



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

La Plataforma de Yucatán y sus recursos naturales del subsuelo como parte del libro digital: Las cuencas sedimentarias de México y sus recursos naturales del subsuelo

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Miriam Itzel Ortiz Lozano

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Ing. Gabriel Salinas Calleros



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



Este trabajo de titulación fue realizado dentro del marco del Programa de Apoyo a Proyectos Para Innovar y Mejorar la Educación, de la UNAM (**PROYECTO PAPIME PE102024**), consistente en la elaboración del libro digital **“LAS CUENCAS SEDIMENTARIAS DE MEXICO Y SUS RECURSOS NATURALES DEL SUBSUELO”**.

Índice

Resumen.....	4
Abstract.....	4
Introducción.....	5
Capítulo I: Cuencas sedimentarias.....	6
1.1. Definición.....	6
1.2. Clasificación de Cuencas Sedimentarias.....	7
Capítulo II: Plataformas sedimentarias	10
2.1. Definición.....	10
2.2. Clasificación de Plataformas sedimentarias.....	11
Capítulo III: Generalidades.....	15
3.1. Ubicación.....	15
3.2. Estado del arte	16
Capítulo IV: Desarrollo	17
4.1. Tipo de plataforma	17
4.2. Descripción general.....	18
4.3. Sedimentología	19
4.4. Estratigrafía.....	20
4.5 Geología estructural	25
4.6. Contenido paleontológico.....	27
4.7. Evolución Geológica.....	29
4.8. Modelo de la plataforma.....	29
Capítulo V: Consideraciones económicas.....	30
5.1. Hidrocarburos.....	30
5.2. Minerales.....	33
5.3. Hidrogeología	34
Conclusiones y recomendaciones.....	39
Bibliografía.....	40

Resumen.

La Plataforma Calcárea de Yucatán se localiza al sur de México, abarca la plataforma continental y la península de Yucatán extendiéndose hasta Guatemala y Belice, siendo la segunda provincia más grande del país con aproximadamente 300,000 km²; se clasifica como una plataforma carbonatada no bordeada constituida principalmente por rocas del Cretácico depositados en un ambiente de margen pasivo que ha venido emergiendo desde hace muchos millones de años. Gran parte del área se encuentra protegida por lo cual se debe preservar y restaurar debido a que se tiene gran aprovechamiento social y económico, ayudando a conservar la calidad del agua en los acuíferos, siendo estos de gran importancia debido a que en la península no se cuenta con corrientes superficiales debido a la presencia de rocas que se disuelven con mucha facilidad, al alto nivel de fracturamiento originando un paisaje kárstico. Se cree que existe un enorme potencial de hidrocarburos en el área costa fuera de la plataforma, razón por la cual la industria está interesada en ella; así como el área del cráter de Chicxulub por la presencia de Litio.

Abstract.

The Yucatan Calcareous Platform is in the south of Mexico, it covers the continental shelf and the Yucatan Peninsula, extending to Guatemala and Belize, being the second largest province in the country with approximately 300,000 km²; it is classified as a non-bordered carbonate platform made up mainly of Cretaceous rocks deposited in a passive margin environment that has been emerging for many millions of years. Much of the area is protected, so it must be preserved and restored because it has great social and economic use, helping to conserve the quality of water in the aquifers, these being of great importance because on the peninsula there is not There are surface currents due to the presence of rocks that dissolve very easily, the high level of fracturing, creating a karst landscape. It is believed that there is enormous hydrocarbon potential in the off-shelf offshore area, which is why the industry is interested in it, as well as the Chicxulub crater area due to the presence of Lithium.

Introducción.

Un ambiente sedimentario en un lugar geográfico donde se acumulan sedimentos. Cada uno se caracteriza por una combinación de procesos geológicos (sedimentarios) y condiciones ambientales (físicas, químicas y biológicas) que la diferencian de otro tipo de ambiente.

La plataforma, es una estructura en la que las capas sedimentarias tienen una pendiente muy ligera, es la parte sumergida de los bloques continentales que se extiende desde el límite de la bajamar hasta el talud continental y cuya característica es la dispersión a que están sometidos los sedimentos principalmente por la acción del oleaje, mareas, corrientes marinas y tormentas. La litología varía desde el predominio de arenas en las zonas más agitadas y próximas a las zonas de aporte (costas), y limos y arcillas finas en las zonas más alejadas y de baja energía.

Debido a sus características, el flujo del agua es completamente subterráneo y fundamentalmente radial que va de sur a norte, hacia las zonas de costa. Una de las principales características de la hidrología de Yucatán es la presencia de cenotes, cuerpos de agua formados por disolución y colapso de la roca.

La Plataforma de Yucatán, se compone de rocas generadoras carbonatadas de la Formación Cobán del Cretácico Inferior- Medio y de rocas almacenadoras carbonatadas del Cretácico. Las trampas son estructurales sutiles y estratigráficas. Aunque el sistema petrolero es clasificado como especulativo, ya que cuenta con escasa información geoquímica, se han perforado pocos pozos que han cortado rocas carbonatadas y evaporíticas de plataforma del Cretácico Inferior las que tienen posibilidades de ser rocas generadoras en base a los resultados de análisis geoquímicos de algunas manifestaciones superficiales, por otro lado es posible considerar la extensión de este sistema a las rocas del Cretácico Medio por tener características similares ambas rocas.

Capítulo I: Cuencas sedimentarias

1.1. Definición

Partiendo de la **Figura 1** una cuenca se refiere a una depresión natural delimitada por un terreno elevado. Las cuencas se pueden dividir en tres tipos: cuencas hidrográficas, cuencas hidrológicas y cuencas sedimentarias.

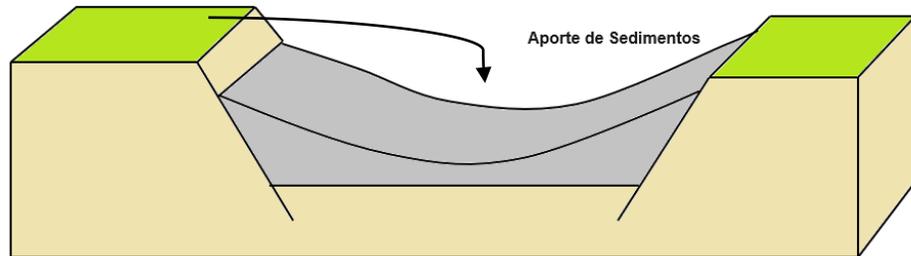


Figura 1. Cuenca sedimentaria. Elaboración propia.

Las hidrográficas tienen un área topográficamente definida en la que el agua de lluvia se acumula y circula hacia una corriente principal, permitiendo que todo el flujo drene a través de una salida. Las cuencas hidrológicas, por otro lado, son más completas y cubren toda la estructura hidrogeológica del acuífero que es uno de los elementos principales; un acuífero es aquella estructura geológica subterránea con propiedades de almacenamiento y transmisión de agua.

Para definir lo que es una cuenca sedimentaria dividimos el concepto en dos partes:

Morfológico	Depresión natural de la corteza terrestre, de tamaño variable, donde se acumula material erosionado de otros lugares.
Geológico	Resultado de los movimientos de la corteza terrestre que crean zonas topográficamente más bajas que otras, las cuales son saturadas por sedimentos.

Loza (2014) define una cuenca sedimentaria como:

Una depresión en la parte externa de la corteza terrestre, de tamaño variable donde se acumulan los sedimentos, los cuales generalmente se encuentran ligeramente inclinados hacia el centro. Las cuencas sedimentarias también se definen como áreas de topografía negativa donde se acumulan sedimentos, que posteriormente forman sucesiones estratigráficas. (p.21)

Las cuencas sedimentarias cambian dependiendo de su forma y tamaño, influido por factores geológicos, tectónicos, ambientales, así como también climáticos, en **la Figura 2** se muestran algunos:

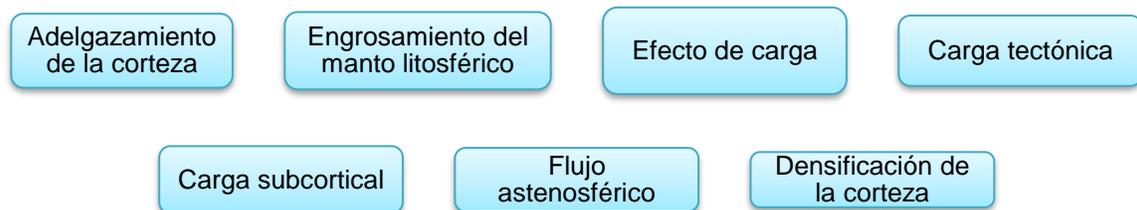


Figura 2. Factores Geológicos que forman una cuenca sedimentaria. Elaboración propia.

1.2. Clasificación de Cuencas Sedimentarias

En (1974) Dickinson publicó su clasificación tomando en cuenta el tipo de límite de la placa tectónica, al ser una de las primeras clasificaciones, varios autores han propuesto modificaciones e implementaciones dependiendo de que se toma como referencia, por lo tanto, existen diversas maneras para poder clasificarlas. A continuación, en **la Figura 3** se presenta la clasificación teniendo en cuenta el **ambiente tectónico**.

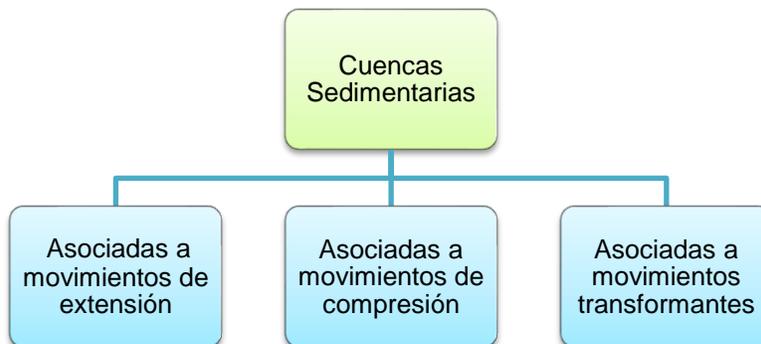
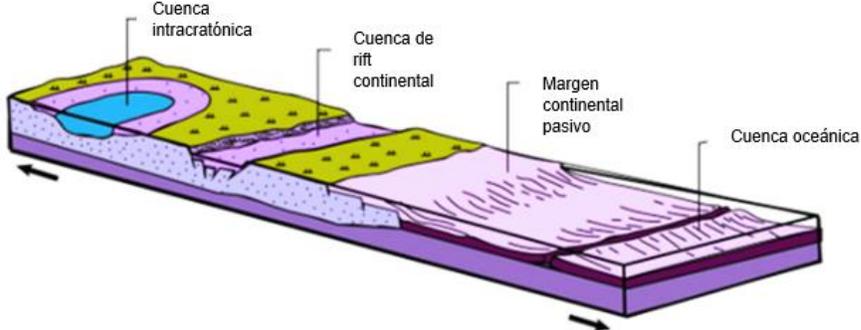


Figura 3. Clasificación de las Cuencas Sedimentarias. Elaboración propia.

Como podemos observar en la **Figura 4** la formación de las cuencas asociadas a **movimientos de extensión** es debido a un movimiento de placas tectónicas donde la corteza terrestre a medida que se desplaza se hace más delgada, haciéndola propensa a que se acumulen nuevos sedimentos siguiendo el principio de horizontalidad. Dentro de esta clasificación encontramos la siguiente **Tabla 1**:

Tipo	Descripción
Cuencas Intracratónicas (Aulacógenos)	Se ubican dentro de un bloque continental interno el cual resulta inactivo, que se originó por una distensión cortical.
Cuenca de Rift continental	“Las cuencas de rift continental se desarrollan en la corteza continental en un ambiente continental; si el proceso continúa se puede desarrollar una cuenca oceánica naciente limitada por un margen pasivo” (Loza, 2014, p.30).
Cuencas Oceánicas	Según Ingersoll (2012) “las cuencas oceánicas son incipientes con piso de nueva corteza oceánica y flanqueadas por márgenes continentales de rifts jóvenes” (p.24). “El rifting continental evoluciona a expansión del piso oceánico únicamente cuando hay ausencia significativa de sedimentos, por lo que esa corteza oceánica es el único material sólido con el cual pueden interactuar los magmas astenosféricos que se elevan” (Einsele, 1985, Nicolas, 1985).
 <p>Figura 4. Cuencas asociadas a movimientos de extensión. Modificado de: Earth and Environmental Sciences por Univ. of Illinois at Chicago</p>	
Cuencas de Margen pasivo	Las cuencas de Margen Pasivo son depresiones de la corteza terrestre sujetas a subsidencia en las que ocurre la acumulación de sedimentos en zonas estables o en margen, es de tipo Atlántico; se encuentran en todas las fronteras del océano y continente que no están asociadas a límites de placas tectónicas activas (Segura, 2015, p.1).

	<p>Lorenzo y Morato (2018) las definen como:</p> <p>Zonas de transición entre la corteza continental y oceánica, corresponden a la litosfera continental que ha sido fracturada y adelgazada por fallas normales desde las primeras etapas del rifting. El margen pasivo está formado por una plataforma y un talud continental, por lo que es una importante zona de depósito. El tipo de sedimento depende de la proximidad a las fuentes geológicas y del clima local. (p.61)</p>
Cuencas de arco trasero (retroarco)	<p>“Se consideran cuencas extensionales que se originaron tras el arco magmático continental, donde se tiene un ángulo alto de subducción” (Lorenzo y Morato, 2018, p.63).</p>

Tabla 1. Clasificación de las cuencas sedimentarias con movimientos de extensión. Elaboración propia.

En las cuencas asociadas a **movimientos de compresión** los esfuerzos son de forma horizontal ya sea por colisión o subducción entre placas, se encuentran localizadas a lo largo de márgenes convergentes como se puede observar en la **Figura 5**. Los diferentes tipos de cuencas que se desarrollan en este ambiente tectónico se muestran en la **Tabla 2**:

Tipo	Descripción
Cuencas de Trinchera (Trench)	<p>Estas cuencas se localizan en el área donde la placa subductora entra en contacto con la placa superior se caracterizan por ser estrechas y alargadas, así como curvas debido a la flexión de la placa que se dobla a medida que entra una bajo la placa suprayacente. (Lorenzo y Morato, 2018, p.58)</p>
Cuencas antearco (Forearc)	<p>Loza (2014) menciona de Romero que las cuencas de antearco “se forman entre el prisma de acreción y el arco volcánico, su subsidencia se encuentra marcada por la carga de sedimentos” (p.40)</p>
Cuencas de antepaís (Foreland)	<p>Las cuencas Foreland es un término usado para describir una cuenca que se ubica entre un cinturón orogénico y un cratón (Allen [et. al.], 1986).</p> <p>Según Lorenzo y Morato (2018) se forman cuando:</p> <p>Una placa de corteza oceánica subduce bajo corteza continental, la compresión flexiona la corteza continental anterior al arco volcánico generado por la fusión parcial de la corteza por la subducción (p.58).</p>

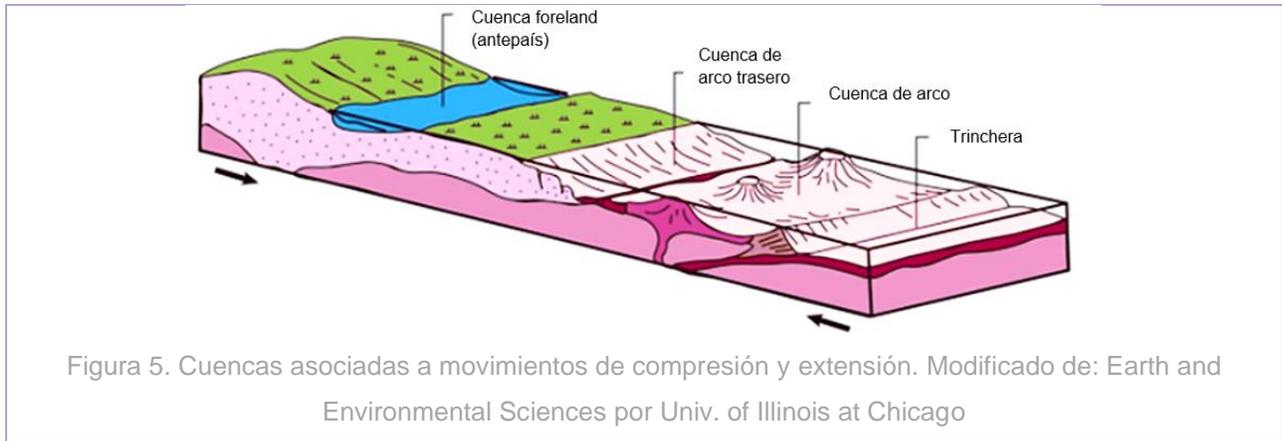


Tabla 2. Clasificación de las cuencas sedimentarias con movimientos de compresión. Elaboración Propia.

Por último, tenemos a las cuencas asociadas a **movimientos transformantes** como ejemplo tenemos las pull apart **Figura 6** que se describe en la **Tabla 3**:

Tipo	Descripción
Cuenca pull apart	Estas cuencas son resultado de un movimiento de placas tectónicas de manera paralela lo cual hace un desgaste entre ellas.

Figura 6. Cuencas asociadas a movimientos transformantes. Modificado de: Earth and Environmental Sciences por Univ. of Illinois at Chicago.

Tabla 3. Clasificación de las cuencas sedimentarias con movimientos transformantes. Elaboración Propia.

Capítulo II: Plataformas sedimentarias

2.1. Definición

Tal y como se muestra en la **Figura 7** la plataforma continental es un área oceánica que va desde la costa hasta la pendiente, dando paso al talud continental (profundidades alrededor de 200 m). Pueden ser marginales o pericontinentales y de mares someros. La litología es variable, desde arenas, limos y arcillas. Dependiendo del tipo de sedimento se distinguen las plataformas terrígenas y las carbonatadas. También es

característica la presencia de bioturbación y abundantes fósiles (bioclastos, intraclastos, pellets) principalmente en las de tipo carbonatadas.

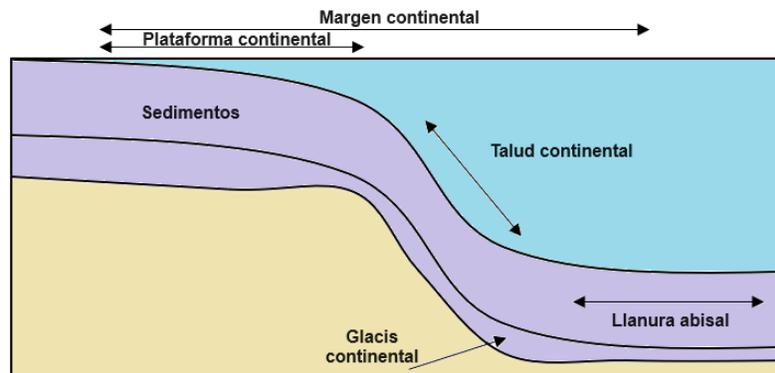


Figura 7. Plataforma continental. Elaboración propia.

El talud continental conecta la plataforma con la llanura abisal; es una zona de tránsito de sedimentos, así como también se depositan restos de organismos planctónicos y granos muy finos.

La zona donde se atenúa la pendiente antes de llegar a la llanura abisal se llama pie de talud, aquí se sedimentan los depósitos inestables deslizados por gravedad a lo largo del talud. En su desembocadura las acumulaciones de sedimentos adoptan una morfología de abanico, denominados abanicos submarinos. Los abanicos profundos se llaman también turbidíticos, pues son formados por las corrientes de turbidez que dan lugar a un tipo de rocas llamadas turbiditas.

La llanura abisal es la superficie más plana y horizontal de la Tierra. El único material detrítico que llega a la parte más cercana al talud son las facies arcillosas más lejanas de las turbiditas. En el resto de la llanura la sedimentación consiste en la acumulación lenta de caparazones de organismos plantónicos.

2.2. Clasificación de Plataformas sedimentarias

“Se han propuesto varias clasificaciones de plataformas teniendo en cuenta la morfología, criterios geofísicos, y otros factores que se suponen determinantes para el espectro sedimentario” (Archie, 2010 p.506).

En función de la tectónica y el clima Shepard (1977), las clasifica conforme a la **Tabla 4:**

Tipo	Descripción
Áreas glaciadas	“Los sedimentos que forman esta plataforma fueron producidos por la erosión glaciaria, así como por agua de deshielo y depósitos glaciares”. (Archie,2010, p.506).
Con arrecifes de coral	“Estas plataformas se encuentran en zonas marinas donde el agua es cálida y se tiene poca profundidad lugar ideal para encontrar corales que a su vez forman arrecifes” (Archie,2010, p.508).
Bordeadas por islas o bancos rocosos	Las islas y bajíos rocosos pueden darse en plataformas amplias o estrechas y los surcos que las separan tienden a rellenarse de sedimento fino. Su rasgo principal es que son estrechas y por ello, de pendiente media más elevada que las de los márgenes continentales pasivos. (Archie,2010, p.508)
Con barras alargadas de arena	“La parte interna de las plataformas suele presentar grandes barras de arena sobre las que migran ripples y megaripples” (Archie,2010, p.509).
Relacionadas con grandes deltas	En los márgenes continentales pasivos la plataforma se extiende como una prolongación del continente y progresa a partir del sedimento aportado por los ríos formando un prisma sedimentario en cuya parte alta actúan el oleaje y las corrientes que redistribuyen el sedimento. (Archie,2010, p.507)

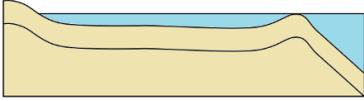
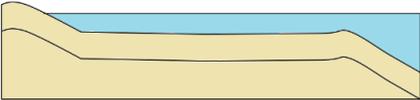
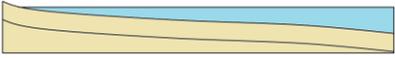
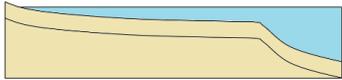
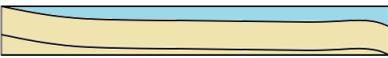
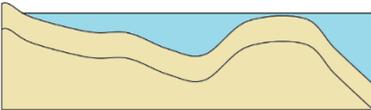
Tabla 4. Clasificación de las Plataformas sedimentarias. Elaboración Propia.

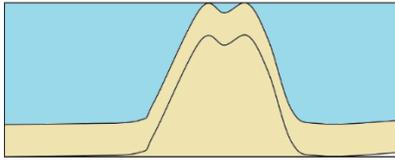
En el ambiente marino encontramos otra clasificación de plataformas dependiendo del sedimento ya sea carbonato o clástico.

Plataforma Carbonatada

El sedimento predominante es carbonatado (habitualmente cementado) formado en la propia plataforma. En muchas plataformas carbonatadas no existe un límite definido entre la plataforma y la costa. Los sedimentos carbonatados consiguen acumulaciones apreciables cuando el aporte de material terrígeno es bajo. La clasificación de plataformas carbonatadas más amplia y reconocida es la morfológica propuesta por

Flügel, (2010) que divide a las plataformas carbonatadas en 7 tipos que se muestran en la **Tabla 5**:

Tipo	Descripción
<p data-bbox="282 432 547 457">Plataforma bordeada</p> 	<p data-bbox="670 380 1433 590">Ginsburg y James (1974) afirman que estas plataformas “son someras con un borde exterior agitado por olas, se tiene presencia de un anillo morfológico (barrera de arrecifes, bancos de arenas, islas) que absorben la energía de las olas y producen un quiebre pronunciado en aguas profundas” (p.21).</p>
<p data-bbox="261 669 568 695">Plataforma no bordeada</p> 	<p data-bbox="670 617 1433 785">Torres de la Cruz (2019) las describe como “plataformas someras sin margen de barrera pronunciado. Se caracterizan por una circulación de agua abierta. La extensión ronda desde unos cuantos kilómetros a más de 100 km² (p.22).</p>
<p data-bbox="295 898 534 924">Rampa homoclinal</p> 	<p data-bbox="670 846 1433 1056">Read (1982) las definió como “plataformas someras, pericontinentales y epéiricas, caracterizadas por pendientes suaves y uniformes, profundizándose desde la zona costera de alta energía hasta facies más fangosas de aguas profundas, sin presentar quiebre marcado en la pendiente” (p.22).</p>
<p data-bbox="196 1077 636 1150">Rampas carbonatadas distalmente escarpadas</p> 	<p data-bbox="670 1077 1433 1203">Read (1982) “Son similares a las rampas homoclinales, pero presentan un incremento distinto en el gradiente de la región exterior de rampa profunda” (p.22)</p>
<p data-bbox="292 1325 540 1350">Plataforma epéirica</p> 	<p data-bbox="670 1272 1433 1482">Shaw (1964) menciona que son “mares someros cubriendo áreas cratónicas bastante extensas y planas. Dominada por facies de submarea e intermarea y ciclos perimareales. El margen hacia el océano puede ser suave (tipo rampa), escalonado (tipo margen de plataforma) o bordeado” (p.22)</p>
<p data-bbox="215 1556 615 1581">Plataforma carbonatada aislada</p> 	<p data-bbox="670 1503 1433 1766">Torres de la Cruz (2019) las describe como: Plataformas aisladas o separadas localizadas costa afuera de la plataforma continental y rodeada de aguas profundas. La mayoría de las plataformas aisladas tienen márgenes escalonados y pendientes hacia aguas profundas a muy profundas. (p.22)</p>
<p data-bbox="310 1835 521 1860">Atolón oceánico</p>	<p data-bbox="670 1793 1433 1871">Torres de la Cruz (2019) menciona que son formados en: Volcanes sumergidos o extintos elevándose cientos o miles de</p>



metros desde el piso oceánico. Se caracteriza por el levantamiento de anillos arrecifales, pendientes exteriores escalonadas e isletas inferiores de corales encerrando lagunas someras y profundas con arrecifes en forma de pináculo. Las estructuras elípticas o circulares están rodeadas por aguas profundas de mar abierto. (p.23)

Tabla 5. Clasificación de Plataformas Carbonatadas.

Existen otras clasificaciones como el origen de los carbonatos (precipitación biótica vs. abiótica), y la configuración tectónica del basamento, entre otros.

Plataforma Siliciclástica:

Las plataformas siliciclásticas almacenan sedimentos detríticos, principalmente arenas y arcillas que pueden provenir tanto de un río como de la erosión de otras formaciones (están relacionadas con ambientes costeros) se caracterizan por ser muy extensas.

En la **Tabla 6** se ejemplifica los dos tipos:

Tipo	Descripción
<p>Pericontinentales o marginales: Estrechas y rodean los continentes.</p>	<p>Para Archie (2010) las plataformas pericontinentales corresponden a dos tipos de márgenes continentales los pasivos y los convergentes (Figura 8).</p> <p>Los pasivos se asocian a rifting y subsidencia térmica y reciben el sedimento del drenaje del bloque continental fracturado y separado. Los convergentes cuya subsidencia se debe a la subducción, en los que el oleaje talla plataformas estrechas que, con aporte abundante, pueden acoger un prisma sedimentario cuneiforme adyacente al bloque bajo el cual se consume la placa y que actúa como área fuente de los sedimentos.</p>
<p>Epicontinentales o peiricos: en la mayoría son pasadizos de mar parcialmente confinado.</p>	<p>Se generan en relación con movimientos de placas en la corteza continental (cuencas de retroarco y otros tipos de cuencas cratónicas). Pueden incluirse en este tipo las cuencas de antepaís cuya subsidencia se debe al apilamiento de unidades tectónicas, de las cuales procede la mayor parte del aporte sedimentario Figura 8.</p>

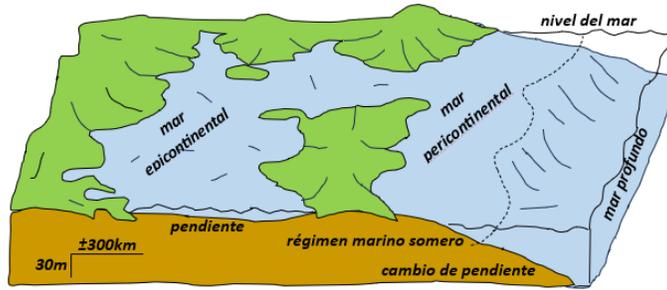


Figura 8. Tipos de mares someros. Modificado de: *Sedimentología* por Archie, 2010.

Tabla 6. Clasificación de las Plataformas Siliciclásticas.

Capítulo III: Generalidades

3.1. Ubicación

Gran parte de la Plataforma de Yucatán es marina, se encuentra al sur de México y comprende los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche, abarcando parte del Golfo de México y el Mar Caribe. Geológicamente también abarca territorio en Belice y Guatemala, pero para fines de este trabajo se omiten dichos Países extranjeros.

Su superficie terrestre es de 141,523 km² e incluye las coordenadas geográficas entre 17° 49' 00" y 21° 36' 00" de latitud norte y 86° 45' 00" y 91° 20' 00" de longitud oeste.

Su superficie total es de 323,000 km² en la **Tabla 7** se muestran la información obtenida de la “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán (3105), estado de Yucatán” de CONAGUA.

Estado	Superficie [km ²]	Peninsular [%]	Nacional [%]
Yucatán	39,340	27.8	1.9
Campeche	51,833	36.6	2.9
Quintana Roo	50,350		
Total	141,523		

Tabla 7. Estados que conforman la Plataforma de Yucatán. Adaptada de: Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Península de Yucatán (3105), estado de Yucatán por CONAGUA.

3.2. Estado del arte

El área de estudio ha sido parte de diversas investigaciones, entre los estudios más destacados se tiene la información de la Universidad Nacional Autónoma de México y PEMEX. A continuación, se muestra la **Figura 9** con algunos trabajos previos:

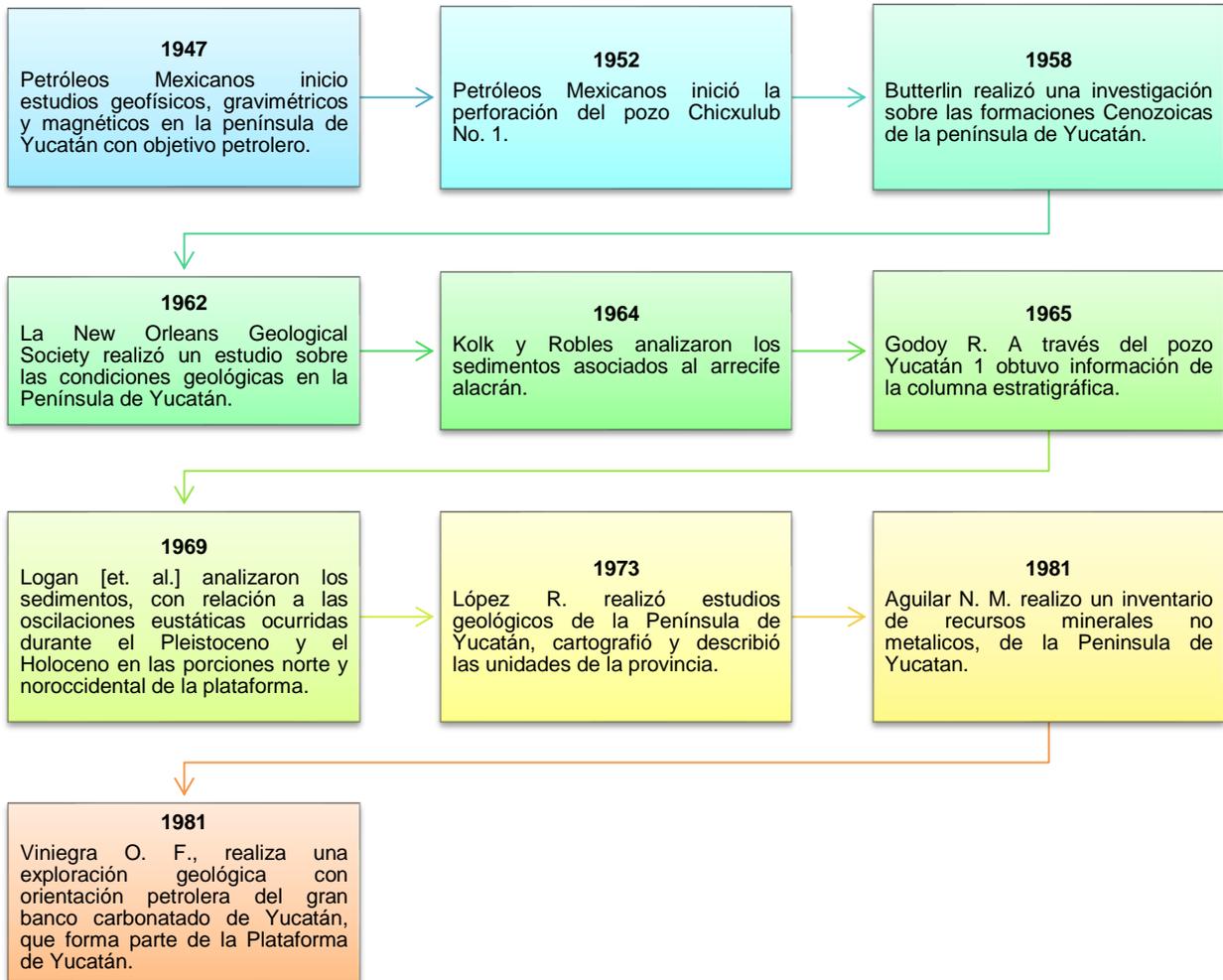


Figura 9. Trabajos realizados en la Plataforma de Yucatán. Elaboración Propia.

Capítulo IV: Desarrollo

4.1. Tipo de plataforma

La plataforma de Yucatán es considerada una gran plataforma calcárea, compuesta primordialmente de roca caliza, claro ejemplo de una plataforma abierta como se muestra en la **Figura 10**. Se caracteriza por tener rocas de edad cenozoica y también por estar compuesta de sedimentos marinos, depositados en un ambiente de plataforma de margen pasivo. En cuanto a la clasificación de Flügel se considera que Yucatán es un ejemplo claro de una plataforma carbonatada no bordeada.

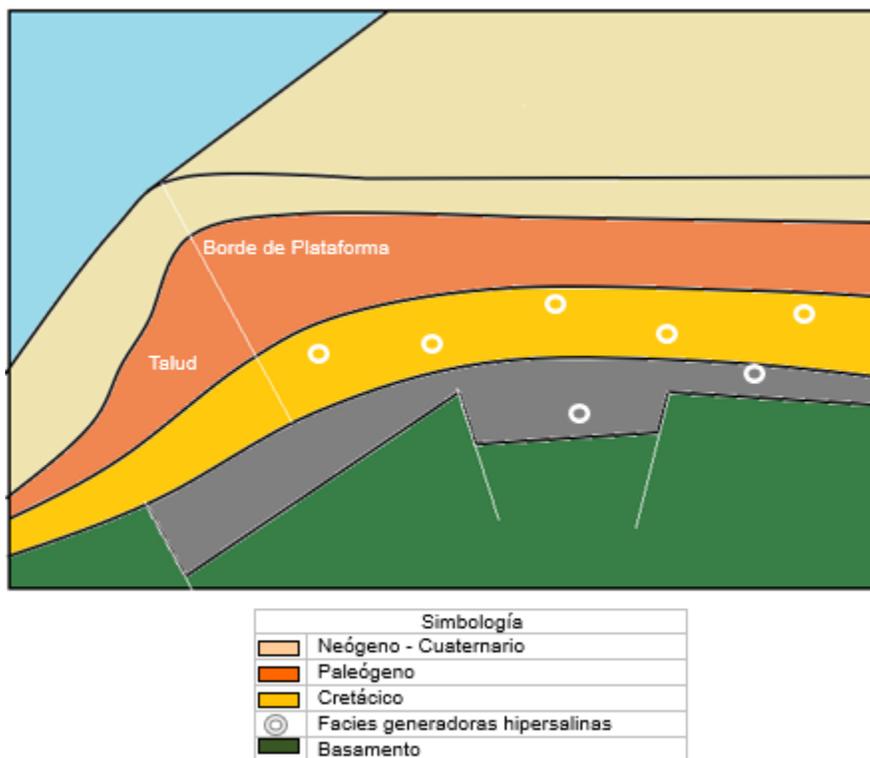


Figura 10. Modelo esquemático sedimentario de la Plataforma de Yucatán. Modificado de: Provincia petrolera plataforma de Yucatán por Petróleos Mexicanos, 2013.

4.2. Descripción general

De acuerdo con PEMEX los límites de la Plataforma de Yucatán son:

- Al Norte y parte Noroeste limita con el Escarpe de Campeche o también conocido como Banco de Campeche, que es un talud continental pronunciado que se extiende parte del noroeste a lo largo de la plataforma.
- Al oriente se tiene como frontera el Talud Continental del Mar Caribe, la cual presenta fallamiento.
- Al sur limita con Guatemala y Belice que se caracteriza por la presencia de bloques de basamento levantados como en los altos Cuchumatanes en la parte central-oeste de Guatemala y el levantamiento de las Montañas Mayas al sur de Belice.
- Al suroeste limita con la Provincia Petrolera Cinturón Plegado de Chiapas y las Provincias Geológicas de la Cuenca de Macuspana y el Pilar Reforma-Akal.

La **Figura 11** representa la forma y dimensión de la Plataforma.

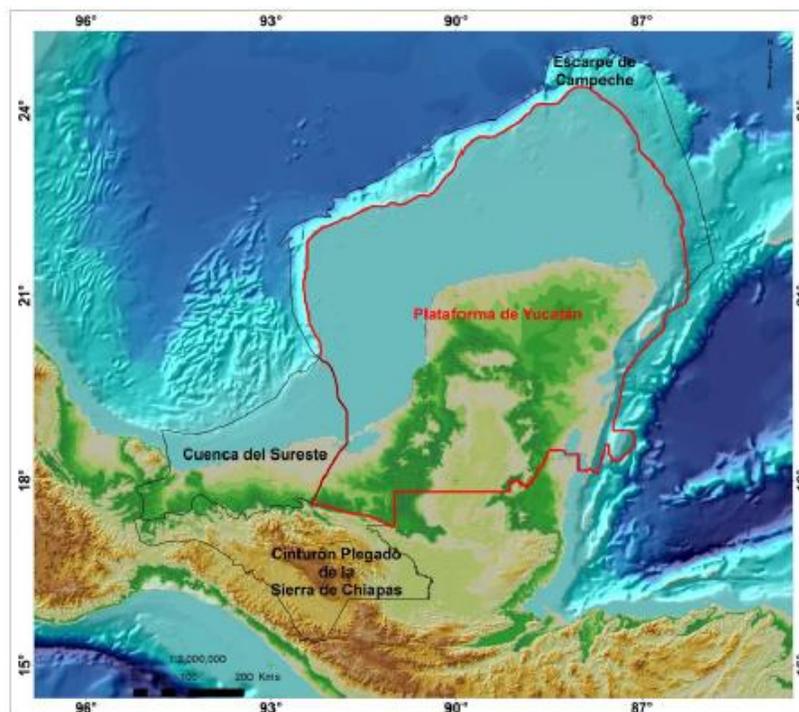


Figura 11. Límites de la Plataforma de Yucatán. Tomada de: Provincia petrolera plataforma de Yucatán por Petróleos Mexicanos, 2013.

4.3. Sedimentología

La Plataforma de Yucatán se caracteriza por suelos de roca caliza que se formaron a partir de la disolución y precipitación de carbonato de calcio que cemento granos y fragmentos de conchas que al ser expuestos a los agentes del intemperismo, se convirtieron en sedimentos; posteriormente, estos sedimentos se convirtieron en roca caliza a través de la diagénesis. Estos estratos corresponden a la era Cenozoica periodos Paleógeno-Neógeno y Cuaternario (Bonet y Butterlin, 1977).

La disolución de las calizas de Yucatán es resultado del ácido carbónico, la fuente del ácido son la descomposición bacteriana y la hidrólisis de las calizas.

Disolución por Carbonato de Calcio

El carbonato de calcio se disuelve cuando el pH del agua marina disminuye, a medida que se incrementa la profundidad es más fácil disolverse debido al aumento de la saturación de CO₂ adicionalmente la presión facilita el proceso. La profundidad a la cual la concentración de carbonato de calcio en el sedimento disminuye más rápidamente, es llamada profundidad de compensación de carbonato (Vera y Torres, 1987).

Precipitación de Carbonato de Calcio

El agua superficial esta super saturada de CaCO₃, los componentes orgánicos demoran la precipitación de carbonato de calcio. El proceso de precipitación del CaCO₃ inicia con partículas de carbonato y agua de mar en desequilibrio; a continuación, las moléculas orgánicas son absorbidas a través de un sistema de nucleación de bloques; una vez que los componentes orgánicos han sido removidos, la reacción se equilibra y se precipita carbonato de calcio. (Vera y Torres, 1987)

Diagénesis en Carbonatos

Diagénesis, son todos aquellos cambios físicos, químicos y bioquímicos que suceden en un depósito sedimentario desde su acumulación original hasta el comienzo del metamorfismo o hasta el inicio del intemperismo **Figura 12**. Estos cambios se llevan a cabo con presión y temperatura de superficie. La cementación, neomorfismo y la dolomitización son los principales procesos diagenéticos en carbonatos.

Según Purdy (1968) el agua meteórica que se filtra a través de las rocas carbonatadas inicialmente esta subsaturada de aragonita y la calcita, a medida que se produce la disolución preferencial, el agua se satura gradualmente con respecto a las menos solubles con bajo contenido de magnesio y calcita mientras que permanece saturado de aragonita más soluble y calcita con alto contenido de magnesio.

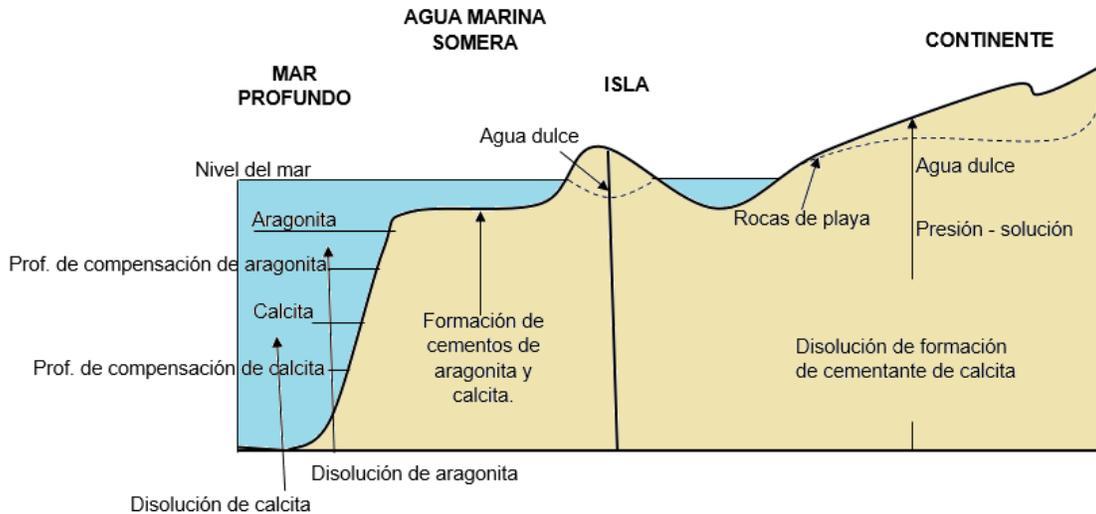


Figura 12. Ambientes diagenéticos de sedimentos carbonatados. Modificada de: Diagénesis de carbonatos por Vera y Torres, 1987.

4.4. Estratigrafía

La información estratigráfica se ha recopilado mediante la perforación de pozos exploratorios ubicados al norte del estado de Campeche, así como del estado de Yucatán y algunos más en límites de la frontera con Guatemala. Los análisis de núcleos y registros geológicos sirvieron para identificar y caracterizar las diversas capas rocosas y sedimentarias de la Península de Yucatán. La columna estratigráfica se muestra en la **Figura 13** y es resultado de la información recabada.

ERA	PERIODO	COLUMNA GEOLOGICA			PENINSULA DE YUCATÁN
		EPOCA		EDAD	NOMBRES FORMACIONALES
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		VERCILIANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL
		PLEISTOCENO		CALABRIANO	
		PLIOCENO	SUPERIOR	PLAISANCIANO	
	INFERIOR		ZANCLEANO		
	MIOCENO	SUPERIOR	MESSINLANO	BACALAR ESTERO FRANCO CARRILLO PUERTO	
			TORTONLANO		
		MEDIO	SERRAVALLIANO		
		INFERIOR	LONGHIENLANO		
			BURDIGALIANO		
	OLIGOCENO	SUPERIOR	AQUITANLANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL	
		MEDIO	CHATTIANO		
			RUPELIANO		
	EOCENO	SUPERIOR	PRIABONLANO	CHICHEN ITZA	
		MEDIO	BARTONLANO		
		INFERIOR	LUTETIANO		
	PALEOCENO	SUPERIOR	THANETIANO	ICAICHE	
		MEDIO	DANIANO		
			INFERIOR		
MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	MAASTRICHTIANO	COBAN	
			CAMPANIANO		
			SANTONIANO		
			CONIACIANO		
			TURONIANO		
		MEDIO	CENOMANIANO		
			ALBIANO		
		INFERIOR	APTIANO		
			BARREMIANO		
	HAUTERIVIANO				
	VALANGINIANO				
	JURASICO	SUPERIOR	BERRIASIANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL	
			TITHONIANO		
			KIMMERIDGIANO		
		MEDIO	OXFORDIANO		LECHOS ROJOS
CALLOVIANO					
BATHONIANO					
BAJUCIANO					
INFERIOR		AALENIANO			
	TOARCIANO				
	PLIENSCHACHIANO				
TRIASICO	INFERIOR	SINEMURIANO	SIN NOMBRE FORMACIONAL		
		HETTANGIANO			
PALEOZOICO	PERMICO		BASAMENTO		
	CARBONIFERO				
	DEVONICO				

Figura 13. Columna estratigráfica de la Plataforma de Yucatán. Tomada de: Provincia petrolera plataforma de Yucatán por Petróleos Mexicanos, 2013.

En la **Figura 14** se ha tomado en cuenta el tipo de roca que se encuentra en cada época:

HOLOCENO	Sedimentos calcáreos
PLEISTOCENO	Emergidos del cuaternario
PLIOCENO	Caliza masiva bioclástica
MIOCENO	Lutitas y limolitas Calizas fosilíferas recristalizadas margas y yeso.
OLIGOCENO	Calizas con alto contenido fósil
EOCENO	Calizas microcristalinas
PALEOCENO	Calizas dolomitizadas
CRETÁCICO	Roca fundida - Brecha de impacto Yeso, Lutitas, Limolitas y calizas
JURÁSICO	Rocas volcánicas, terrígenas, carbonatadas y evaporíticas. Cuerpos salinos, areniscas y calizas
TRIÁSICO	Secuencias sedimentarias de Lechos rojos: conglomerados, areniscas, lutitas y calizas.
PÉRMICO	Grupo volcánico sedimentario
PENSILVÁNICO	Calizas Lutitas, calizas y dolomías Conglomerado, areniscas y tobas
MISISÍPICO	Filitas y esquistos
DEVÓNICO	Mármol Gneis hornblenda

Figura 14. Columna estratigráfica de la península de Yucatán. Modificada de: López Ramos, 1975.

A continuación, se describen las épocas más importantes para esta formación:

Paleoceno o Eoceno no diferenciado

A esta unidad se asigna un grupo de rocas que no aportan fósiles identificables, pero que por su relación estratigráfica con la Formación Chichén Itzá se infiere que son de la misma o anterior edad, es decir Paleoceno o posiblemente Cretácico Superior. Se trata de calizas compactas marinas micro a macrocristalinas que varían en color del amarillo a blanco. A menudo están dolomitizadas o simplemente recristalizados, lo que explica por qué no hay fósiles o no se pueden identificar. Su relación estratigráfica con las Formaciones Icaiche y Chichén-Itzá sugiere que al menos parte de la roca caliza en cuestión tiene la misma edad que las Formaciones Icaiche y Chichén-Itzá y representa sus etapas laterales.

Formación Icaiche

Está formado por una capa de piedra caliza lacustre que contiene yeso y anhidrita. Las calizas o areniscas suelen estar erosionadas, en cuyo caso sólo la presencia de yeso distingue a las rocas del Eoceno-Paleoceno.

Formación Chichen- Itzá

Compuesto por calizas fosilizadas con ligeras variaciones litológicas, se puede dividir en tres miembros.

- Xbacal: Se representa por calizas amarillas, blancas y grises. Las capas van desde un espesor débil a mediano, en algunas zonas llegan a ser masivas, por lo que pueden pasar a verdaderas margas amarillas o incluso a lutitas verdosas.
- Pisté: Corresponde al Eoceno Medio y está conformado por calizas blancas o amarillas, a menudo masivas. Los echados son nulos o muy débiles y de orientación variable, a excepción del estado de Campeche en las que las calizas están plegadas en anticlinales.
- Chumbec: Corresponde al Eoceno Superior y se representa por calizas masivas, blancas muy cristalinas, con aspecto a mármoles sacaroideos. Su espesor no pasa de 100 m.

Mioceno Superior-Formación Bacalar

Corresponde a calizas margosas, blancas y amarillentas, poco compactas y con nódulos duros. Hacia las partes inferiores pasan a margas donde, en ocasiones, se encuentran finas capas de yeso. Esta formación aflora en la parte sur este del estado de Quintana Roo.

Formación Estero Franco

Constituida por calizas y dolomitas amarillas, muy cristalinas, en capas regulares a menudo delgadas (5 cm-10 cm) a veces con nódulos de calcita, de textura sacaroidea. Estas calizas forman la mayor parte de la orilla izquierda del Río Hondo. Esta formación

parece cubrir la formación Bacalar por tanto está comprendida entre el Mioceno Superior y el Pleistoceno.

En la **Figura 15** se puede apreciar el tipo de roca que aflora en cada sección geológica de la Península de Yucatán.

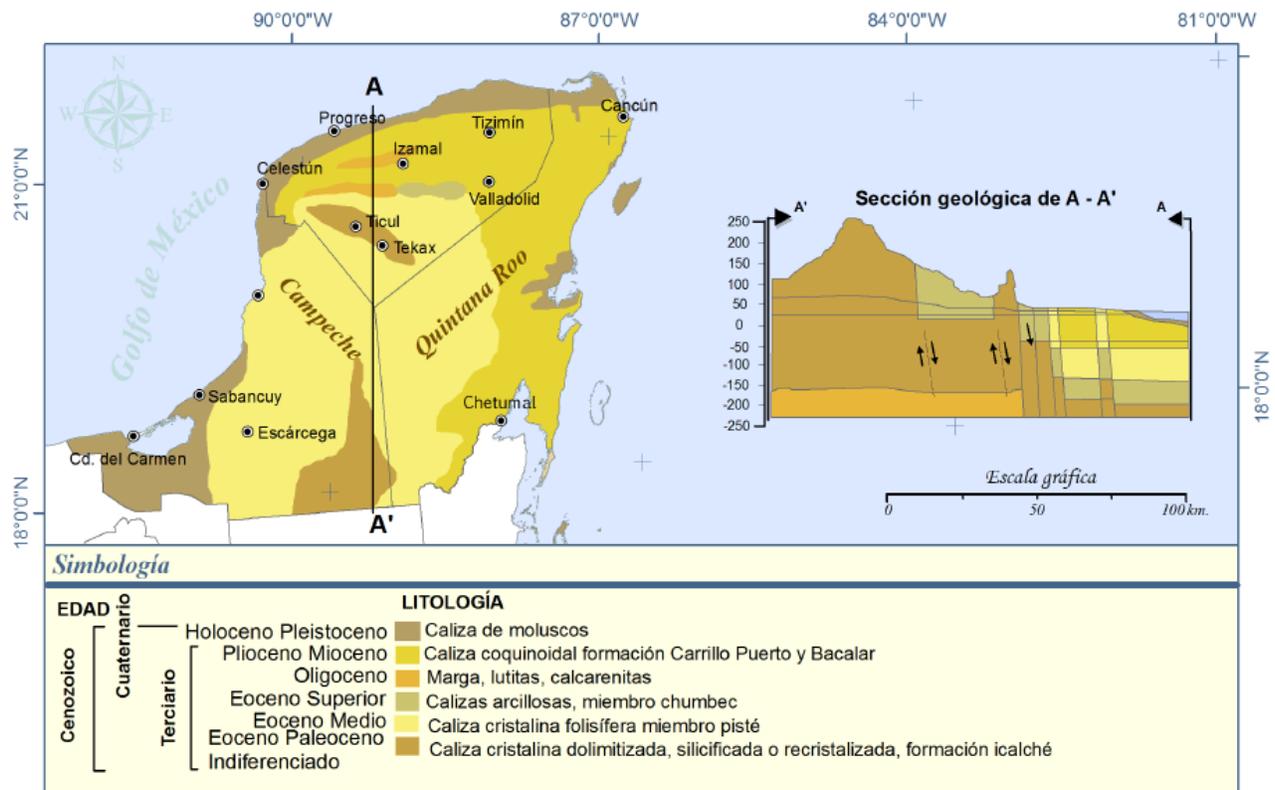


Figura 15. Clasificación geológica de la Península de Yucatán. Tomada de: Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán por Gil, G. y Castro, E., 2010.

Formación Carrillo Puerto

Corresponde al Mioceno Superior-Plioceno en 1985 fue reconocida por Butterlin. La capa inferior son coquinas de un metro de espesor cubiertas de densa roca caliza. Sobre esta capa hay roca caliza impura, a veces arcillosa, de color amarillento o rojizo. La parte superior de la formación está representada por roca caliza blanca, densa y masiva. Recubre la formación Bacalar que aflora en el estado de Quintana Roo, su espesor varía de 163 a 240 m aproximadamente.

Las rocas tienen una permeabilidad y porosidad alta, ya que se encuentran fracturadas. Se considera la formación más importante debido a su extensión y a la poca profundidad a la que se puede encontrar agua subterránea.

Pleistoceno-Holoceno Calizas de moluscos

Se ha utilizado esta denominación para las calizas conquíferas masivas, de color generalmente blanco o crema que forman una banda de afloramientos, más o menos amplia, a lo largo de las costas norte y Oeste de la Península, interrumpida solamente al Norte y al Sur de Campeche, en donde las formaciones del Eoceno se extienden hasta el mar.

4.5 Geología estructural

En la Plataforma de Yucatán presenta un paisaje kárstico **Figura 16**; el término karst es un concepto acuñado por el Geógrafo Jovan Cvijic en 1893, quien lo utilizó para definir accidentes geográficos, desarrollados en áreas dominadas por rocas relativamente solubles tales como las evaporitas (halita [NaCl], anhidrita [CaSO₄] y yeso [CaSO₄.2H₂O]) y las calizas (dominadas por CaCO₃).

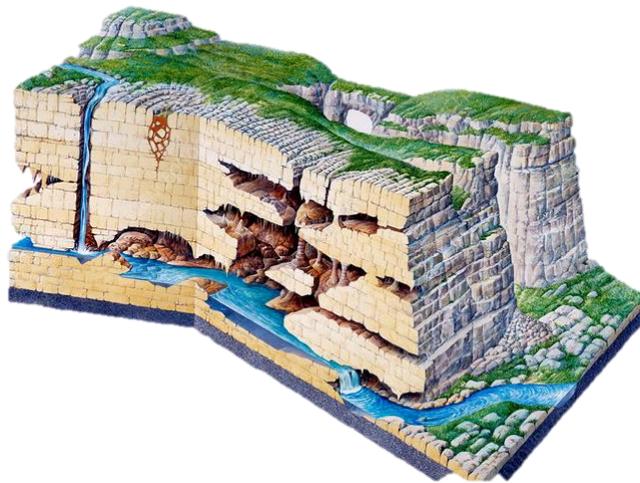


Figura 16. Paisaje kárstico. Tomado de: Gary Hincks.

La karstificación es el conjunto de procesos físicos y químicos que tienen como resultado la destrucción subterránea de montañas o rocas por disolución de calizas, dolomías o de yeso, como consecuencia se aumenta la permeabilidad de las rocas.

La disolución consta de tres procesos:

1. La disolución inicial se debe a que el agua de lluvia absorbe CO_2 de la atmósfera, lo cual la hace ácida y forma ácido carbónico; el agua de lluvia acidificada absorbe más ácido carbónico cuando entra en contacto con el suelo, donde la descomposición de la materia orgánica por medio de los microorganismos produce el ácido y aumenta la agresividad del agua.
2. La mezcla del agua salada y dulce aumenta en los cambios y en la haloclina la agresividad del agua sobre la roca y es considerado el proceso más potente de disolución.
3. La disolución mediada biológicamente puede ocurrir en el suelo o dentro del sistema de flujo subterráneo, donde el ácido sulfhídrico (H_2S) se genera por la descomposición microbiana de la materia orgánica y disuelve la roca desde la masa de agua.

Los karts tipo “holokarst” son los que se encuentran en la zona de estudio, y son aquellos donde toda el agua es drenada al subsuelo (Ford [et. al.], 1988); esto es debido al alto nivel de fracturación de la roca superficial y la porosidad de las rocas subsuperficiales que se encuentran en Yucatán (Lesser y Weidie, 1988) así como la falta de arcillas y margas sobre la caliza. Este fenómeno permitió la generación de un gran acuífero (*el acuífero de Yucatán*), el cual es la única fuente de agua potable en el estado y está conformado por un lente de agua dulce flotando sobre agua salada (Marín, Pacheco y Méndez, 2004), con intrusión de agua de mar reportada en la zona sur del anillo de cenotes y hacia el nororiente de la sierra de Ticul (Perry [et. al.], 2009).

De acuerdo con el (Servicio Geológico Mexicano, 2005) el paisaje kárstico es una de las principales características del área. Cabe destacar que el 95% del estado de Yucatán es paisaje kárstico asociado a roca caliza, México cuenta con 391,700 km^2 de zonas kársticas lo que representa el 15% del territorio y la mayor parte la encontramos en Yucatán.

En la Plataforma hubo dos etapas de formación de karst, una antigua, paleogénica, en una superficie elevada, con formaciones características de climas tropicales (conos cársticos); y otra Reciente, en la planicie, de hasta 20 cm - 30 cm de altura.

En la península de Yucatán se presentan rocas calcáreas marinas del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, según Weidie (1985) existen cuatro regiones fisiográficas, en donde todas sus rocas aflorantes en la superficie son carbonatos como se observa en la **Figura 17**.

El cuaternario aflora en zonas costeras y corresponde a depósitos calcáreos que han sido expuestos después de una ligera emersión de la Península.

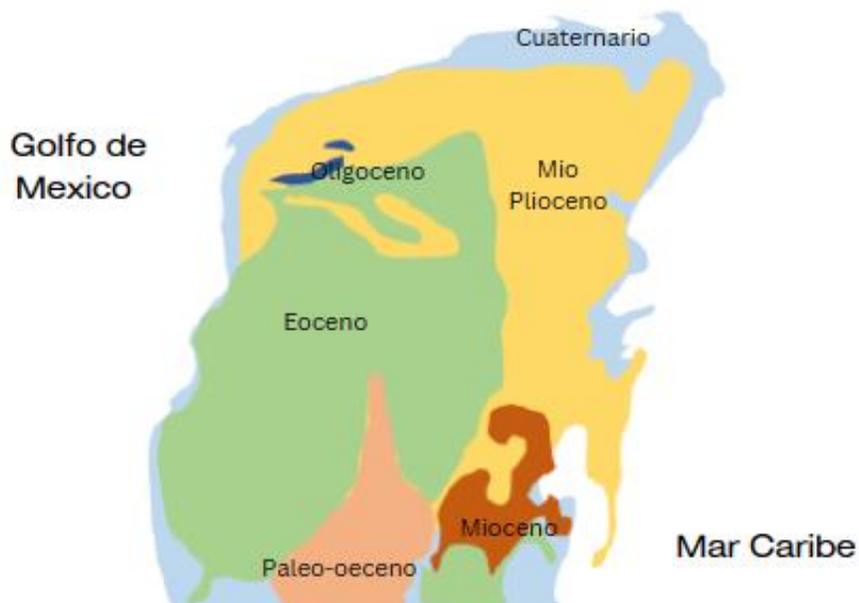


Figura 17. Geología simplificada de los carbonatos de Yucatán. Modificado de: Weidie, 1985.

4.6. Contenido paleontológico

Debido a que la Plataforma de Yucatán ha estado sumergida en el océano durante la mayor parte de su historia geológica, esto la convierte en un área favorable para la conservación de fósiles, dando un papel importante como cápsula del tiempo para México.

Meteorito Chicxulub

Dentro del área comprendida del cráter del meteorito Chicxulub, se han encontrado fósiles del Cretácico Superior (aproximadamente 100 hasta 66 millones de años).

Culturas prehispánicas

En la península de Yucatán se establecieron culturas prehispánicas por lo tanto se tiene como evidencia las zonas arqueológicas, la más conocida es la cultura Maya (2000 a.C. - 1500 d.C.) reconocida por su templo en Chichen Itzá; la zona sur de la Península de Yucatán también se encuentran registros de la cultura Chontal (1000 a.C. - 1500 d.C.) y al noreste la Cultura Puuc (600 d.C. - 1000 d.C.) su templo más conocido es Uxmal. Las culturas prehistóricas forman un papel importante para comprender la historia y evolución del hombre, como herencia cultural se tiene las ruinas, sistemas de escritura y conocimientos de ciencia y astronomía. Los mayas, en particular, son conocidos por su rico patrimonio cultural.

Cenote "Hoyo negro"

El cenote conocido como *hoyo negro* está ubicado en Tulum, Quintana Roo, fue descubierto en el año 2007, cuenta con 55 m de profundidad y 2 m aproximadamente de diámetro. Es reconocido por los restos fósiles encontrados que van de los 40 mil a los 10 mil años de antigüedad. Entre los ejemplares descubiertos se encuentran dientes de sable, osos, armadillos, tapires y otras especies, algunas de las cuales están extintas y otras se han adaptado a su entorno. Pero el fósil más importante catalogado son los restos humanos encontrados de Naia; una joven de 15-17 años que cayó al cenote hace unos 15 mil años, evento sumamente importante para comprender la evolución y origen de nuestros antepasados.

Los sedimentos depositados dentro de un karst pueden preservar restos arqueológicos o paleontológicos.

4.7. Evolución Geológica

La historia geológica de la Plataforma de Yucatán está relacionada con la apertura del Golfo de México, comenzando en el Triásico Superior con la ruptura de lo que se conoce como Pangea y que se puede observar en la **Figura 18**, este evento continuó en el Jurásico Medio, Temprano y Tardío.



Figura 18. Deriva continental. Tomada de: Dinámica Litosférica, 2011.

Durante el Kimmeridgiano el bloque de Yucatán se desplazó hacia el SE a través de un sistema de fallas que separaban las plataformas de Yucatán y Florida, en este periodo también ocurrió una invasión de aguas marinas del Golfo que favoreció la acumulación de sedimentos, dando lugar a la formación de la plataforma continental.

Durante el Cretácico Medio y Superior no se presentaron cambios tectónicos permitiendo la deposición de carbonatos en plataformas, sin embargo, en la Península de Yucatán y el Banco de Campeche lo que se acumuló fue rocas evaporíticas. A principios del Eoceno inferior se presentó un levantamiento como consecuencia de la convergencia entre la placa de América del Norte y la placa Farallón originando una serie de cuencas y subcuencas (Servicio Geológico Mexicano, 2004).

Durante el Pleistoceno y parte del Holoceno, el nivel del mar alcanzó cinco metros arriba del actual, dando lugar a depósitos recientes caracterizados por zona de pantanos y de bioclastos derivados de las unidades más antiguas.

4.8. Modelo de la plataforma.

Por medio de una meticulosa revisión bibliográfica se realizó un modelo para ejemplificar la plataforma de Yucatán **Figura 19**.



Figura 19. Plataforma Carbonatada de Yucatán. Figura de elaboración Propia.

Capítulo V: Consideraciones económicas

5.1. Hidrocarburos

En la **Figura 20** se observa la Plataforma de Yucatán como una de las doce provincias petroleras con sistemas petroleros activos, cabe destacar que solo en Belice y Guatemala se tiene producción.

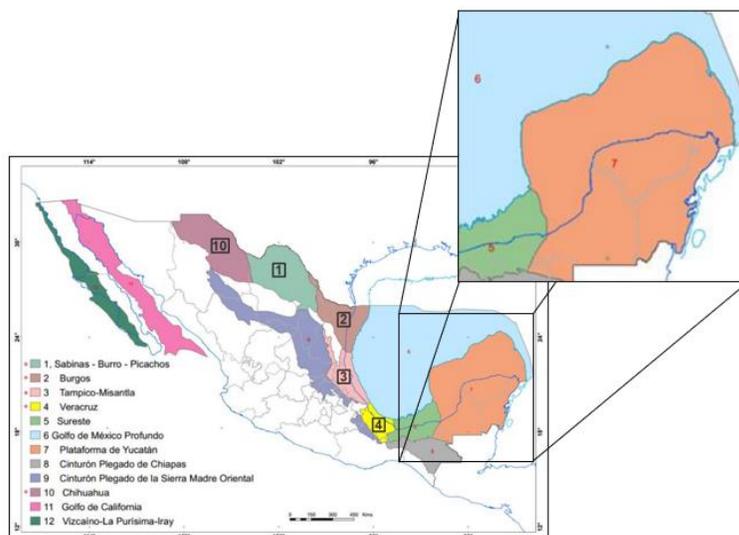


Figura 20. Provincias petroleras. Modificado de: *Atlas Geológico* por CNH, 2019.

La Plataforma de Yucatán tiene un importante interés en la industria de los hidrocarburos debido a que es una zona carbonatada lo cual la hace ideal para la generación de petróleo, aunque se considera solamente que la región marina tiene potencial, entre las costas de Chicxulub y Progreso según especialistas del Instituto Tecnológico del Petróleo y Energía (ITPE), con base en estudios realizados en el 2013 por Pemex Exploración y Producción (PEP). Por otro lado, José Ramón Silva Arizabalo, uno de los fundadores del ITPE menciona que el potencial se encuentra alrededor del arrecife de coral conocido como Alacranes. De acuerdo con el geofísico de la Universidad de Texas en Austin, Sean Gulick, es imposible encontrar hidrocarburo en el cráter de Chicxulub debido a que el impacto del meteoro produjo un calor intenso que pulverizó todo el material orgánico en la zona.

De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación (DOF) y conforme al Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 gran parte de la plataforma ha sido salvaguardada por lo cual se debe preservar y restaurar debido a que se tiene gran aprovechamiento social y económico siendo su principal objetivo "Aprovechar el potencial turístico de México para generar una mayor derrama económica en el país" en la **Figura 21** se muestra el área total protegida.

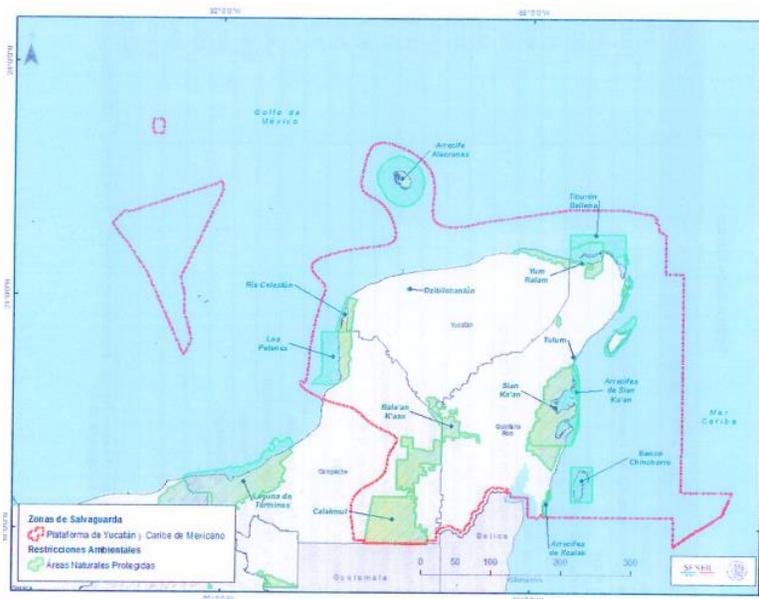


Figura 21. Áreas Naturales Protegidas de la Plataforma de Yucatán. Tomada de: Diario Oficial de la Federación, 2013.

De acuerdo con el dictamen técnico No. 3 “Plataforma de Yucatán y Caribe Mexicano” de la SENER en 2013 se tiene información que 24 pozos han sido perforados, de los cuales 15 fueron realizados en los años de 1952-1984 y ninguno fue productor. Sin embargo, en un estudio geológico de la Península de Yucatán realizado por López Ramos (1972) se confirman que 35 pozos han sido perforados contando los que se encuentran en países fronterizos (Belice y Guatemala) todos fueron con objetivos petroleros, aunque se considera un número mínimo tomando la extensa zona. En la **Figura 22** se detalla la ubicación de 12 pozos en territorio mexicano.

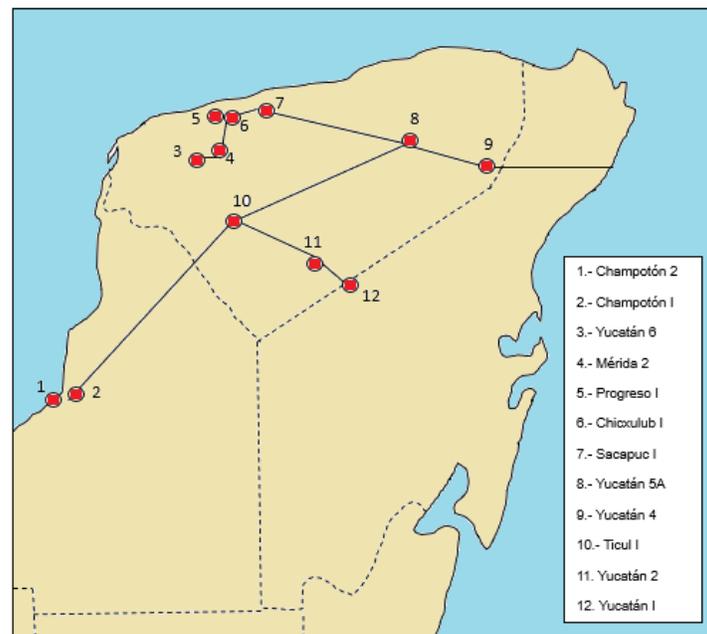


Figura 22. Ubicación de pozos perforados en la Península de Yucatán. Modificado de: López Ramos, 1972.

A pesar de ser la segunda Provincia petrolera más grande de México hasta el momento no se cuenta con campos activos dentro de territorio mexicano. Siendo el campo Xan en Guatemala el único yacimiento comercial.

En el 2013 PEMEX reportó que se tenía aproximadamente 809 km de sísmica 2D y 10.3 km² de sísmica 3D como actividad exploratoria en la zona de la Plataforma de Yucatán adicionalmente se ubican 3 plataformas tipo habitacional, de medición y telecomunicaciones, con nueve oleoductos dando un total de 57,6 km.

El sistema petrolero de la PY se cataloga como especulativo y cuenta con:

Roca Generadora

- Rocas que son ricas en materia orgánica, que son o han sido capaces de generar hidrocarburos para formar yacimientos de petróleo económicamente explotables.
- Rocas carbonatadas (calizas y dolomías) y evaporíticas.
- Formación Cobán, del Cretácico Temprano-Medio.

Roca almacén

- Rocas porosa donde se acumulan los hidrocarburos.
- Las rocas almacenadoras potenciales son calizas y dolomías del Cretácico Inferior, Medio y Superior, teniendo un 10% - 12% de porosidad.

Roca sello

- Roca impermeable que forma una barrera de manera que los fluidos no pueden migrar.
- Se tienen secuencias evaporíticas intercaladas entre rocas calizas y dolomías además se encuentran trampas sutiles estructurales y estratigráficas, teniendo un alto potencial de conetener hidrocarburos.

5.2. Minerales

México es conocido internacionalmente por su riqueza minera, tanto por su calidad como cantidad; sin embargo, en la Plataforma de Yucatán de acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM) entre lo que se extrae principalmente de Yucatán, Campeche y Quintana Roo son minerales no-metálicos como: Calcita, Dolomita, Grava, Agregados Pétreos, Arcilla, Arena, Azufre, Yeso, Sal y Caliza.

Desde la prehistoria los mayas utilizaron la roca caliza para construir sus templos y centros ceremoniales, y no solo ellos con la llegada de los españoles también se usó para la construcción de haciendas, hasta nuestros tiempos sigue teniendo gran importancia en la construcción permitiendo el desarrollo de minas y bancos de materiales “sascaberas”.

Según la Secretaría de Economía (SE), Yucatán cuenta con 20 plantas para procesar sustancias no-metálicas, y 150 bancos de materiales registrados en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), que producen arena, grava y gravilla; además

una planta de calcinación y pulverización, donde se obtiene como producto cemento. Y cuatro plantas procesadoras de materiales pétreos; tres cerca de la ciudad de Cancún y una en las inmediaciones del poblado de Kantunilkín.

En la **Tabla 8** se muestra en números el volumen de producción minera del 2016- 2020 según la Secretaría de Economía.

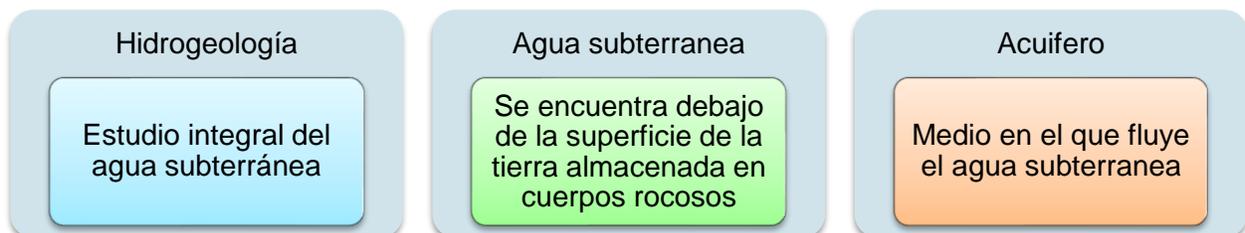
VOLUMEN DE LA PRODUCCIÓN MINERA, 2016-2020					
(Toneladas)					
Productos/Años	2016	2017	2018	2019	2020
Agregados Pétreos	733 405.00	662 112.00	662 112.00	16 492 000.00	17 490 250.00
Arcillas	90 378.63	78 921.75	82 728.26	82 078.93	88 634.20
Arena	594 450.70	690 462.08	638 899.10	634 743.71	684 571.68
Caliza	25 804 651.00	24 523 066.68	14 729 684.07	37 736 778.28	40 089 642.40
Grava	989 042.98	1 014 018.81	1 062 995.92	1 056 082.21	1 138 985.64
Rocas dimensionales	863.91	-	1 424.00	464.00	4 800.00
Sal	524 824.00	297 405.29	359 894.07	549 890.11	464 633.43
Sulfato de sodio	-	-	-	-	365 472.88
Yeso	175622.88	26 269.92	559 044.11	558 865.00	561 012.76

Tabla 8. Volumen producción minera. Adaptada de: Secretaría de Economía 2021.

Conforme a estudios realizados en el pozo Yaxcopoil 1, perforado en el 2002 se puede confirmar las teorías sobre la existencia de litio el metal más demandado y caro del mundo, en el cráter de Chicxulub debido a que las muestras arrojaron concentraciones “abundantes de boro y litio”. Sin embargo su extracción resultaría complicada debido a las grandes profundidades que se debe perforar.

5.3. Hidrogeología

Conceptos importantes para el entendimiento de la Hidrogeología:



La importancia que tiene la Hidrogeología es mejorar el manejo del recurso hídrico, prevenir la contaminación del acuífero y evitar su abuso, existen diversos tipos de estudios hidrogeológicos para conocer las propiedades físicas y químicas del agua subterránea. El agua subterránea tiene también un papel sumamente importante, pues el 30% de agua dulce proviene de fuentes subterráneas.

El ciclo hidrológico también conocido como ciclo del agua, es un proceso completamente dinámico, responsable de la distribución del agua en todo el planeta. La energía solar provoca que se caliente el agua de las superficies tanto acuáticas como terrestres provocando se evapore y se genere vapor de agua la cual se condensa formando gotas pequeñas que al agruparse forman las nubes, si las gotas crecen de volumen se precipitan y regresan al suelo en forma de lluvia o granizo, una parte se queda en superficie como los ríos, otra parte es consumida por organismos que gracias a la transpiración es se devuelve a la atmosfera, otro porcentaje se infiltra dando origen al acuífero.

La **Figura 23** nos ayuda a comprender la importancia de no explotar los acuíferos hasta el punto de agotarse porque pueden ocurrir interrupciones a lo largo del ciclo y los acuíferos dependen de la recarga de la precipitación y la filtración. Primero refiere la figura en el texto y después ponla

La plataforma de Yucatán tiene un papel estrella en hidrogeología, tomando en cuenta su geología estructural (capítulo 5.5), en la parte centro y norte de la Península de Yucatán, no hay presencia de ríos superficiales debido a la gran permeabilidad del suelo, provocando que el agua de lluvia se infiltre lo que originó un manto freático cerca de la superficie dando origen a cenotes y karst es por ello por lo que también se le denomina a esta zona “losa calcárea yucateca”.

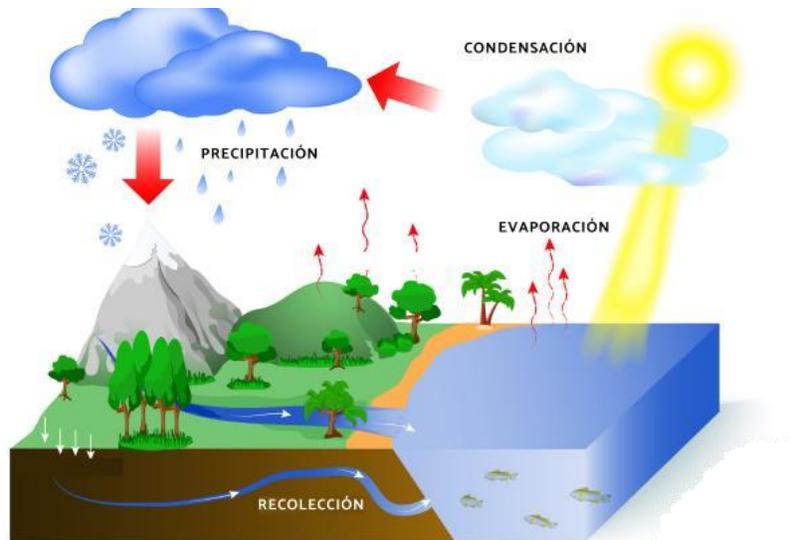


Figura 23. Ciclo hidrológico. Tomado de: Qué es el ciclo del agua por Brian Calvo.

Los acuíferos kársticos bien desarrollados según Werner (1996) tienen:

- Alto grado de heterogeneidad
- Porosidad baja conductividad hidráulica alta
- Velocidades de flujo altas
- Mineralización generalmente baja

Debido a que se tiene velocidad de flujo alta y porosidad como absorción baja, estos tipos de acuíferos son más propensos a contaminarse fácilmente.

La zona de la PT (parte continental) es caracterizada por ser de clima cálido subhúmedo, por lo que las precipitaciones son abundantes lo cual debido al suelo se tiene gran capacidad de infiltración y su reducida pendiente topográfica ayuda a la recarga del acuífero. La descarga natural del acuífero consiste en la transpiración de la vegetación, la evaporación del agua subterránea de los cenotes y el flujo de agua subterránea a lo largo de la costa hacia el océano.

Este acuífero es el principal y más importante en todo el país, gracias a su calidad y cantidad de minerales, el acuífero es considerado poco profundo lo cual, aunque facilita la extracción de agua, sin embargo, se tiene una alta probabilidad de contaminarse.

Cenotes

La palabra cenote significa “caverna con depósito de agua” o “pozo sagrado” es decir cualquier espacio subterráneo que contenga agua, con la única condición de que esté abierto al exterior como ejemplo la **Figura 24**.



Figura 24. Representación de un cenote. Tomado de: Biodiversidad y Ecología de la fauna de cenotes de Yucatán por Alberto Guerra.

Se estima que en el estado de Yucatán existan aproximadamente entre 7,000 y 8,000 cenotes, se concentran en el norte, a lo largo de una línea imaginaria entre Tulum, Quintana Roo y Campeche, y disminuyen hacia el sur de la península debido a que en esta zona no se tienen corrientes subterráneas que disolvieran las calizas superficiales.

Se cree que cuando el meteorito chocó en lo que hoy es la Península de Yucatán, por la fuerza del impacto se crearon grietas que facilitaron la disolución de las rocas, creando pozos de agua que luego quedaron expuestos cuando los techos se erosionaron o colapsaron. También a esto se le atribuye que la zona tenga mayor cantidad de cenotes a nivel mundial. Dicha investigación se encuentra plasmada por (Perry [et. al.], 1995).

Por sus características hidro biogeoquímicas, los cenotes se clasifican como:

Jovenes o lóticos

- Facilmente se conectan con el acuífero a través de los túneles de las cuevas, el flujo del agua es horizontal y el tiempo de residencia del agua es corto.

Viejos o lénticos

- Cuentan con bloqueos en la conexión principal con el acuífero, debido a colapsos del techo o las paredes por lo que el intercambio con el agua subterránea es restringida y el recambio del agua es más lento.

Anillo de Cenotes Chicxulub

La región de Chicxulub es mundialmente famosa por el impacto de un meteorito hace 66 millones de años que de acuerdo con las teorías fue el principio de la extinción de los dinosaurios. El cráter está enterrado bajo más de 1,000 m de roca caliza y está compuesto principalmente de carbonato de calcio, con una pequeña cantidad de sulfato de calcio su diámetro es de aproximadamente 180 km. El impacto es comparable al de mil millones de bombas atómicas.

El anillo de Cenotes Chicxulub se interpreta en la **Figura 25**, es una red de 900 cenotes aproximadamente ubicado en el estado de Yucatán distribuidos en 27 municipios, esta zona esta decretada como área natural protegida con categoría de Reserva Estatal el 19 de octubre de 2013, con una superficie de 219,207.83 hectáreas denominada Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes.

Su objetivo principal es garantizar que los beneficios derivados de los servicios, particularmente hidrológicos, de los ecosistemas contenidos en su territorio se distribuyan de forme equitativa para mejorar la calidad de vida.



Figura 25. Anillo de Cenotes. Tomado de: Monroy Emiliano.

Conclusiones y Recomendaciones.

La Plataforma de Yucatán es una provincia geológica compleja que desde hace más de un siglo se ha estudiado sin embargo su estructura no ha sido del todo comprendida.

Las zonas turísticas localizadas en el área forman parte de los beneficios sociales, económicos y culturales lo cual se traduce en beneficios socioeconómicos, siendo la zona con más ingreso extranjero.

Conforme a la explotación de recursos no renovables, la plataforma prometía ser un gran prospecto para la extracción de hidrocarburo aún con casos de fracaso, sin embargo, no existe información suficiente para tener contemplado un nuevo proyecto, se debe considerar el impacto ambiental, por lo que es más rentable seguir apostando por una economía turística en la zona, e invertir en provincias con menor certidumbre y mayor potencial petrolero.

Se recomienda continuar con la exploración geofísica para localizar zonas vulnerables y evitar la contaminación del agua subterránea. Así como para confirmar las nuevas teorías en cuanto a sus recursos en hidrocarburo y minerales.

Bibliografía.

Aguilar N. M., (1981). Prospección de minerales no metálicos en el Estado de Campeche. Consejo de Recursos Minerales.

Aguayo C., J.E., R. Bello M., M.A. Del Vecchio C., J. Araujo M., and M.A. Basáñez L. (1979). Estudio sedimentológico en el área Tulum-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. Boletín de la Sociedad Geológica Minera.

Allen, P.A.; Homewood, P. y Williams, G.D. (1986). Foreland Basin: An Introduction. Foreland Basins. International Association of Sedimentologists. Blackwell Scientific Publications, Oxford.

Álvarez J. (1954). Exploración Geológica Preliminar del Río Hondo. Quintana Roo. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros.

Amos S., (1991). The geology of North America, volumen J, The Gulf of México Basin, Departament of Geological Sciences, The University of Texas at Austin.

Arche, A. (2010). Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria. Consejo superior de investigaciones científicas. Madrid.

Batllore, E., González, J., Díaz, J. y Febles, J. (2005). Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán. México. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geografía.

Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E. y Torres, O. (2007). Los cenotes de la península de Yucatán. Arqueología Mexicana.

Butterlin J. (1958). Reconocimiento geológico preliminar del territorio de Quintana Roo. Boletín de la Asociación Mexicana de Geología Petrolera, México.

Bonet y Butterlin. (1977). Enciclopedia Yucatanense: Mérida: Gobierno del estado de Yucatán, Ciudad de México.

Caballero C. (2019). Cuencas Sedimentarias [Diapositiva de PowerPoint]. Repositorio Material Facultad de Ciencias. <https://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/65CuencasSedimentariasX2.pdf>

Centero García E. (2012). Interior de la Tierra. Apuntes de la asignatura de Tectónica. Facultad de Ingeniería. UNAM.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2023). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero península de Yucatán (3105), estado de Yucatán.

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2013). Actualización de la disponibilidad media anual del agua subterránea Acuífero (3105) Península de Yucatán Estado de Yucatán. Comisión Nacional del Agua.

Dickinson William R. (1974). Plate Tectonics and sedimentation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, USA, no. 12.

Durán R. y M. Méndez (Eds). (2010). Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.

Einsele, G. (1985). Basaltic sill-sediment complexes in young spreading centers: genesis and significance. *Geology*.

Escobedo, I. (2021). Modelación regional en estado estacionario del acuífero noreste de Quintana Roo. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Escolero, A., Marín, E., Steinich, B. y Pacheco J. (1999). Delimitation of hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: the Merida, Yucatan example. México. Universidad Autónoma de México: Instituto de Geofísica.

Estrada, H., Jiménez Osornio, J. J., Álvarez Rivera, O., y Barrientos Medina, R. C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria. Multidisciplinary Scientific Journal*.

Folk, R. L., R. Robles. (1964). Carbonate sands of Isla Perez, Alacran Reef Complex, Yucatan. *Journal of Geology* 72 (3): 255-92.

Garnica, E. (2011). El ingeniero geólogo y su participación en la industria petrolera en el registro de hidrocarburos. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Ginsburg, R.N., y James, N.P. (1974). Holocene Carbonate Sediments of Continental Shelves, en *The Geology of Continental Margins*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

Godoy R. D., (1965). Bosquejo Geológico petrolero de la península de Yucatán. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.

INMA. (2003). Ciencias del Mar. Apuntes de la asignatura Medios Sedimentarios Marinos. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. España.

Ingersoll Raymond V. (2012). Tectonics of sedimentary basins, with revised nomenclature. Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Ángeles, California, USA.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2002). Estudio hidrológico del estado de Yucatán. (Primera edición). Gobierno del Estado de Yucatán.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2007). Carta Geológico Minera, Yucatán, Campeche y Quintana Roo. Consejo General de Minería. Secretaría de Economía. Servicio Geológico Mexicano.

Lesser J. (2007). Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de la península de Yucatán. Secretaria de recursos hidráulicos. Dirección de geohidrología y de zonas áridas.

Lesser, J. M., y Weidie, A. E. (1988). Region 25, Yucatan Peninsula, Hydrogeology. The Geological Society of North America, 2, 237-241.

Logan BW, Harding JL, Aur WM, Williams JD, Sneat Rg. 1969. Carbonate sediments on reefs, Yucatan shelf, Mexico. Part I. Late Quaternary sediments. Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol. 11: 1-128.

López, Ramos, E. (1973). Estudio geológico de la península de Yucatán: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 25,23-76.

López, Ramos, E. (1975). Estudio Geológico de la Península de Yucatán. En: Enciclopedia Yucataense. T.X. Edición del Gobierno del Estado de Yucatán, México.

Lorenzo, E. y Morato, A. (2018). Geología del Petróleo. UPSE. Universidad Estatal Península de Santa Elena. Facultad de Ciencias de la Ingeniería.

Loza Espejel, Roberto. (2014). Características e importancia económico-petrolera de las cuencas sedimentarias foreland, con ejemplos representativos. Tesis de Licenciatura. México, UNAM, FI.

Marín, S. L. E., Pacheco, A. J. G., & Méndez, R. R. (2004). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En: B. Jiménez, & L. Marín (Eds.). El agua en México vista desde la academia. México: Academia Mexicana de Ciencias.

Nicolas, A. (1985). Novel type of crust produced during continental rifting. Nature, 315, 112-115.

Ortigosa, Gutiérrez, J. (2018). Cenotes vemos, estigobiontes no sabemos. CIENCIORAMA

PEMEX EXPLORACIÓN y PRODUCCIÓN (PEP). (2013). Provincia Petrolera Plataforma de Yucatán. Exploración y Producción / Subdirección de Exploración.

Perry, E., Marín, L., McClain, J., y Velazquez, G. (1995). Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatan, Mexico: Its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater.

Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B., y Velazquez-Oliman, G. (2009). Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: constraints on stratigraphy and hydrogeology.

Read, J.F. (1982). Carbonate platforms of passive (extensional) continental margins: Types, characteristics and evolution: Tectonophysics.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). (2020). Inventario de bancos de materiales. Yucatán, México: Subsecretaría de infraestructura.

Secretaría de Economía (SE). (2021). Panorama minero del estado de Yucatán. Dirección de Investigación y Desarrollo.

Segura, José (2015). Desarrollo de yacimientos petroleros en cuencas de margen pasivo, con ejemplos de México y el mundo. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Servicio Geológico Mexicano. (2004). Carta Geológico-minera Ciudad del Carmen E15-6 escala 1:250 000, Secretaría de Economía. Campeche y Tabasco. Mexico.

Shaw, A.B., 1964, Time in Stratigraphy: McGraw-Hill.

Spalletti L. (2006). Nociones sobre las cuencas sedimentarias en el marco de la tectónica global. [Diapositiva de PowerPoint]. Repositorio Material Facultad de Ciencias. <https://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/65bcuencasSed.pdf>

Torres de la Cruz., (2019). Análisis de la progradación de la plataforma cupido en el noreste de México durante el cretácico inferior. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Univ. of Illinois at Chicago. Earth and Environmental Sciences. EaES 350-13

Valdés, Daniel. (2020). Atributo sísmico para la identificación y diferenciación de las facies carbonatadas del Jurásico Superior Kimmeridgiano al sur de la cuenca Tampico-Misantla, México centro oriental. Tesis de Maestría. México, Universidad Nacional Autónoma de México.

Vargas Castro, P. E. (2011). Análisis de la secuencia terciaria en el cráter de Chicxulub, Yucatán a partir de núcleos del pozo Yaxcopoil -1. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.

Vera, M., Torres, V. (1987). Diagénesis de carbonatos. Ciudad de México: División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería.

Viniegra O. F. (1981). Great carbonate bank of Yucatán, southern México. Journal of Petroleum Geology vol. 3.

Weidie A. E. (1985). Geology of Yucatán platform. In: Ward W.C., A. E. Weidie y W. Back. Geology and hydrogeology of the Yucatan and Quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula. New Orleans Geological Society, New Orleans, Louisiana, U.S.A.

Werner, Joerg. (1996). Introducción a la hidrogeología. (1ra ed.). Linares, Nuevo León. México.