áreas costeras actuales.

Tales eventos generaron procesos endógenos y exógenos sobre la superficie terrestre. Explicando los procesos anteriores la actividad endógena es la creadora de las deformaciones internas de la superficie terrestre, y su estudio es fundamental para conocer la disposición estructural del relieve y distribución litológica; los procesos exógenos nivelan el relieve mediante la erosión de las elevaciones y acumulación o rellenos de sedimentos en las depresiones. Los procesos y sus modalidades de degradación, denudación, remoción, corrosión y sedimentación de la superficie terrestre se llevan a cabo bajo condiciones ambientales determinadas primordialmente por el clima.

El relieve y el clima conducen a determinados sistemas de denudación-erosión-acumulación-corrosión, como el dominio de algunos de ellos, quedando como procesos secundarios los restantes.

I.b LA EVOLUCIÓN KÁRSTICA

El modelo de evolución Kárstica o evolución del relieve propuesto por Ground (1914) Y Cvijic (1918) plantea cuatro etapas de evolución lineal para ambientes húmedos (templados y tropicales), con espesores importantes de rocas carbonatadas y bajo un solo periodo continuo de levantamiento tectónica. Aunque en sentido estricto las etapas son lineales y no tienen un nombre, para este trabajo se les ha denominado: reciente, juventud, madurez y tardía de relictos (Fig. 1).

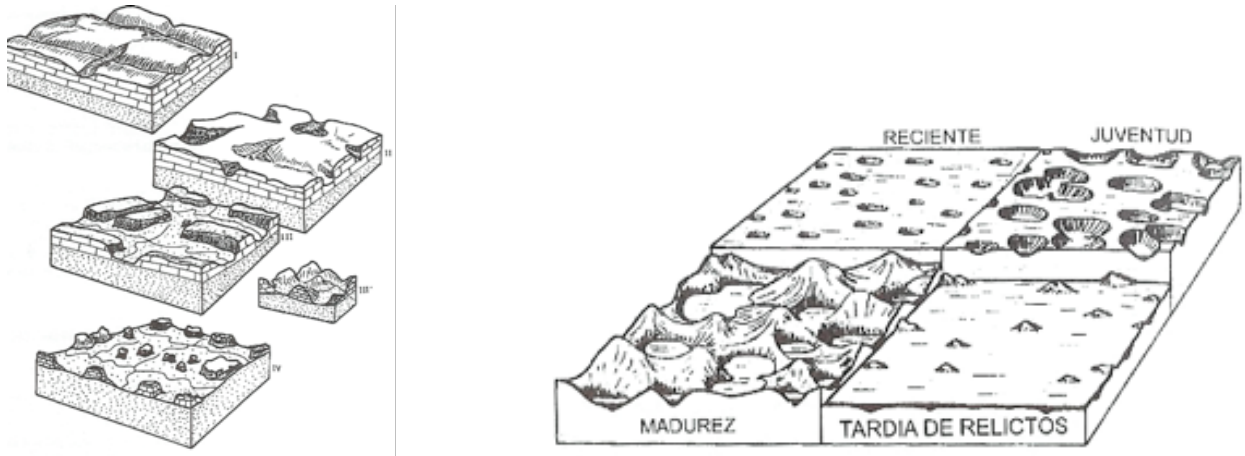


Fig. 1 evolución del Karst tropical

Antes de continuar se puede hacer la pregunta ¿qué es el karst?, para continuar y entender lo que se menciona en el párrafo anterior y en los subsecuentes se definirá el termino karst:

Karst ((del alemán *Karst*): *meseta de piedra caliza*), carst o carso se conoce a una forma de relieve originado por meteorización química de determinadas rocas (como la caliza, dolomía, aljez, etc.) compuestas por minerales solubles en agua.

Su nombre se debe a la región del *Karst* o -en italiano- "Carso", ubicada en el extremo noreste de Italia, y el oeste de Eslovenia y Croacia; siendo esta una región caliza donde se avanzó notablemente en el estudio del fenómeno.

Un Karst se produce por disolución indirecta del carbonato calcio de las rocas calizas, debido a la acción de aguas ligeramente ácidas. El agua se acidifica cuando se enriquece en dióxido de carbono, por ejemplo, cuando atraviesa un suelo y reacciona con el carbonato, formando bicarbonato, que es soluble, hoy en día un factor importante para la acidificación del agua es la contaminación atmosférica y en los suelos donde hay presencia humana, provocando que al infiltrarse el agua en el subsuelo, esta contiene gran cantidad de contaminantes que a su vez la acidifican y promueven la disolución de los subsuelos o actividad Kárstica. No toda la actividad de disolución es provocada por aguas ácidas, hay otro tipo de rocas, las evaporitas, por ejemplo el aljez, que se disuelven sin necesidad de aguas ácidas. Las aguas superficiales y subterráneas van disolviendo la roca y creando galerías o cuevas que, por hundimiento parcial forman dolinas (en la Península de Yucatán conocidos como cenotes) y por hundimiento total, forman cañones.

Las sales disueltas en el agua puede volver a cristalizar en determinadas circunstancias, por ejemplo, al gotear desde el techo de una cueva hasta el suelo se forman estalactitas y estalagmitas si el crecimiento de la cristalización es desde el suelo, la unión de estas dos formaciones anteriores se les conoce como columnas, si se estanca en una cavidad, se pueden formar geodas.

Existen otras muchas formas Kársticas según si estas formas se producen en superficie o por el contrario son geomorfologías que aparecen en cavidades subterráneas (Fig. 2). En el primer caso se denominan exocársticas (lapiaces, poljes, dolinas, uvalas, surgencias, cañones, etc.) y en el segundo endocársticas (simas, sumideros, sifones, etc.)



Aljez



Roca Caliza

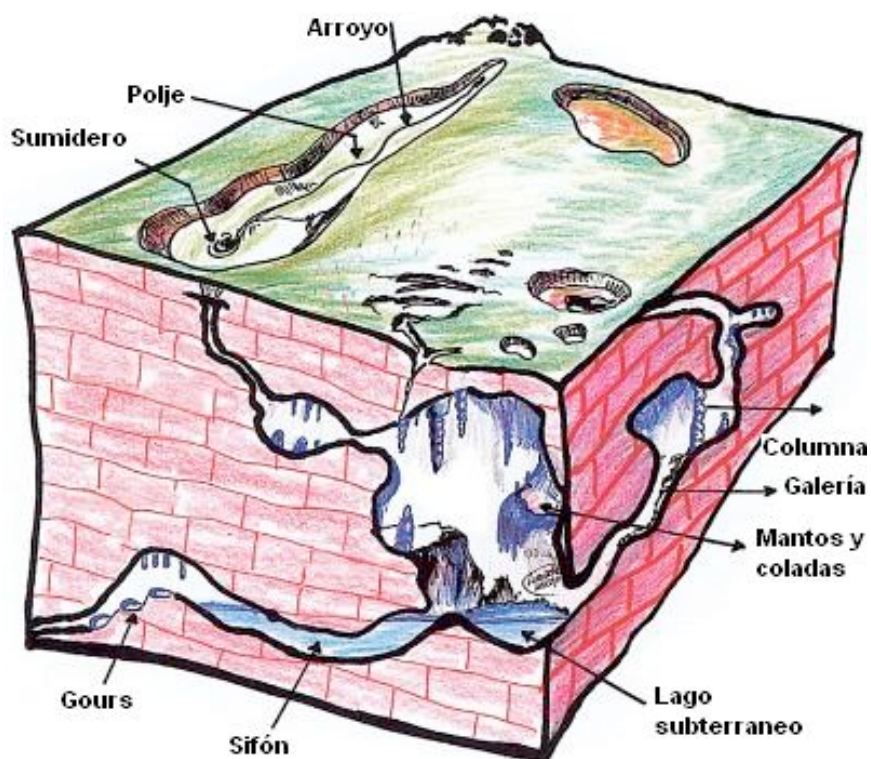


Fig. 2 Geomorfologías Endocársticas y Exocársticas

Con la definición de la actividad Kárstica de los párrafos anteriores se podrá entender con mayor claridad el estudio del relieve kárstico de la península de Yucatán, que es uno de los lugares más importantes en el mundo donde este fenómeno tiene actuación.

Debido a que la mayor parte de la Península de Yucatán se encuentra cubierta por selvas tropicales primarias y secundarias, y no se dispone de evidencias visibles de karst desnudo, el indicador más significativo para diferenciar los estados del karst, es el patrón morfológico de geoformas exocársticas (estudio de las formas superficiales), que sintetiza las condiciones que favorecen o inhiben el desarrollo del karst.

El karst de la Península se desarrolla sobre estructuras tectónicas tabulares o mesiformes, de estratos monoclinales (rocas que presentan una disposición inclinada en una sola dirección) dispuestos en forma horizontal o subhorizontal. Se caracteriza por formas de absorción circulares, cavidades de desarrollo vertical, circulación vertical y horizontal.

La circulación es esencialmente vertical, descendente y de alimentación autóctona. La morfoestructura tabular de la península ha sido modificada por basculamientos (movimientos inestables) diferenciales en dos grandes bloques estrechamente ligados a la estructura geológica profunda, uno de ellos al sur que inició su levantamiento en el Mioceno y otro al norte iniciando su levantamiento en el Plioceno y continuando hasta el Cuaternario. La influencia de la actividad geotectónica que ha provocado el levantamiento en forma basculada de mayor intensidad en el sur, origina sistemas de fracturas orientados al norte y noreste. De esta manera en el bloque sur se origina el karst paleógeno, donde se encuentran las etapas más avanzadas de la evolución kárstica y en el norte el más reciente o neogénico de planicies denudativas (expuestas a erosión) con densidades variables de depresiones y dolinas (cenotes) correspondiendo a la etapa reciente y de juventud.

A partir de las diferencias en bloques se originan expresiones morfológicas exocársticas tipificadas según las secuencias evolutivas predeterminadas e interfases de transición derivadas, se identificaron siete grados o niveles de evolución kárstica: reciente, reciente-juventud, juventud, juventud-madurez, madurez, madurez-tardía de reclitos y tardía de reclitos (Fig. 3).

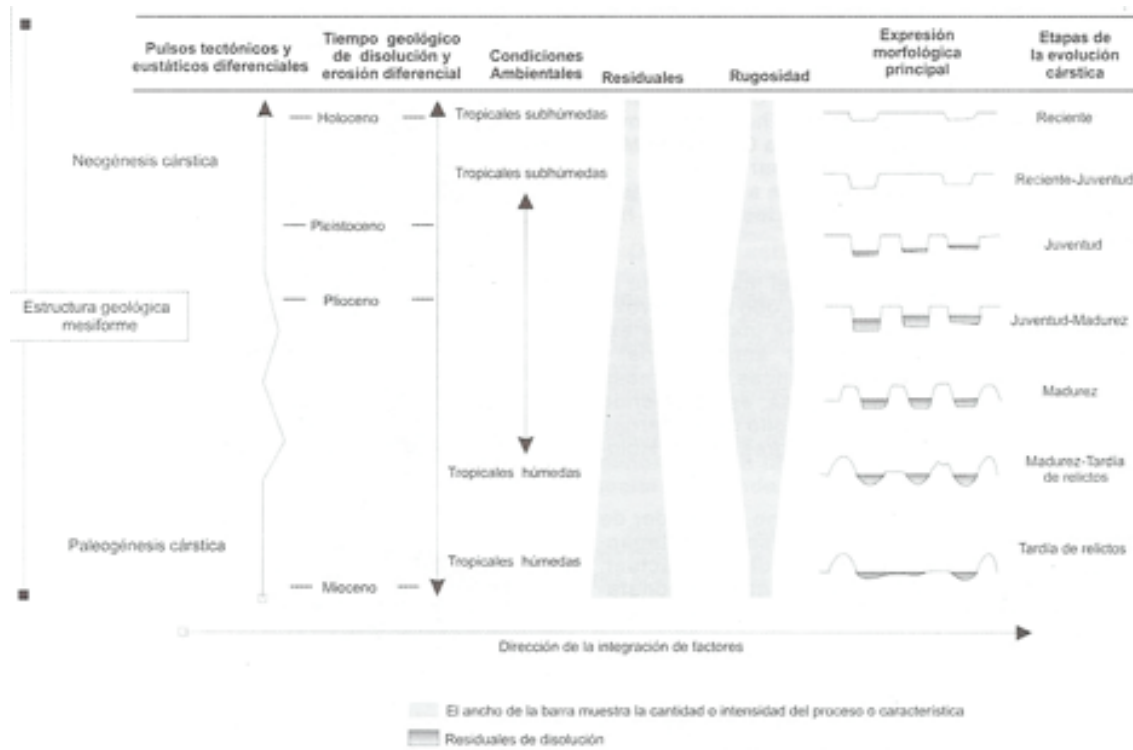


Fig. 3 Diagrama representativo de la evolución kárstica

A medida que el proceso kárstico avanza, se incrementa la cantidad de geoformas y depósitos residuales producto de la disolución de las calizas. Las planicies denudativas (planicies despojadas) se transforman gradualmente en planicies acumulativas confinadas hasta convertirse en planicies residuales extendidas (Fig. 3). Al mismo tiempo las geoformas positivas con respecto a los niveles de base locales, aparecen entre la juventud y la madurez como altillos y lomeríos bajos con cimas de pendiente plana y horizontal, resultado de la erosión diferencial sobre planicies estructurales de exposición reciente a la karstificación. Al aumentar los tiempos de disolución, los bordes de las cimas planas tienden a redondearse hasta formar colinas cónicas en altas densidades (etapa de madurez) que posteriormente en la etapa tardía de relictos tienden a reducir su altura, convirtiéndose en colinas residuales y montículos. Las dolinas o cenotes con acumulación incipiente de residuales que inician su formación durante la etapa reciente en el Cuaternario, se unen gradualmente en algunas zonas durante la madurez, hasta formar úvalas (depressiones Kársticas de forma ovalada y contornos sinuosos) y posteriormente poljés (depressiones alargadas, formados por uvalas contiguas) en la etapa tardía de relictos.

Los controles estructurales asociados a la margen activa del centro de Quintana Roo son especialmente favorables para la formación de úvalas.

La rugosidad del terreno es un auxiliar tanto cualitativo como morfométrico que permite discriminar estilos de paisaje kárstico. Day (1977) propone un índice para diferenciar entre paisaje rugoso o suave. Si el terreno es suave el índice tiende a infinito, y entre mas rugoso es, el índice tiende a uno. En este sentido el paisaje en su etapa inicial incrementa la rugosidad alcanzando su máximo o clímax en la madurez y disminuyendo posteriormente hacia la etapa tardía de relictos. La rugosidad se explica a través de la fuerza o energía vectorial y su dispersión. Los vectores se obtienen de la perpendicular sobre las superficies o facetas planares delimitadas a partir de líneas divisorias

epicársticas (desarrolladas sobre el karst) y rupturas de pendiente (Fig. 4). La dispersión se establece en función del número de vectores y su orientación preferente sobre un rango de 180° . Entre mayor sea la cobertura angular mayor será la dispersión. La energía estará determinada por su distancia angular a la perpendicular o la dispersión dominante.

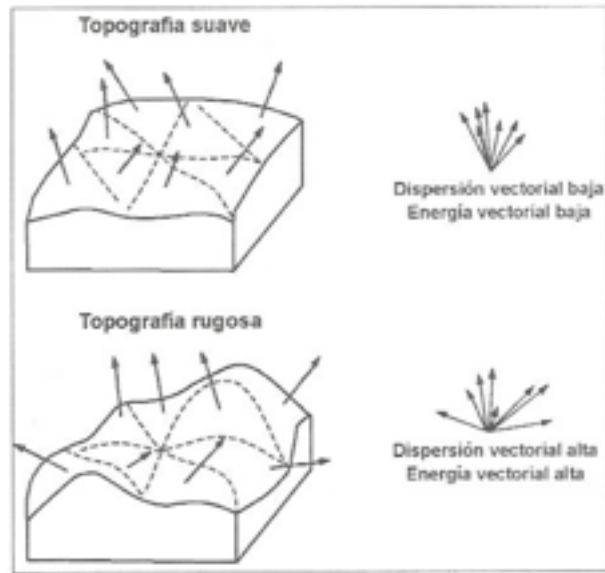


Fig. 4 Rugosidad de los terrenos kársticos

El origen de muchos suelos de la Península de Yucatán está en discusión: Wright (1970) y Duch (1988) sugieren que el verdadero material que dio origen a muchos suelos no es la coraza calcárea, sino un depósito superficial presente sobre la roca en el momento del levantamiento. Consideran la probabilidad de que los suelos profundos que reposan sobre roca calcárea corresponden a un antiguo ciclo de formación de suelos, mientras que los formados a partir de la coraza resquebrajada y erosionada corresponden a uno nuevo. Mencionan que la naturaleza del depósito podría ser un sedimento impuro, rico en carbonatos (fango calcáreo submarino), polvo meteórico, o cenizas volcánicas depositadas sobre la superficie ya emergida; también plantea una mezcla de sedimentos abisales y otros materiales finos derivados de erupciones volcánicas submarinas, depositados súbitamente sobre el bloque peninsular ya emergido, a consecuencia de enormes marejadas por algún movimiento tectónico de primer orden en la región Caribe-Antillana.

Otros autores sugieren que los suelos rojos y profundos se derivan de un fango marino con impurezas de cenizas volcánicas y que su textura predominantemente arcillosa sugiere un origen palustre o pantanoso, posiblemente de áreas someras costeras, en las cuales los sedimentos marinos saturados con cenizas volcánicas o polvo meteórico, fueron atrapados cuando la plataforma marina de la Península quedó descubierta, debido al descenso de 130 m, en relación al nivel del mar producto de las glaciaciones mencionadas anteriormente, hace 18 000 años.

Estudios recientes realizados en el centro y sur del estado de Yucatán, donde se ha cavado una gran cantidad de calicatas, han revelado evidencias de un desarrollo de los suelos a partir de la disolución de la roca caliza y consecuentemente, la formación de un horizonte petrocálcico en la parte baja del perfil estratigráfico. La morfología de los perfiles sugiere la existencia de un proceso de disolución, donde la intensidad de disolución y el transporte de los carbonatos dependen del tipo de roca y su pureza.

I.c CENOTES Y RIOS SUBTERRANEOS

Conociendo los efectos de la evolución kárstica estudiada en el subtema anterior, se pueden estudiar y conocer dos fenómenos muy comunes en el subsuelo de la Península de Yucatán, siendo estos la formación de Cenotes y Ríos Subterráneos, fenómenos que interfieren directamente al cimentar una obra, ya que los estudios de mecánica de suelos en esta región van más enfocados a localizar cenotes, ríos subterráneos y cavernas, siendo más importante lo anterior que la misma capacidad de carga del subsuelo.

Como se ha relatado sabemos que la Península se caracteriza por su paisaje engañosamente llano, carente de montañas, pero quien la atraviese a pie encontrará a cada momento pequeños accidentes dondequiera que la losa calcárea se haya quebrado. En esta región, sobre todo en su parte norte, es notoria la ausencia de ríos debido a que la mayor parte de la lluvia se infiltra al subsuelo por la alta permeabilidad de la roca caliza. El florecimiento de la civilización maya en este paisaje sólo pudo sostenerse gracias a sus ventanas al manto acuífero: los cenotes y ríos subterráneos, siendo de gran valor quienes los consideraban sagrados y el camino al llamado inframundo (Xibalbá).

Las Dolinas, comúnmente llamados Cenotes son cavidades subterráneas producto de la actividad Kárstica, en el párrafo anterior se describió a la Península como un paisaje engañosamente llano, debido a que en sus profundidades posee la característica de la formación de Cenotes y cavidades que en muchas ocasiones son explotados por su belleza natural (funcionando como hermosas piscinas naturales), y otras mas suelen ser un problema al cimentar una obra, recurriendo a soluciones que muchas ocasiones son demasiado costosas (Fig. 5)



Fig. 5 Cenotes de la Península de Yucatán

Aunque los cenotes (del maya *ts'onot*) parecen simplemente una variedad peculiar de lago pequeño, usualmente cilíndricos y más profundos que amplios, en realidad son muy distintos; inclusive, los cenotes más jóvenes son en cuanto a la circulación de sus aguas, más similares a ríos que a lagos, pues tienen conexión a corrientes subterráneas. Si bien su flora y fauna pueden ser relativamente pobres, su aislamiento ha originado el desarrollo de especies endémicas, es decir, exclusivas de ellos.

La península de Yucatán, en sentido geológico, no comprende solamente los estados Mexicanos de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, sino también el Petén Guatemalteco y el norte de Belice; compuesta por una placa de rocas calcáreas y formada por el depósito de carbonatos en los mares

someros que la han cubierto en varias ocasiones durante las últimas decenas de millones de años (era Cenozoica). Dichas rocas son solubles en agua, lo cual explica la abundancia de cenotes, ríos subterráneos y grutas.

Quintana Roo y el norte de Yucatán son geológicamente más jóvenes que el interior de la península y la costa campechana, ya que su emersión fue posterior al sur de la península. La forma actual de la península se alcanzó a fines del periodo Plioceno, hace unos cuatro millones de años; no obstante, los farallones (roca alta y picuda que sobresale en el mar o en la costa) común en Tulum e isla Mujeres se formaron durante el periodo Holoceno, apenas unos 10 mil años atrás, prologando la formación de arrecifes coralinos al norte y oriente. La emersión de la península es un proceso que continúa hasta hoy, en el extremo noroccidental: la costa del golfo se ha alejado del puerto de Progreso más de 200 metros en el último siglo. El nivel actual del mar se alcanzó hace sólo unos 5 mil 500 años; al principio del Holoceno el nivel era unos 100 metros menor que hoy.

Aunque la península recibe cerca de 200 mil millones de metros cúbicos de lluvia al año, su balance hidrológico es negativo. No hay presas importantes, y existen sólo doce lagos de volumen mayor a medio millón de metros cúbicos, ninguno de ellos en la parte norte. El flujo del agua dulce en el subsuelo no tiene lugar solamente en ríos subterráneos, sino también a través de fracturas en la roca, desembocando en el mar a través de ojos de agua.

Hay en la península de Yucatán tres cuencas hidrológicas principales: la cuenca criptorreica (de ríos ocultos), sobre el estado de Yucatán y norte de Quintana Roo; la del río Hondo, al sur de este último; y la de Champotón, en Campeche. Es en la cuenca criptorreica donde se encuentra la mayor parte de los varios cientos de cenotes de la península. Muchos de ellos se hallan alineados delatando corrientes subterráneas. La alineación más notoria es el llamado *anillo de cenotes*, se relaciona con el borde del cráter de Chicxulub, estructura enterrada bajo la losa calcárea yucateca; fue dejado por el impacto de un asteroide, coincidente con la extinción de los dinosaurios, hace unos 70 millones de años, siendo la teoría más aceptada por los historiadores, antropólogos y geólogos.



Fig. 6 Principales Cenotes de la Riviera Maya (marcados con la letra C)

Los tipos clásicos de cenotes son:

- A. Cenotes cántaro (también llamados en maya *ch'e'n*), en los que la abertura al exterior es pequeña en relación con el diámetro del embalse (Fig. 7).
- B. Cenotes cilíndricos (propiamente *ts'onot*), de paredes verticales, donde la abertura equivale al diámetro del cuerpo de agua (Fig. 8).
- C. Cenotes aguada (*ak'al che'*), azolvados, con perfil en forma de plato (Fig.9).
- D. Grutas o cenotes cántaro (*aktun*), en los que la entrada es lateral (Fig. 10).



Fig. 7 cenote tipo cántaro



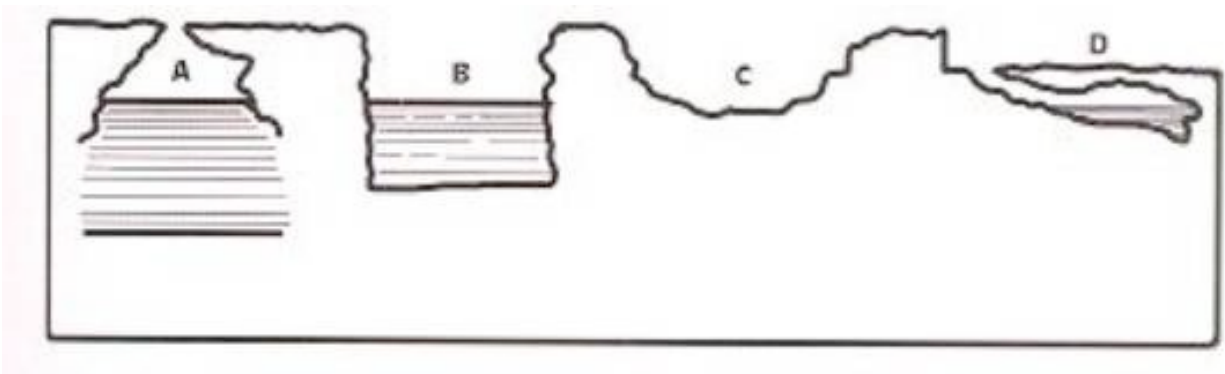
Fig. 8 cenote tipo cilíndrico



Fig. 9 cenote tipo aguada (azolvado)



Fig. 10 cenote tipo cántaro (gruta)



Tipos de Cenotes

La hipótesis más aceptada sobre el origen de los cenotes plantea una secuencia desde una gruta o cenote cántaro, como el de Dzitnup (Valladolid), a un cenote cilíndrico por derrumbe del techo; a manera de ejemplo, el cenote cilíndrico, como el de Chichén Itzá, se convertirá en una *aguada*, por azolve y por hundimiento lento de toda la zona adyacente (Fig. 11).



Fig. 11 Cenote Dzitnup (Valladolid, Yucatán)

Otras aguadas (perfil en forma de plato) son simplemente depresiones del terreno en las cuales se ha acumulado arcilla, lo que permite la acumulación de agua de lluvia. En el primer paso, el desplome de la bóveda suele quedar atestiguado por una pila de rocas y sedimentos en el centro del cenote. Este colapso es ocasionado por la disolución lenta de la roca caliza por el agua, sobre todo con ayuda de ácido sulfhídrico, la reactividad ocasionada por la mezcla entre agua dulce y marina sobre la caliza, y la actividad microbiológica asociada.

El grado de conexión al manto acuífero permite distinguir: *a)* cenotes de flujo abierto, con aguas claras, fondo limpio, arenoso o rocoso y una masa de agua homogénea y bien oxigenada, y *b)* los estancados o de flujo restringido, turbios y estratificados térmicamente. En éstos, la capa acuática superficial es básica y sobresaturada con oxígeno disuelto, mientras que la profunda es ácida, desprovista de oxígeno y con ácido sulfhídrico cerca del fondo.

Existen dos procesos que pueden bloquear el intercambio de agua del cenote con el flujo subterráneo. El primero y más eficiente es el ya mencionado desplome de la bóveda, seguido por el aporte de sedimento que se deposita en el fondo del cenote y que va sellando cada vez más la comunicación con el manto acuífero. El segundo tipo de bloqueo consiste en el ingreso de agua marina a través del fondo del cenote.

Entre ambas capas de agua (la dulce superficial, menos densa, y la marina profunda, más densa), se establece una zona de transición abrupta denominada *haloclina*. La haloclina estratifica el cenote: funciona como una barrera física que aísla la capa de agua dulce. En los cenotes costeros, la capa marina profunda no siempre se encuentra realmente estancada, sino que puede circular impulsada por las mareas y tormentas a través de túneles conectados con el mar. Si pensamos en la variedad de grados de conexión del cenote con el manto acuífero, añadiendo a ello la conjunción de agua dulce y marina que definen diversos patrones de circulación y estratificación en los cenotes (desde los totalmente homogéneos hasta los que presentan estratificación), y si además tomamos en cuenta la diversidad de formas de la cuenca, área superficial, profundidad, volúmen, exposición a la luz solar (apertura de la boca del cenote) y otros factores más, se puede visualizar qué tan enorme es la diversidad de embalses conocidos en forma genérica de los cenotes.

Por lo que concierne a la flora, los cenotes más lejanos del mar suelen asociarse con higueras. Los cenotes más costeros suelen estar entre manglares, juncos, helechos, palmas y algas. En cuanto a la microflora, la fracción mejor conocida son las bacterias, algunas de interés como indicadores de contaminación, otras de relevancia en la formación misma del cenote por erosión de sus paredes. Adicionalmente, ciertas bacterias representan la fuente alternativa de abastecimiento de energía para los organismos que viven en los túneles de oscuridad permanente, alejados del cuerpo abierto del cenote.

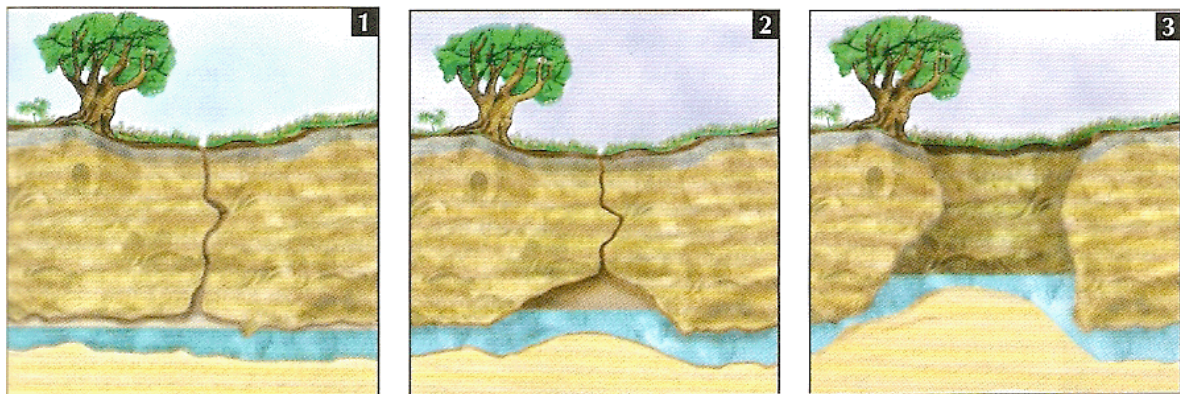
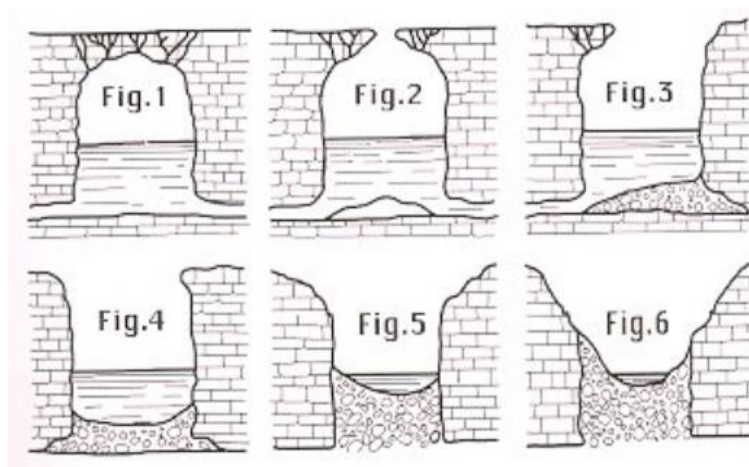
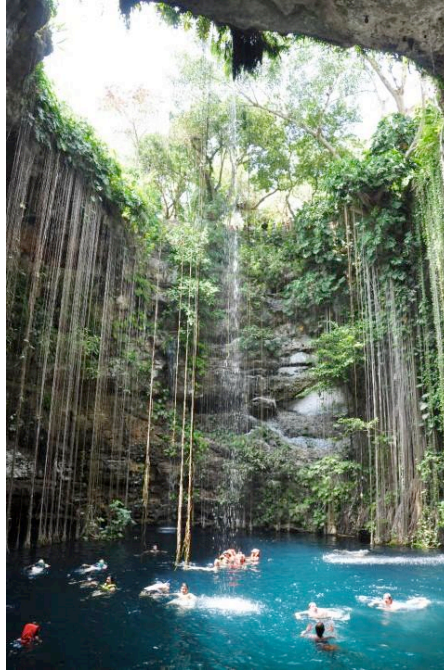


DIAGRAMA: FORMACIÓN DE CENOTES

Cenote Azul



En la imagen superior se muestra el Cenote Azul ubicado al sur de Playa del Carmen, es interesante además de observar su belleza natural, analizar su geomorfología, se puede ver que corresponde a un cenote cilíndrico, donde las paredes son verticales (es decir el diámetro del espejo de agua es similar a la abertura del cenote), formado por la evolución kárstica corresponde al periodo Juventud – Madurez (ver mapa geomorfológico del capítulo siguiente), pudo haberse formado por estancamiento de agua al estar inundada la Península de Yucatán en la era Mesozoica, el agua es salina pero a menor concentración que el agua de mar, ya que es relativamente cercano a la costa, su afluente se enriquece por las lluvias y la filtración.

Cenote Dos Ojos

Este cenote se encuentra en la población de Xel-ha, es muy concurrido por turistas debido a que posee formas caprichosas kársticas correspondientes a la etapa Juventud-Madurez, sin embargo este cenote a diferencia del cenote azul, pertenece al grupo de cenotes tipo cántaro, donde su abertura superior es menor que el área de espejo de agua del fondo, por ello se puede suponer que su formación se debe a la filtración de agua a través de la roca caliza, creando elementos kársticos como estalactitas, estalagmitas, y columnas que le proporcionan una belleza natural extra al ambiente kárstico.

Se conoce poco sobre la mayoría de los invertebrados de los cenotes; casi todos los estudios se han concentrado en los macrocrustáceos y el zooplanctón. Por ejemplo, en la península de Yucatán se encuentra del 30 al 50 por ciento de las especies conocidas en México de rotíferos, cladóceros y copépodos. La biogeografía de algunos copépodos sugiere una fuerte afinidad de la península con el Caribe insular.



Fig. 12 Cenote Dos Ojos

Debido al proceso de formación de un cenote abierto, las especies originalmente cavernícolas pudieran haber sido reemplazadas evolutivamente por otras adaptadas a cenotes abiertos. En cuanto a los anfípodos, los de la península se derivan en su mayoría de formas marinas, probablemente atrapadas durante el retroceso del mar en las últimas decenas de miles de años.

Los acociles del género *Typhlatya* son comunes en las cuevas de toda la península; tienen también un antepasado marino caribeño. El descubrimiento en cuevas cerca de Tulum del termosbenáceo *Tulumella unidens* es relevante porque complementa otros registros de este pequeño grupo en las islas caribeñas, el sureste de los Estados Unidos, las Islas Canarias, el Mediterráneo, Somalia y Camboya. Ésta distribución ha sido considerada evidencia de su origen en el mar de Tethys, que separaba los continentes de Laurasia y Gondwana en el Jurásico. También es interesante el registro del remipedio *Speleonectes tulumensis*, perteneciente al grupo de crustáceos más antiguo.

En cuanto a los vertebrados, en los cenotes pueden habitar cocodrilos, iguanas, tortugas, culebras, ranas y sapos, en sus paredes anidan golondrinas y otras aves. La fauna de peces es especialmente diversa en los cenotes más costeros. Los sitios más aislados en los terrenos más antiguos no inundados durante las últimas elevaciones del nivel del mar, sólo han sido colonizados por dos especies: un bagre y un gupi. Se considera que el bagre pudo alcanzar estas localidades por vía subterránea, mientras que el gupi, pez pequeño y vivíparo de gran tolerancia a extremos de salinidad, temperatura y concentración de oxígeno disuelto, pudo llegar allí gracias a una hembra grávida transportada por un huracán.

En los cenotes costeros, la ictiofauna es similar a la de las lagunas de la misma región. Predominan las mojarra y la familia de los gupis y molis, aunque las especies más abundantes son sardinitas (*Astyanax*) y el bagre ya mencionado. En los sistemas asociados con caletas se presentan invasores marinos, sobre todo en estadios juveniles, como pargos, gobios, agujas e incluso sábalos. Las mojarra y el bagre tienen poblaciones relativamente diferenciadas, algunas de ellas propuestas como subespecies; aunque el *status* taxonómico de la mayoría es discutible, el principio de precaución ha llevado a enlistarlas como taxones vulnerables a la extinción, en vista de lo reducido y aislado de sus hábitats. Algunas probablemente han desaparecido ya, como la mojarra *Cichlasomaurophthalmus conchitae*, cuya única localidad conocida es un cenote dentro de la ciudad de Mérida, no existiendo más.

Las tramas alimentarias de los cenotes son relativamente simples; están caracterizadas por pocos niveles tróficos que transfieren de manera eficiente la energía. Las bacterias, hongos, algas y protozoos son los primeros niveles, consumidos por micro y macroinvertebrados.

La mayoría de las especies muestra resistencia a la hambruna, en respuesta a la escasez de recursos alimentarios. Las algas y otras plantas sostienen la trama alimentaria herbívora, en complemento con la materia particulada procedente de la selva circundante, enriquecida por bacterias y asimilada por copépodos, que son el alimento de peces como *Astyanax*, que a su vez es la presa principal de depredadores como la anguila. El bagre, omnívoro en otros tipos de hábitat, en los cenotes es también un depredador de importancia; a través suyo y de otros peces, el cenote exporta energía al medio exterior, vía la alimentación de cigüeñas y otras aves.

Los cenotes se usan principalmente como fuente de agua potable en zonas rurales, sin embargo, cada vez más cenotes tienen también uso turístico; éste puede ser escénico como el Cenote Sagrado de Chichén Itzá, suelen también aprovecharse para la natación y el buceo como muchos en el corredor Cancún-Tulum, o tener ambos objetivos, como el cenote Azul de Bacalár. El uso pesquero de los cenotes es irrelevante si se mide en términos de divisas generadas; sin embargo, puede jugar un papel decisivo en el aporte de proteínas animales, virtualmente gratuitas para la población rural. Las especies más apreciadas son las mojarras, en especial la rayada, la pinta y la bocona o tenguayaca. Hay sitios donde se consumen inclusive los gupis y *Astyanax*, secos y salados.

El crecimiento poblacional en Mérida, Cancún, y La Riviera Maya agravado por la explosión turística, ha traído consigo una extracción más intensa de agua, con la consecuente intrusión salina, así como una mayor contaminación por materia orgánica y metales pesados de tales acuíferos. El agua dulce subterránea es una capa muy delgada que flota sobre una capa de agua marina, la cual alcanza hasta 100 kilómetros tierra adentro.

La permeabilidad de las rocas yucatecas contribuye a la escasez del agua porque se filtra hasta grandes profundidades; la ausencia de corrientes superficiales aumenta la dependencia sobre el manto acuífero, siendo lo más grave: la disposición de desechos en el terreno, llevando consigo una altísima probabilidad de infiltración de contaminantes hasta el agua subterránea. En el caso del área de Mérida, el flujo principal va de sureste a noroeste, pero en ocasiones el sentido se revierte, lo que devuelve los desechos al manto acuífero de la ciudad.

Por otro lado, los cenotes son aun más vulnerables que el acuífero, pues los contaminantes no llegan a ellos sólo a través del subsuelo, sufriendo transformaciones, sino también directamente, ya que tienen contacto con la superficie y en su mayoría conexiones con mas afluentes subterrneos. La incorporación de materia orgánica no sólo alteraría el equilibrio del ecosistema cenotícola, sino que también inutilizaría el agua para consumo humano, sin contar la pérdida estética al sustituir aguas cristalinas por aguas turbias y malolientes.

La geología y el clima favorecen la sobrevivencia y desarrollo de organismos patógenos en el agua subterránea; no es extraño que las enfermedades gastrointestinales sean una causa importante de muerte en la región. Las granjas porcícolas, el fecalismo al aire libre y la mezcla del drenaje doméstico con el pluvial han deteriorado la calidad bacteriológica del agua subterránea de la península. Asimismo, se encuentran residuos de plaguicidas organofosforados, carbámicos y

organoclorados, procedentes de las zonas hortícolas de Yucatán en pozos de agua potable. Es muy probable que lo mismo ocurra en las zonas cañeras de la zona sur de Quintana Roo y que ello repercuta en los cenotes.

Estos problemas difícilmente serán remediables debido a lo inaccesible del manto acuífero y a la poca inversión para investigarlo; sin embargo es indispensable disminuir el deterioro de la calidad del agua subterránea. Para ello se sugiere: espaciar los pozos y no sobreexplotarlos para evitar la intrusión salina; tratar los residuos sólidos; supervisar el uso de plaguicidas; tratar el agua para consumo humano con procesos adicionales a la cloración, y restringir el uso del agua extraída de zonas de alta contaminación al riego u otros fines similares como la ciudad de Mérida.

Por otra parte, aunque la problemática mencionada debe atacarse integralmente, el manejo adecuado de cada cenote en particular tendrá consecuencias positivas locales. Es preciso evitar el retiro de la vegetación que lo circunda pues proporciona refugio y alimento para los peces, tortugas y otros organismos, además de ser una fuente principal de energía del sistema. También debe prohibirse el baño con aceites bronceadores que se acumulan en la superficie del cenote y pueden causar problemas de oxigenación, dada la proporción entre superficie y volumen de estos cuerpos de agua, amén de otros efectos contaminantes.

Finalmente, debería limitarse el número de bañistas durante la época en que ciertas mojarras cuidan en pareja a su progenie pues, ante la perturbación, los padres pueden abandonar a los alevines, que son inmediatamente devorados por otros peces, incluso por la misma especie. Esta restricción tendría la ventaja de mantener en niveles aceptables la contaminación por bacterias, la cual es directamente proporcional al número de visitantes.

Por otro lado, los cenotes no constituyen embalses adecuados para fines acuiculturales. La introducción de especies exóticas, generalmente perniciosas en cualquier ecosistema natural, es más grave en cuerpos de agua de área pequeña, donde la tilapia, por ejemplo, puede volverse el pez dominante del sistema en un lapso menor que en lagunas más extensas.

A lo largo de la costa del sector norte del Caribe, los exploradores mexicanos y extranjeros han cartografiado más de 600 km de galerías y túneles inundados, usando técnicas de espeleobuceo y reconociendo diferentes niveles y pasajes verticales, que incluyen las cinco cuevas sumergidas más grandes del mundo, resultado de la disolución de volúmenes grandes de roca disuelta por la mezcla y haloclina. Esta disolución se asocia a las variaciones del nivel del mar a lo largo de miles de años. Los ríos subterráneos de dimensiones inmensas drenan la lluvia que cae al interior de la península. El agua transportada drena en la costa a través de caletas como Xel-Há, Xcaret y manantiales submarinos en los ríos.

En contraste, la zona de Mérida y la costa norte no presentan un desarrollo tan extenso de flujos subterráneos, aunque tiene el mayor número de cenotes de la península, en lo que se ha denominado el anillo de cenotes, el cual coincide con el diámetro externo del cráter Chicxulúb. Los descensos en el nivel del mar durante el Holoceno obligaron tanto a humanos como a parte de la fauna a ingresar a las cuevas para acceder al acuífero, lo cual explica los registros paleontológicos y antropológicos que hoy encontramos en el subsuelo de la península.

En los últimos años ha surgido una investigación extranjera y nacional ardua sobre localización de estas formaciones, especialmente en hallazgos de ríos subterráneos, resaltando numerosos

descubrimientos de estos. Debido a la alta permeabilidad del subsuelo, existe la formación de ríos subterráneos, con actividad propia y estos son representativos de la península de Yucatán a nivel mundial, muchos de estos son aprovechados con fines turísticos y para la práctica de deportes extremos; recientemente el periódico La Jornada publicó un artículo que expone el descubrimiento del río subterráneo mas largo del mundo ubicado en el estado de Quintana Roo, con una longitud aproximada de 154 km y una profundidad máxima de 72 m. Dicho artículo se encuentra disponible en el apéndice de esta tesis.



Fig. 13 “Río Secreto”(Playa del Carmen, Quintana Roo)



Fig. 14 Río subterráneo (Parque ecológico Xcaret, Quintana Roo)

Ya conocidos los procesos geomorfológicos, teorías e investigaciones mencionadas en los párrafos anteriores que dan respuesta a la geomorfología actual de la Península de Yucatán, las características de su relieve kárstico y sus formaciones a lo largo de la historia, principalmente abarcando la era Cenozoica en sus periodos terciario y cuaternario, será importante mencionar lo correspondiente al siguiente capítulo de este trabajo, ¿que tipo de material presenta el subsuelo de la Península de Yucatán?, y la ubicación geográfica actual de estos materiales.