



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

La Sonda de Campeche, una zona petrolera de las Cuencas del Sureste y sus recursos naturales 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 Geólogo

P R E S E N T A

Jesús Fernando Arzaluz Muciño

ASESORA DE MATERIAL DIDÁCTICO

M.C. Leticia Sánchez Guillén



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	5
1. Introducción.....	6
1.1. Objetivos y metas.....	6
2. Fundamentos de las cuencas sedimentarias	7
2.1. Clasificación de las cuencas sedimentarias	8
2.1.1. Cuencas en márgenes convergentes	9
2.1.2. Cuencas en márgenes divergentes	12
2.1.3. Cuencas en márgenes transformantes	15
2.2. Clasificación de plataformas sedimentarias	16
2.2.1. Plataformas siliciclásticas	17
2.2.2. Plataformas carbonatadas	18
3. Generalidades	19
3.1. Ubicación	19
3.2. Estado del arte	20
4. Desarrollo del tema	22
4.1. Descripción general	22
4.2. Sedimentología	23
4.3. Estratigrafía.....	28
4.3.1. La secuencia evaporítica del Calloviano.....	29
4.3.2. La secuencia calcáreo-arcillosa del Jurásico superior	29
4.3.3. La secuencia carbonatada del Cretácico	31
4.3.4. La secuencia de brecha calcárea del Cretácico superior-Paleógeno ...	31
4.3.5. La secuencia clástica del Cenozoico	32

4.4. Geología estructural.....	33
4.5. Contenido paleontológico.....	38
4.5.1. Fósiles del Jurásico superior	39
4.5.2. Fósiles del Cretácico.....	40
4.5.3. Fósiles del Cenozoico.....	41
4.6. Evolución geológica	42
4.6.1. La apertura inicial del Golfo de México del Triásico tardío al Jurásico medio	43
4.6.2. El depósito salino del Calloviano	44
4.6.3. Depósito sedimentario post-salino del Jurásico al Cretácico tardío	45
4.6.4. Impacto de Meteorito Chicxulub.....	46
4.6.5. El Orógeno Mexicano y el depósito clástico del Paleógeno.....	47
4.6.7. Orogenia Chiapaneca del Mioceno.....	48
4.7. Tipo de cuenca.....	50
4.8. Propuesta de modelo de cuenca.....	50
5. Consideraciones económicas.....	55
6. Conclusiones y recomendaciones.....	57
6.1. Conclusiones.....	57
6.2. Recomendaciones	58
Referencias	58

Resumen

La Sonda de Campeche es una zona petrolera de relevancia nacional, tanto por sus reservas como por su producción de aceite y gas natural, se ubica enfrente de las costas de Tabasco y Campeche. Desde el descubrimiento del primer yacimiento en

1971, los estudios geológicos y geofísicos han sido elaborados por compañías petroleras, principalmente Petróleos Mexicanos (PEMEX).

El proceso de *rifting* en el Golfo de México iniciado en el Triásico medio condicionó el depósito sedimentario, primero continental y después marino durante la mayor parte del Mesozoico. En el Calloviano, se depositaron secuencias evaporíticas que al moverse constituyeron un elemento tectónico importante en el arreglo estructural de la región. Las secuencias del Jurásico superior representaron las rocas generadoras por excelencia debido a las excelentes condiciones deposicionales establecidas por en la Paleoplataforma de Yucatán que, en combinación con el clima cálido predominante y la abundancia de organismos como el plancton y los depósitos arcillosos y carbonatados permitieron la formación de rocas generadoras de hidrocarburos.

El impacto del meteorito de Chicxulub en el límite Cretácico-Cenozoico contribuyó al desarrollo de la roca almacén por excelencia dado que generó una brecha con un bajo porcentaje de matriz. En el Cenozoico, las secuencias carbonatadas fueron reemplazadas por secuencias clásticas debido al levantamiento del Orogénico Mexicano y a la Orogenia Chiapaneca, provocando el fallamiento y plegamiento de la Sonda de Campeche, originando las provincias morfoestructurales que actualmente la conforman, como el Pilar Reforma-Akal bordeado por los grabenes de Comalcalco y de Macuspana.

Los domos, diapiros, pliegues y fallas configuraron las trampas estructurales idóneas para la acumulación de los hidrocarburos, de donde se obtiene la mayor producción de aceite de México.

Abstract

The Campeche Sound is a region of national significance due to its substantial oil and gas reserves and production. It is located offshore, adjacent to the coasts of Tabasco and Campeche. Since the discovery of its first oil field in 1971, numerous geological and geophysical studies have been conducted, mainly for Petroleos Mexicanos (PEMEX).

The rifting process that began in the Gulf of Mexico during the middle Triassic influenced the sedimentary deposition, transitioning from continental to marine throughout much of the Mesozoic era. In the Callovian, evaporitic sequences were deposited, which, upon mobilization, became a key component in the region's structural configuration. The Jurassic sequences are the main source rocks for hydrocarbons, formed under ideal depositional conditions established by the Yucatán Paleoplatform. This, in combination with a warm climate, abundant plankton, and the deposition of clay and carbonates, contributed to the formation of these rich hydrocarbon source rocks.

The impact of the Chicxulub meteorite at the Cretaceous–Paleogene boundary played a crucial role in the development of one of the most significant reservoir rocks, generating a breccia with a low matrix percentage. During the Cenozoic era, carbonate sequences were replaced by clastic deposits due to the formation of the Mexican and Chiapanecan orogens, which led to the folding and faulting of the Campeche Sound region. This process gave rise to the morphostructural provinces that define the area today, including the Pilar Reforma-Akal, flanked by the Comalcalco and Macuspana grabens.

The formation of domes, diapirs, and faults created optimal structural traps for hydrocarbon accumulation, making the Campeche Sound one of Mexico's most prolific oil-producing regions.

1. Introducción

1.1. Objetivos y metas

Explorar y describir a la Sonda de Campeche desde su interés geológico dada su importancia económica para el país. Elaborar un trabajo escrito con la información más relevante, actualizada, de fácil acceso y en español para toda la población estudiantil, académica y de la industria interesadas.

Redactar un documento que formará parte del libro digital “Las Cuencas Sedimentarias de México y sus recursos naturales del subsuelo” con las

indicaciones necesarias para su incorporación y posterior publicación digital en el acervo bibliográfico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

1.2. Metodología

La información presentada se recopiló de trabajos de diversos autores que han contribuido para su comprensión desde los primeros trabajos geológicos realizados en la década de los setenta del siglo pasado hasta los más recientes que indispensablemente contribuyen al conocimiento científico actual del Sureste Mexicano. Se consultaron artículos científicos, libros, informes técnicos y tesis de licenciatura y posgrado, priorizando la información más relevante o actualizada. Así mismo, se incluyeron imágenes y tablas tanto modificadas de otros autores como de autoría propia con el propósito de ilustrar la información más notable que caracteriza a la Sonda de Campeche.

Se describe con detalle su ubicación, estado del arte, tipo de cuenca, sedimentología, estratigrafía, aspectos estructurales, paleontología, evolución geológica y cuatro modelos de la cuenca antes de su deformación. Se incluye además, un apartado con las características tectónicas y geológicas más relevantes de los tipos de cuencas y plataformas que son esenciales para el entendimiento de la Sonda de Campeche.

1.3. Importancia

Estudiar la Sonda de Campeche es relevante porque que es una de las regiones productoras de aceite y gas más importantes del país, donde se tiene una compleja historia geológica, debido a que han ocurrido varios eventos tectónicos que causaron deformación.

2. Fundamentos de las cuencas sedimentarias

En la Tierra existe una gran variedad de estructuras geológicas que configuran la morfología interna y externa de la corteza terrestre producto del movimiento de las placas tectónicas y sus procesos derivados. Cuando el relieve terrestre es modificado usualmente se desarrollan grandes cordilleras montañosas constituidas

de variadas rocas que, por la acción erosiva del viento y agua, se meteorizan y sus partículas comienzan a viajar a zonas de menor energía donde tienden a acumularse en las cuencas sedimentarias.

Las cuencas sedimentarias son depresiones que representan mínimos topográficos de la corteza terrestre donde los sedimentos son acumulados relleno paulatinamente la zona (Biju, 2002). Su tamaño y forma son altamente variables, ya que pueden expresarse de forma aproximadamente circular, como depresiones elongadas, valles o bahías no superando usualmente los 100 [km] de longitud y las decenas de kilómetros de ancho (Einsele, 2000).

El sedimento es transportado por la acción de corrientes fluviales, el viento y la gravedad, desde las montañas hasta los ambientes deposicionales, que al compactarse forma rocas sedimentarias, algunas de relevancia económica; las rocas más comunes son calizas, lutitas y areniscas, las que pueden contener agua potable, petróleo, minerales y materiales industriales. Para que estos recursos se formen o acumulen, el factor tiempo es un elemento importante porque los procesos geológicos suelen ser muy lentos. Como menciona Biju (2002) el desarrollo y evolución de la corteza terrestre está en función del tiempo, del movimiento cortical producto de la tectónica y del carácter fundamental del tipo de cuenca y su desarrollo individual.

2.1. Clasificación de las cuencas sedimentarias

Biju (2002) explica que la amplia gama de tamaños, configuraciones y ambientes de las cuencas sedimentarias abarca desde las profundidades de los vastos océanos hasta las zonas continentales donde se forman depresiones endorreicas y cuerpos lacustres. La clasificación de las cuencas sedimentarias más utilizada se basa en el contexto tectónico en el cual se desarrollan, ya sea en un margen divergente, convergente, transformante o mixto. Además, según su depósito sedimentario, pueden clasificarse en: cuencas activas, cuando continúan acumulando sedimentos; cuencas inactivas, cuando el depósito ha cesado y

presentan una ligera deformación; y cuencas deformadas, cuando el depósito está inactivo y muestran una fuerte deformación y erosión (Einsele, 2000).

2.1.1. Cuencas en márgenes convergentes

Los márgenes convergentes se caracterizan por la interacción de dos placas tectónicas, pudiendo ser de una placa oceánica con una continental (desarrollando una zona de subducción) o una placa oceánica o continental con otra de su misma clase (desarrollando una zona de colisión). Los tipos de cuencas más comunes desarrolladas en márgenes convergentes son las de trinchera, antearco, trasarco y *foreland*.

2.1.1.1. Trincheras

Las cuencas formadas en la cuña de acreción, fosa o trinchera son las más cercanas al eje de acción donde una placa subduce debajo de otra (Figura 1). Se originan cuando una placa oceánica es subducida por debajo de una placa continental (formando un orógeno) u otra oceánica (formando un arco de islas). En ambos casos, se desarrollan zonas profundas que pueden llegar hasta los 11 kilómetros de profundidad como la Fosa de las Marianas (Bardach, 2024) lo que las convierte en el tipo de cuencas más profundas que pueden desarrollarse y de las que se tiene evidencia en el mundo.

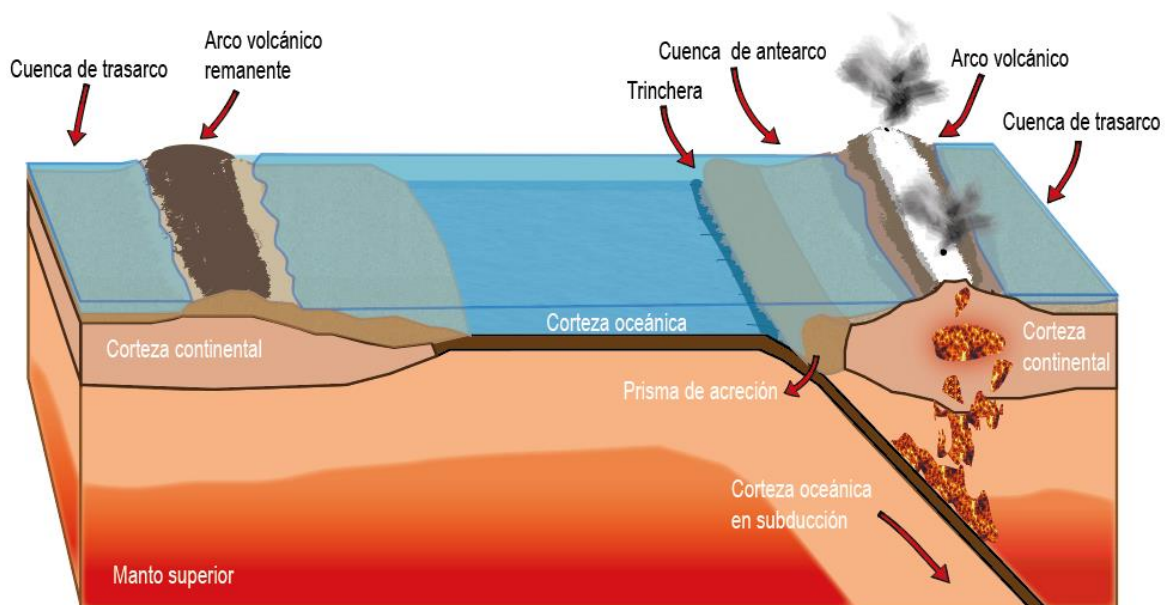


Figura 1. Diagrama que representa un margen convergente con los distintos tipos de cuencas y estructuras geológicas que se desarrollan típicamente. Modificado de Tarbuck *et al.* (2005).

Las fosas se caracterizan porque se encuentran en zonas tectónicamente activas con gran actividad sísmica. Sus sedimentos provienen de la capa acumulada sobre la corteza oceánica que conforme se va subduciendo aporta material a la trinchera, es decir, la acumulación de sedimentos está en función de la placa oceánica subducida. El ángulo de la zona de subducción, la tasa de subducción y el número de corrientes marinas son factores decisivos para establecer la velocidad con la cual las trincheras se rellenan de sedimentos, ya que determinan en gran medida las dimensiones de la propia fosa. Entre los sedimentos predominan los depósitos turbidíticos y otros sedimentos de naturaleza pelágica (Spalleti, 2006).

2.1.1.2. Cuencas de antearco

También llamadas cuencas “*forearc*” (Figura 1) se desarrollan entre la trinchera y el arco volcánico. Su origen está correlacionado con un prisma de acreción que funciona como basamento y en ocasiones como barrera. Este prisma se desarrolla cuando los sedimentos acumulados en la trinchera son plegados hacia la parte más superficial formando un alto estructural que propicia la acumulación de sedimentos provenientes del continente. Einsele (2000) menciona su capacidad de acumular sucesiones sedimentarias de hasta 10 [km] de espesor en un corto periodo de tiempo (10-50 [Ma]) (como sucede en el Arco de Sonda) debido principalmente al aporte vulcano-sedimentario, de grandes ríos o por el aporte carbonatado en regiones cercanas al ecuador.

Spalleti (2006), indica que su evolución inicia con un *rift*, caracterizada por sedimentación marina profunda que cambia a plataforma con sedimentación marina más somera, hasta que finalmente se pasa a un registro predominantemente continental. La sedimentación es controlada por la subsidencia producida por el mismo peso de los sedimentos acumulados, así como por el tamaño de sus bordes (el prisma de acreción y el arco volcánico). Einsele (2000) señala que su evolución depende totalmente del volumen acumulado de sedimentos por la trinchera y su posterior acreción por unidad de tiempo en el complejo de subducción. Algunos

ejemplos modernos son los valles Aleutianos, de Kermadec, de Manila y de Sumatra-Mentawai (Einsele, 2000).

2.1.1.3. Cuencas de trasarco

También llamadas cuencas “*backarc*” o “retroarco”. Evolucionan atrás el arco volcánico (en dirección opuesta a la subducción), donde pueden alcanzar grandes dimensiones (Figura 1). Existen principalmente dos tipos: las que tienen un basamento cortical continental y las que tiene un basamento cortical oceánico; esto depende totalmente del ambiente tectónico en el cual se desarrollan. En ambos casos, los aportes de sedimentos provienen del arco volcánico. Esto hace que el relleno de las cuencas de trasarco sea clástico, llegando a tener secuencias de depósitos piroclásticos cuando el magmatismo es intenso.

Estas cuencas suelen estar asociadas a mecanismos de extensión y adelgazamiento cortical, lo que causa la subsidencia y en consecuencia el espacio de acomodo. El adelgazamiento de la corteza sucede porque el magmatismo proveniente del manto disminuye el grosor de la placa no subducida, haciendo por acción misma del ascenso del magma se origine una zona de *rift* o extensión justo por debajo de las cuencas de trasarco. En los estadios más tempranos se desarrollan dentro del arco volcánico (en este caso se denominan cuencas intraarco), pero conforme la extensión cortical se incrementa una parte del arco volcánico queda desplazada del margen subducido y de esta manera conforma el segundo alto estructural de la cuenca.

2.1.1.4 Cuencas *foreland*

Se producen por el impacto de dos placas que convergen y su génesis es bastante compleja puesto que, en su máximo desarrollo, involucra la fase más tardía en el ciclo de Wilson (el levantamiento de un orógeno). En el frente tectónico, el empuje generado hace que las rocas comiencen a desplazarse sobre fallas inversas propiciando el cabalgamiento de las rocas más antiguas sobre las más recientes formando estructuras secundarias como *klippes*, ventanas estructurales y *nappes*.

Un caso particular se asocia a las *nappes* porque forman bajos estructurales que permiten el depósito de sedimentos en zonas bajas a través de su historia evolutiva. Cuando se forman dos *nappes*, el espacio entre ambas forma una especie de cuña en la cual se depositan sedimentos. Cuando estas cuencas son desplazadas y ya no representan la cuenca mayor se les conoce como cuencas “*piggyback*”.

Las cuencas *foreland* más comunes se desarrollan al frente de un orógeno y pueden alcanzar profundidades de 1.5 kilómetros como la cuenca de Taiwán (Covey, 1986) o 3 kilómetros como la cuenca Timor-Tanimbar en Australia (Audley, 2009). Sus dimensiones longitudinales son aproximadamente iguales a la longitud del frente tectónico plegado y fallado (Covey, 1986) y el aporte sedimentario varía según su madurez geológica y el tamaño del orógeno. Por ejemplo, en etapas tempranas predominan sedimentos someros marinos y fluvio-deltaicos en los bordes de la cuenca, y en el centro los sedimentos clásticos turbidíticos procedentes del orógeno. En etapas más tardías el aporte clástico predominante es de ambientes aluviales y fluviales. Así mismo, las zonas de depósito principales pueden ser de varios kilómetros de longitud paralela a la dirección de transporte tectónico, por ejemplo, los sedimentos del Cretácico-Paleoceno que cubren los 75 [km] del Cinturón Plegado Sevier (Covey, 1986).

2.1.2. Cuencas en márgenes divergentes

2.1.2.1. Cuencas de *rift*

Son el tipo más común asociado a márgenes divergentes, se originan en el límite de dos placas tectónicas que por acción del movimiento conductivo del manto comienzan a desplazarse en sentidos opuestos (extensión cortical) propiciando el aumento de magmatismo en la base de las placas que comienza a adelgazar la corteza originando una subsidencia que crea una depresión donde se depositarán los sedimentos posteriores.

En estadios tempranos, las cuencas de *rift* se caracterizan por el rompimiento de una masa continental que propicia el desarrollo de fallas normales de bajo ángulo en ambos extremos de la ruptura. Las fallas originan una serie de semigrabenés que disminuyen en altura conforme se acercan al eje de la ruptura.

Una vez que el *rift* llega a etapas de mayor subsidencia, ocurre la transgresión de las aguas oceánicas, siendo cada vez mayor su extensión. Cuando la apertura del *rift* es lo suficientemente madura, comienza la generación de corteza oceánica.

Durante la fase temprana de *rift* las cuencas se rellenan con sedimentos clásticos fluviales. Luego pasan a un estado de relleno con dominio de depósitos lacustres continuando con los marinos de aguas someras y profundas. En la fase ulterior, de *post-rift*, los sedimentos cubren áreas más amplias de la cuenca y son mucho más uniformes en sus caracteres.

2.1.2.2. Cuencas interiores

También llamadas cuencas “*sag*” o “cratónicas”. Einsele (2000) menciona que se caracterizan por tener una simetría general ovalada (en forma de plato) y un perfil asimétrico, siendo muy extensas (de 200,000 a 2,000,000 [km²]) presentando baja subsidencia y largo tiempo de vida. Se pueden encontrar en todos los continentes, llegando a acumular espesores de sedimentos no mayores de los 10 kilómetros con poca o nula deformación en periodos que van desde los 200 a los 800 millones de años (Einsele, 2000).

En general, están asociadas a aulacógenos (*rifts* abortados) o puntos calientes que incidieron en la corteza adelgazándola y por subsidencia se formaron las depresiones. La mayoría de ellas datan del Proterozoico al Paleozoico y suelen tener aporte sedimentario principalmente clástico y carbonatado desde medios lacustres o fluviales continentales a marinos someros. Algunos ejemplos son la cuenca de París, la bahía de Hudson en Canadá y la cuenca de Paraná en Sudamérica (Einsele, 2000).

2.1.2.3. Cuencas en márgenes pasivos

Biju (2002) señala que, en la etapa final de un proceso de *rift*, la tasa de apertura de la litósfera oceánica cesa comenzando a enfriarse gradualmente, dando lugar a un proceso de subsidencia térmica que marca el inicio de una cuenca de margen pasivo. Estas cuencas se caracterizan por una mínima actividad tectónica, ya que se encuentran alejadas de los márgenes convergentes. Además, debido a la

ausencia de cordilleras cercanas que aporten sedimentos clásticos por erosión, los depósitos predominantes son carbonatados.

La acumulación de estos sedimentos genera un peso adicional que, junto con la subsidencia térmica, provoca un hundimiento progresivo de la cuenca, aumentando su profundidad. La estabilidad tectónica de las cuencas de margen pasivo las convierte en áreas favorables para la generación de hidrocarburos, ya que también suelen ser hábitats preferidos por organismos marinos, como se observa en el caso del Golfo de México.

Estas cuencas típicamente presentan una plataforma carbonatada de baja pendiente, seguida de un talud continental y, finalmente, una llanura abisal. Además, su estabilidad favorece el desarrollo de arrecifes y la formación de turbiditas, que marcan las secuencias sedimentarias en el talud y la llanura abisal, tal como se observa en la figura 2.

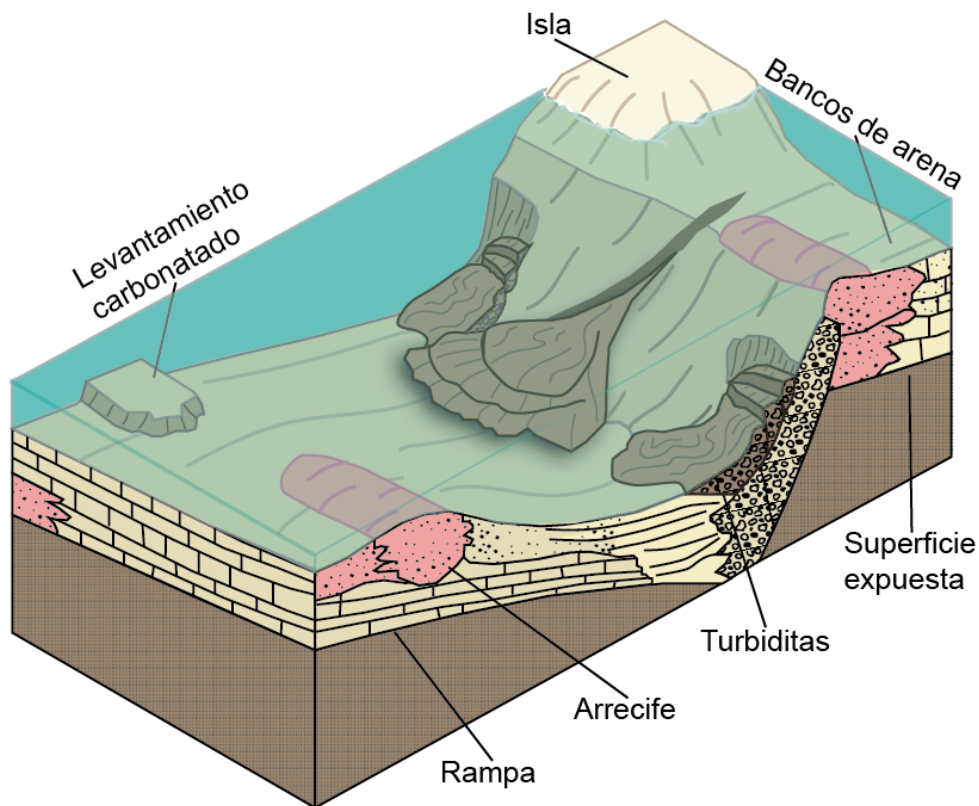


Figura 2. Cuenca carbonatada en un margen pasivo. Se observan los depósitos turbidíticos en el talud y el desarrollo de calizas en la plataforma. Modificado de Einsele (2000).

2.1.3. Cuencas en márgenes transformantes

2.1.3.1. Cuencas *pull-apart*

Se originan tanto en la corteza continental como oceánica, en donde exista una zona de cizalla, por lo general carecen de simetría y las bifurcaciones generadas al desplazarse una contrariamente a la otra, generan espacios en la corteza que son las cuencas *pull-apart*, es decir, el desplazamiento generado por una mega falla lateral (falla transformante) que no sigue una línea recta genera, por su naturaleza, bajos estructurales en donde tienden a acumularse sedimentos (Figura 3).

Su superficie depende totalmente del tamaño de la falla lateral (que puede lograr las decenas hasta centenas de kilómetros) y su profundidad está en función de la subsidencia tectónica. De acuerdo con Einsele (2000) la tasa de desplazamiento de las fallas suele ser elevada (de 1 a 10 [cm/año]) al igual que la subsidencia que es superior a la que ocurre en las cuencas de *rift* alcanzado cifras de 10 [mm/año].

El aporte de sedimentos varía según sea el caso: en cuencas continentales el aporte es fluvial y lacustre, por lo que predominan los terrígenos; en el caso de las cuencas que se originan en el mar, el aporte es principalmente biogénico silíceo y carbonatado, tal como ocurre en el Golfo de California.

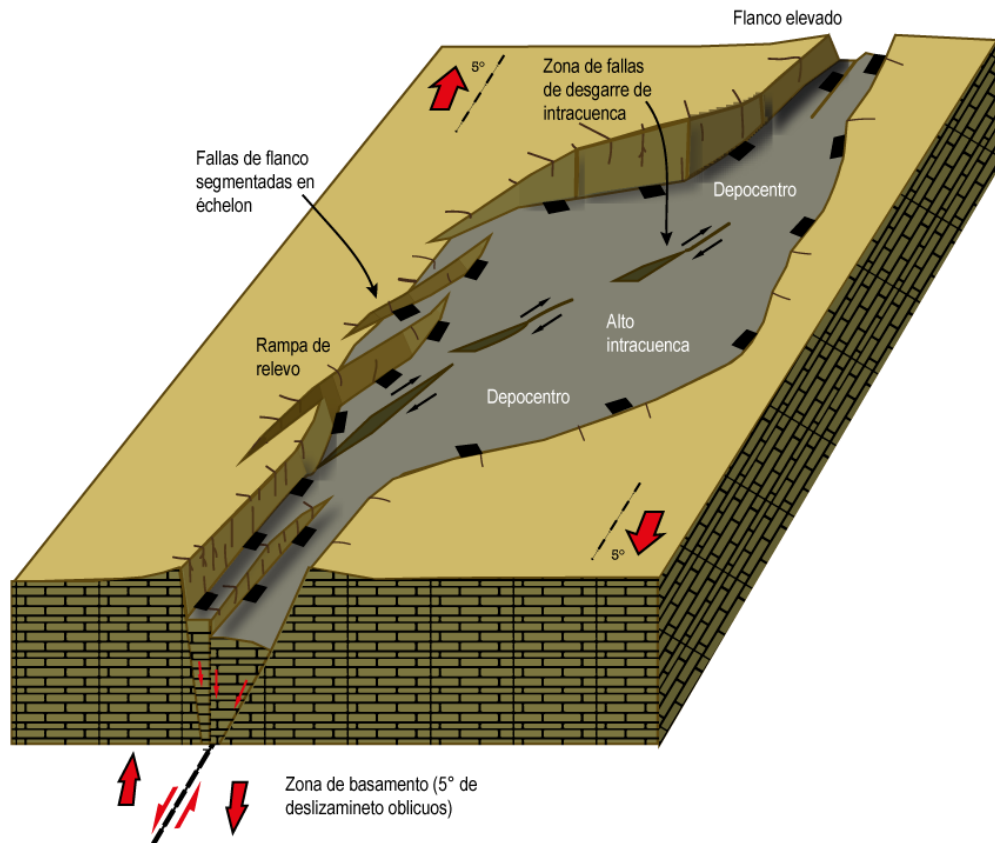


Figura 3. Esquema que representa la geometría de una cuenca *pull-apart*. La asimetría del margen transformante es la que origina el bajo estructural al desplazarse un bloque respecto a otro.

Modificado de Wu *et al.* (2009).

2.2. Clasificación de plataformas sedimentarias

Las plataformas sedimentarias son estructuras geológicas formadas en un ambiente transicional tanto en márgenes pasivos como activos. Las plataformas siempre están sumergidas bajo el mar (aunque pueden emerger en ciertos periodos de tiempo debido a cambios eustáticos), se ubican entre la playa y el talud abisal, en la zona nerítica. Generalmente, la rotura de pendiente hacia el talud se halla a 200 metros de profundidad, variando la longitud de la plataforma según el contexto tectónico (Arche, 2010). Su clasificación se divide en dos tipos: plataformas siliciclásticas y plataformas carbonatadas.

2.2.1. Plataformas siliciclásticas

Se caracterizan porque los paquetes sedimentarios se forman por el aporte clástico del continente a través de ríos, también puede provenir de la propia erosión de la plataforma. El aporte sedimentario está en función del clima, la precipitación fluvial, la vegetación, las corrientes oceánicas y la tectónica. Por ejemplo, en zonas con muy pocas precipitaciones y muy baja temperatura como un glaciar, los clastos arrastrados a la plataforma serán tililas, mientras que, en una zona con alta precipitación y temperatura el aporte será principalmente de material arcilloso. A su vez, se depositarán granos más gruesos en márgenes convergentes y más finos en márgenes pasivos debido al mayor tiempo en el cual han sido retrabajados los sedimentos y a la mayor complejidad de sus redes fluviales (Arche, 2010).

Según Shepard (1977), existen 6 tipos de plataformas siliciclásticas en función de su condición tectónica y el clima: glaciares (depósitos de *tills* morrénicos), con arrecifes de coral, bordeadas por islas o bancos rocosos, relacionadas con la tectónica de placas (con una gran inclinación y muy estrechas), con barras alargadas de arena (por acción de un delta) y relacionadas con grandes ríos (aporte clástico elevado). Así mismo, Boggs (2006) propone su división en dos tipos principales en función de sus condiciones de depósito y transporte sedimentario: las dominadas por el clima y las dominadas por la marea.

Boggs (2006) explica que las plataformas dominadas por el clima generalmente están influenciadas por fenómenos climáticos como tormentas o huracanes, los cuales erosionan intensamente la costa y facilitan el depósito de sedimentos en la plataforma como las areniscas; mientras que las dominadas por la marea son afectadas por los movimientos verticales y horizontales del tirante de agua, debido a su menor energía el depósito y transporte de sedimentos es más lento. Las plataformas de la costa oeste de Estados Unidos son dominadas principalmente por el clima, mientras que dominadas por la marea son las plataformas del Reino Unido, Dinamarca y Noruega.

2.2.2. Plataformas carbonatadas

Se originan por la precipitación de carbonatos provenientes de la desintegración de restos duros de organismos sésiles calcáreos como las conchas de moluscos marinos y corales; también por el transporte de carbonatos disueltos por ríos superficiales o subterráneos. Dado que, la precipitación de carbonatos en el agua marina se favorece con el aumento de la temperatura, las plataformas carbonatadas son comunes en zonas cercanas al ecuador; con más precisión, entre los 30° N y los 30° S en latitud (Arche, 2010).

También están asociadas a zonas tectónicamente pasivas, dado que el aporte clástico proveniente del continente suele ser poco relevante. Las plataformas continentales se caracterizan por tener un bajo ángulo de inclinación y tener una extensión considerable mar adentro. Las plataformas carbonatadas no suelen superar los 200 metros.

Según Read (1985), existen dos tipos de plataformas carbonatadas: las plataformas con laguna restringida, caracterizadas por una pendiente suave protegida del oleaje por una barrera que generalmente es un sistema arrecifal generando así una especie de lago, donde después de la barrera la pendiente suele cambiar abruptamente a más de 45° de inclinación; las rampas, por su parte tienen una pendiente muy suave, generalmente de pocos grados de inclinación, no protegidas por una barrera, por lo que la mecánica de sedimentación se debe principalmente al oleaje (Figura 4).

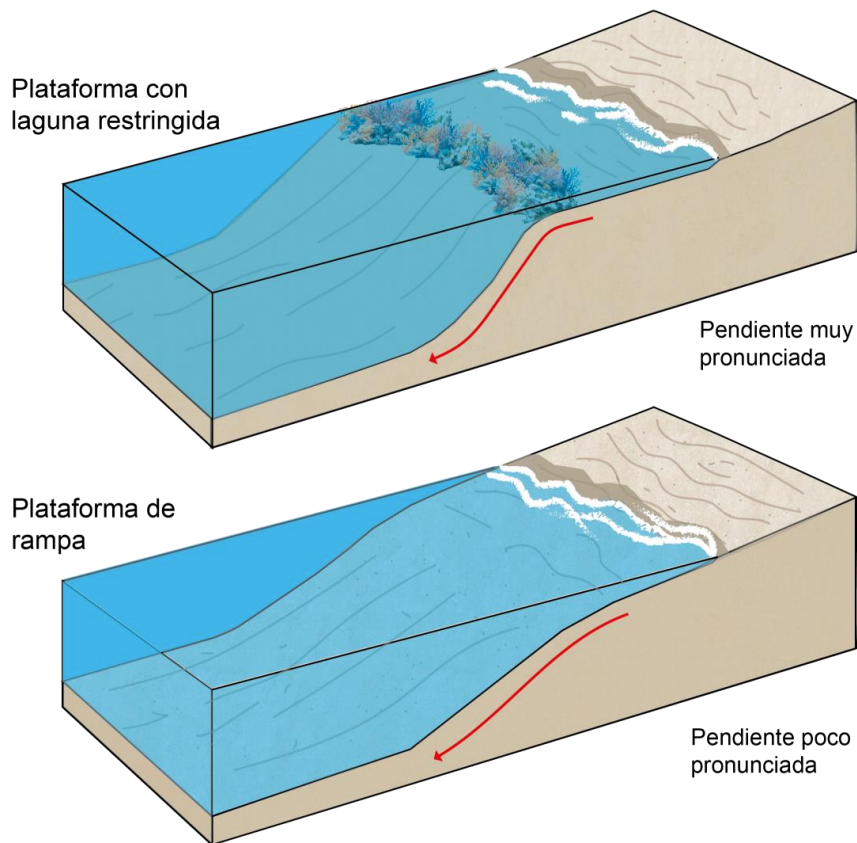


Figura 4. Esquema que representa la pendiente de las plataformas con laguna restringida y de rampa. Las plataformas con laguna restringida tienen una pendiente muy pronunciada después del arrecife.

3. Generalidades

3.1. Ubicación

La Sonda de Campeche es una región petrolera localizada en el extremo sur del Golfo de México, enfrente de las costas de Tabasco y Campeche, en el sureste mexicano. La figura 5 muestra la localización del área entre las coordenadas UTM, de izquierda a derecha y en sentido horario: 450,874 mE, 2,220,286 mN; 649,491 mE, 2,220,550 mN; 650,063 mE, 2,054,259 mN y 451,248 mE, 2,054,303 mN. En la misma figura se observa la localización del Complejo Cantarell y otros campos importantes por su reserva y producción.

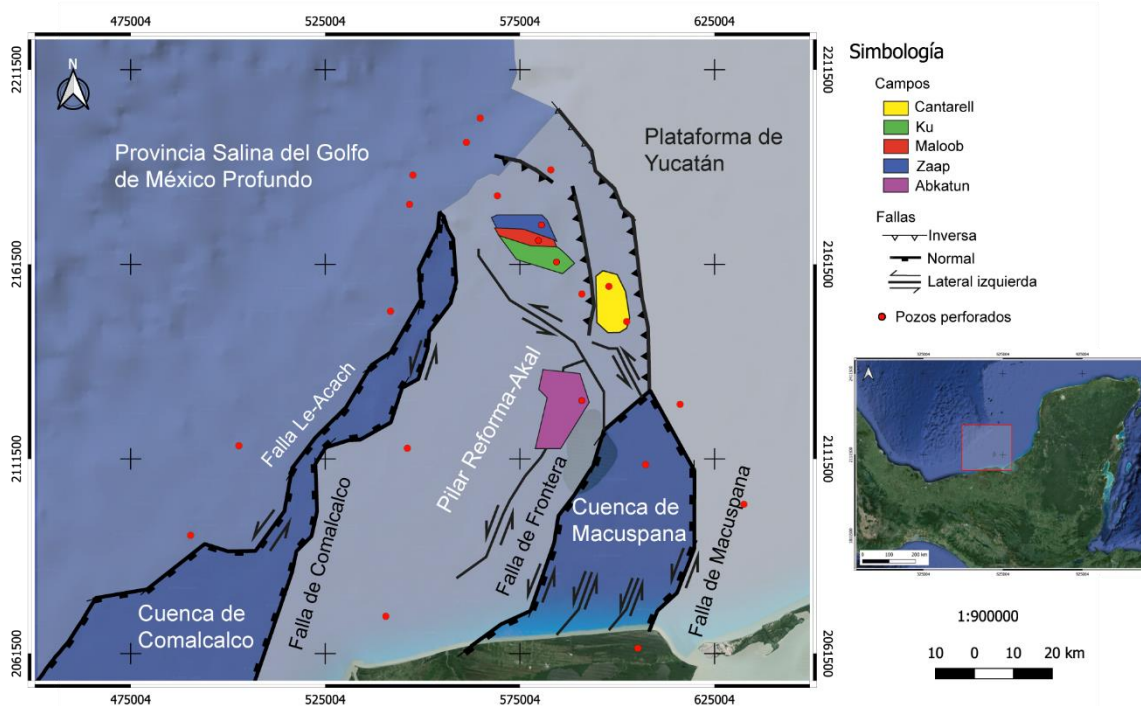


Figura 5. Mapa de la localización de la Sonda de Campeche con sus principales provincias morfoestructurales. Modificado de Ortuño *et al.*, (2009).

3.2. Estado del arte

Los primeros trabajos de exploración en la Sonda de Campeche comenzaron en 1972 tras el reporte de Rudesindo Cantarell a Petróleos Mexicanos (PEMEX) donde indicaba la localización de una gran emanación de aceite en el océano, a 70 kilómetros al NW de la costa de Ciudad del Carmen, Campeche (Ángeles, 2004). Se utilizaron métodos geofísicos de sismología de reflexión y refracción, gravimetría y magnetometría (Ortiz, 2010) cubriendo una superficie total de 8,000 [km²] (Ángeles, 2004).

La exploración realizada por PEMEX permitió localizar 30 estructuras con cierre favorable para la acumulación de hidrocarburos, siendo las más destacadas las pertenecientes al Complejo Cantarell, que se comenzó a perforar en 1974 con el pozo Chac-1 (Ángeles, 2004). Al mismo tiempo que la empresa mexicana prospectaba en la Sonda de Campeche, Flores (1978) realizaba los primeros trabajos estratigráficos a través de los pozos perforados. En su investigación

identificó los pisos del Tithoniano, Kimmeridgiano y Oxfordiano y caracterizó a la roca almacén a través de análisis bioestratigráficos como un flujo de exoclastos desarrollado en el Cretácico superior.

A su vez, Meneses de Gyves (1980) hizo aportes descriptivos a la roca almacén. Él describió los ambientes de depósito del Oxfordiano con sus diferentes facies; además describió el marco tectónico y estructural de la región identificando fallas inversas longitudinales; también describió a las rocas productoras como dolomías del Jurásico superior y Cretácico además de una brecha del Paleoceno.

Pindell (1985) realizó uno de los primeros estudios regionales del Golfo de México y el Caribe, donde explicó su evolución a partir del proceso de *rifting* ocurrido a finales del Triásico que provocó el movimiento del Bloque de Yucatán, un elemento clave en la evolución geológica de la Sonda de Campeche. Ángeles (1992, 1994) realizó un estudio estratigráfico y estructural donde detalló la evolución tectónica de la Sonda de Campeche y su implicación en la generación de hidrocarburos; Ángeles (1996) propuso actualizar la estratigrafía del Jurásico superior agrupando las facies con características similares en formaciones específicas con el objetivo de mejorar la prospección petrolera.

Grajales *et al.* (2003) describieron los ambientes sedimentarios donde se desarrollaron los clastos de la brecha K-Pg con base en su contenido fósil a través del análisis de información de un pozo del Complejo Cantarell. Padilla y Sánchez (2007) hizo una síntesis general de la evolución geológica del Sureste Mexicano donde integró la información recopilada en décadas anteriores en un marco regional y asociado con la apertura del Golfo de México. En el mismo año, Reyna (2007) realizó un compendio con todas las especies de foraminíferos encontrados en un pozo exploratorio relativos al Cenozoico, destacando la presencia de *Globorotalia menardii* y *Globorotalia mayeri* que permitieron identificar la discordancia del Mioceno superior-medio debido a la ausencia de su biozona entre ambos horizontes.

Pindell y Kennan (2009) actualizaron la información de 1985, incorporando la evolución tectónica del norte de Sudamérica y empleando un marco de referencia

del manto. Incluyeron información de pozos y estudios sísmicos, lo que permitió una mejor comprensión de los movimientos de las placas tectónicas y la interacción entre el Golfo de México, el Caribe y América del Sur. Así mismo, Cantú (2009) propuso redefinir las secuencias estratigráficas propuestas por Ángeles (1996) incorporando estudios geofísicos de rayos gamma, definiendo así a la formación Bacab y su miembro superior “Tson” relativos al Oxfordiano medio.

De 2004 a la fecha PEMEX ha publicado trabajos anuales sobre las reservas de hidrocarburos del país lo que ha contribuido a conocer mejor la geología de las Cuencas del Sureste y su evolución, en este trabajo se destaca el de PEMEX (2012). Entre los proyectos más recientes (julio de 2024) se encuentran la perforación del pozo Etkal-201EXP por parte de PEMEX con una producción total esperada de aceite superligero de 14.3 [mmbpce] (Mariano, 5 de julio de 2024) y la prospección de los campos Pokoch e Ichalkil por parte de Fieldwood Energy (Mariano, 18 de julio de 2024).

4. Desarrollo del tema

4.1. Descripción general

En su condición actual la Sonda de Campeche pertenece la gran cuenca de margen pasivo del Golfo México, cuenta con un tirante de agua promedio de 100 metros y según Hernández (2008) con un máximo de 500 metros. Guzmán *et al.* (2000) indican la presencia de 14 campos caracterizados, 10 de ellos con potencial productor de petróleo y aceite ligeramente pesado a pesado. La mayoría de sus yacimientos se presentan en diferentes facies de la brecha calcárea del límite K-Pg y en los sedimentos oolíticos del Jurásico superior (Guzmán *et al.*, 2000).

Ángeles (2004) menciona su extensión en un área total de 15,000 [km²], con una forma irregular (Figura 4). La Provincia Salina del Golfo de México Profundo corresponde con la zona más extensa de la Sonda y se caracterizan por su gran deformación provocada por el movimiento de la sal del Paleoceno al Mioceno. Así mismo, la Cuenca de Comalcalco, el Pilar Reforma-Akal y la Cuenca de Macuspana tienen secuencias deformadas con una vergencia general NW-SE y se encuentran

delimitados por fallas normales lístricas y transformantes de Le-Acach, de Comalcalco y Macuspana. La Plataforma de Yucatán presenta muy poca deformación y tiene una pendiente muy suave debido al margen pasivo en que se encuentra actualmente.

4.2. Sedimentología

El depósito de las secuencias sedimentarias inició en el Triásico tardío durante los primeros estadios de la apertura de Pangea, los registros corresponden a lechos rojos que se originaron en un ambiente continental previo a las primeras secuencias marinas. Durante el Calloviano ocurrió una transgresión marina generalizada que, debido a las condiciones áridas con subsidencia continua permitió el depósito de gruesas capas de evaporitas (principalmente halita) en ambientes de *sabkha* a lo largo del naciente Golfo de México concentrándose en el noreste y sureste, disminuyendo en espesor hacia los márgenes (Ortiz, 2010).

En el Oxfordiano, el desplazamiento del Bloque de Yucatán configuró el principal elemento estructural que condicionó el depósito sedimentario pues estableció grandes plataformas someras idóneas para el depósito carbonatado (Padilla y Sánchez, 2007). Así mismo, la erosión de la topografía elevada propició el depósito de areniscas eólicas y de playa, que poco a poco fueron cubiertas por depósitos arcillosos, calcáreo-arcillosos y carbonatados en la sección oriental de la Sonda de Campeche. Ángeles (2004) menciona que los depósitos clásticos se desarrollaron por la presencia de zonas de antecosta y barras arenosas a lo largo del margen continental (Figura 6). La presencia de cuarzo, feldespatos y fragmentos líticos que constituyen a las arenas son idénticos a los que conformaron el basamento del Bloque de Yucatán.

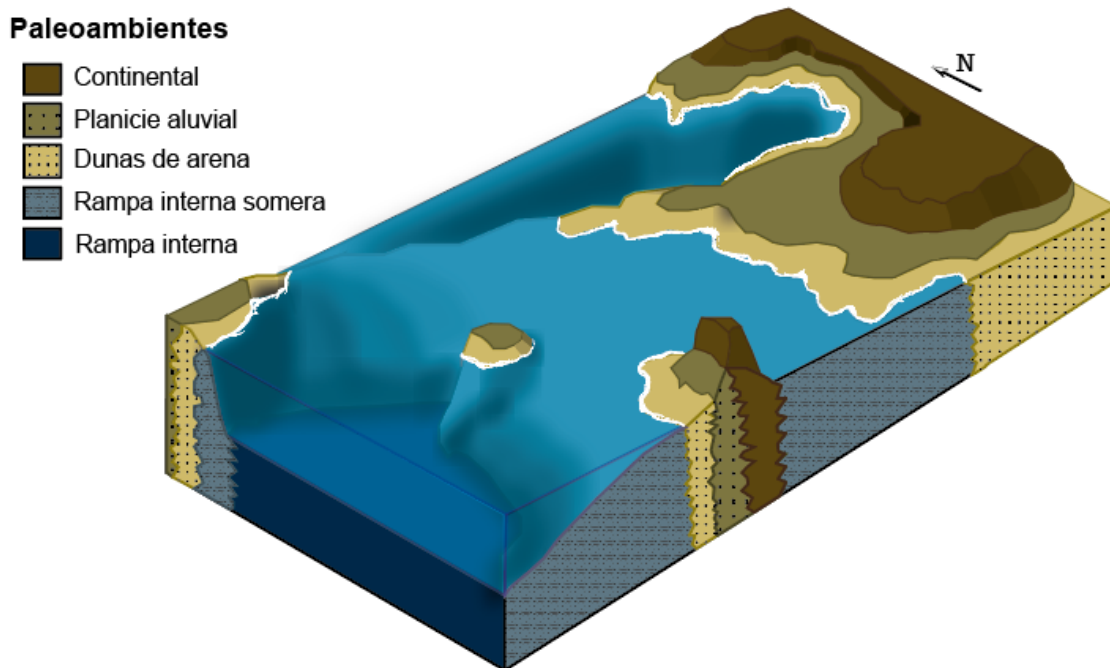


Figura 6. Modelos sedimentarios del Oxfordiano que dio origen a las areniscas eólicas costeras provenientes de la erosión del Bloque de Yucatán. Modificado de CPE (2006b).

En el Kimmeridgiano la zona evolucionó a un ambiente restringido de alta energía donde la presencia de altos de basamento fue cubierta de agua y sobre ellos se desarrollaron bancos oolíticos que obstaculizaron el flujo de agua favoreciendo la evaporación de soluciones cargadas de magnesio (Ángeles, 1996). La dolomitización incrementó significativamente su permeabilidad, convirtiendo a esta secuencia en las rocas almacenadoras más importante del Jurásico. Ángeles (2004) propone un modelo sedimentario con tres zonas de depósito: la zona de barras frontales con mayor contenido de ooides, y la zona lagunar y de barras interiores con menor contenido. Además, las transgresiones marinas promovieron su migración, tendiendo a acuñarse hacia el continente, lo que aumentó su influencia terrígena (Figura 7).

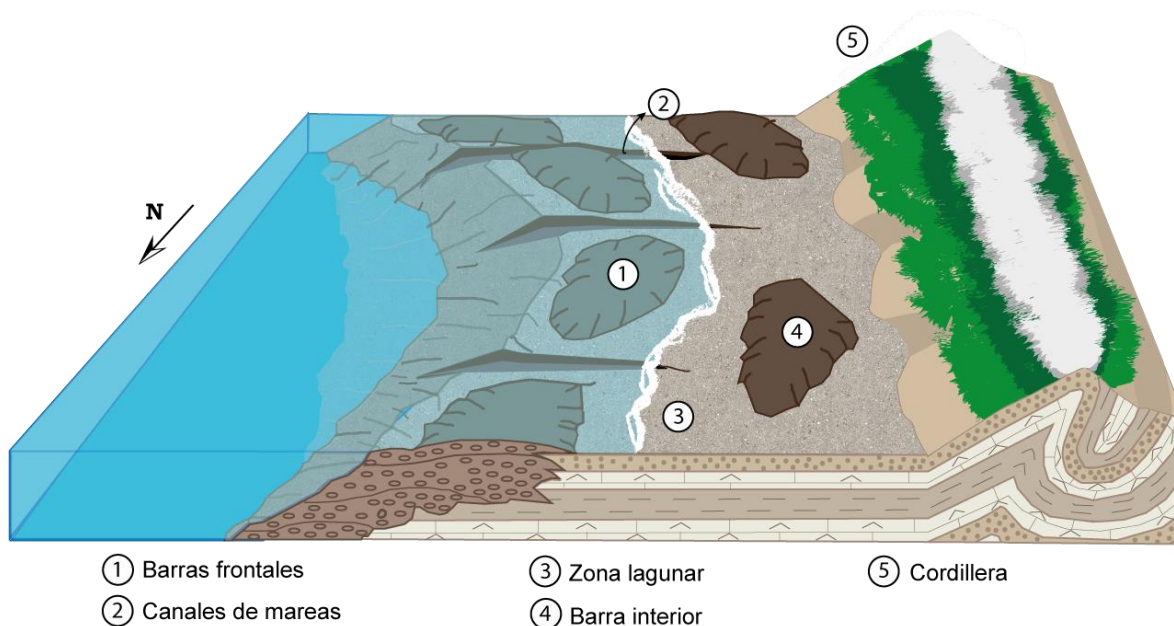


Figura 7. Modelo sedimentario representativo de los bancos oolíticos del Kimmeridgiano que condicionaron el flujo de agua formando la zona lagunar y de barras interiores. Modificado de Ángeles (2004).

En el Tithoniano, Ángeles (1996) destaca la presencia de radiolarios piritizados y la abundancia de materia orgánica interpretando un cambio significativo a un ambiente reductor con tirantes de agua más profundos. La transgresión marina se aceleró debido a una subsidencia rápida de la plataforma cambiando el depósito restringido del Kimmeridgiano hacia uno predominantemente calcáreo-arcilloso (Ángeles, 2004).

Al inicio del Cretácico las condiciones eran muy similares a las del Tithoniano. Durante el Hauteriviano y Barremiano, la subsidencia continuó debido a la apertura del Golfo de México que propició que otras áreas de topografía baja se inundaran propiciando el depósito de carbonatos arrecifales con rudistas en la Plataforma de Yucatán. Durante el Aptiano, el depósito carbonatado fue levemente reemplazado por el depósito de lutitas con delgadas capas de debido a un cambio en la velocidad de subsidencia en un periodo de 5 millones de años (Padilla y Sánchez, 2007). A su vez, durante el Albiano-Cenomaniano, continuó la subsidencia a una velocidad constante con más formación de calizas y para el Turoniano cambiaron las condiciones de depósito pues la actividad volcánica se incrementó en el occidente

de México debido a la subducción de la Paleoplaca de Farallón debajo de la Placa Norteamericana. Durante el Coniaciano-Santoniano, el incremento de la actividad volcánica propició el depósito de potentes capas de bentonita que duraron hasta el Maastrichtiano. Finalmente, para el Coniaciano-Maastrichtiano se desarrolló un ambiente clásico de plataforma, talud, pie de talud, abanico distal, piso de cuenca y de la cuenca misma con registro en la sección central de la Sonda de Campeche (Figura 8).

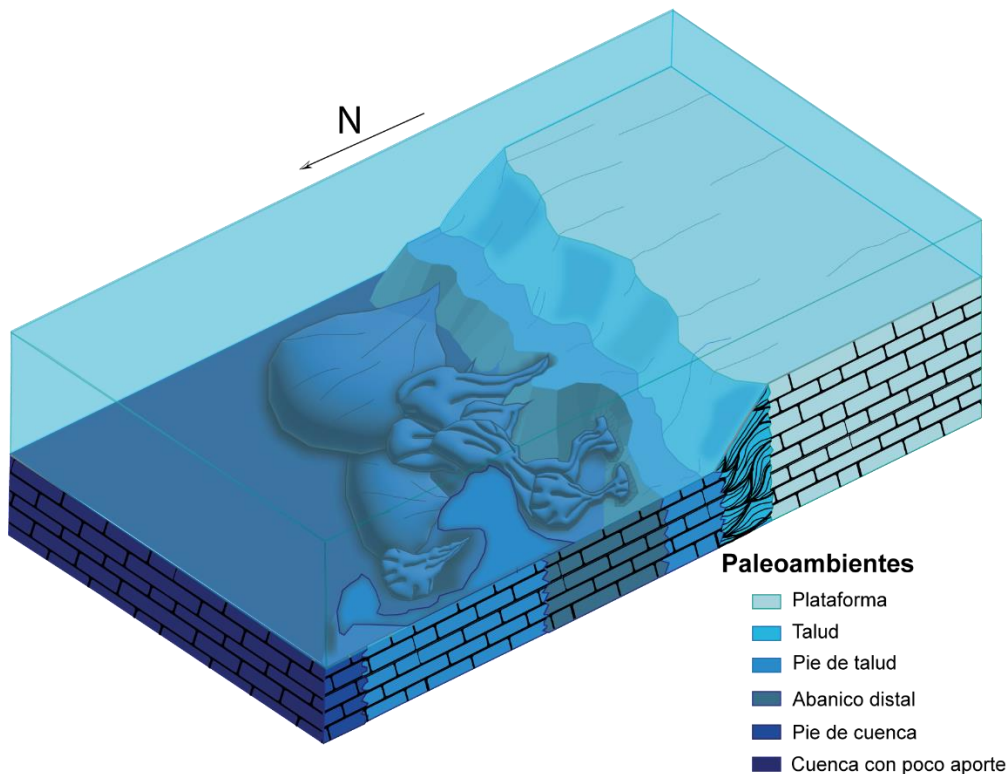


Figura 8. Modelo sedimentario del Campaniano-Maastrichtiano. Modificado de CPE (2006a).

En el límite del Cretácico tardío-Paleógeno, el meteorito de Chicxulub impactó en la Plataforma de Yucatán modificando el depósito de sedimentos en la región. Padilla y Sánchez (2007) atribuye el origen de la brecha más productora de la Sonda de Campeche a los estragos causados por tal impacto, que destruyó parte de la plataforma carbonatada y ocasionó flujo de escombros (brechas calcáreas) hacia aguas profundas. Aunque, Padilla y Sánchez (2007) también propone que el material eyectado se acumuló cerca del cráter y otra parte se combinó con el colapso de clastos carbonatados y se transportó hacia el fondo de la cuenca debido

al movimiento producido por el impacto, en conjunto, el tipo de roca y el rápido desarrollo del evento facilitó la formación rápida de la brecha, lo que explica su baja cantidad de matriz y en consecuencia su alta porosidad y permeabilidad.

Posteriormente en el Paleoceno, la sedimentación terrígena superó por completo a la sedimentación carbonatada debido al levantamiento de la Sierra Madre Oriental (SMOr) que formó el Orógeno Mexicano con su respectiva erosión y transporte de sedimentos hacia el Golfo de México. Durante el Eoceno, se depositaron gruesos paquetes de conglomerados de origen fluvial en ambientes transicionales como deltas. En el Oligoceno, la actividad tectónica disminuyó levemente lo que propició el depósito de carbonatos durante un breve periodo de tiempo y al mismo tiempo, la halocinesis fue predominante, controlando así el depósito terrígeno en las cuencas de Comalcalco y Salina del Istmo.

Para el Neógeno, la Orogenia Chiapaneca tuvo un pulso de levantamiento con su respectiva erosión originando el depósito de sedimentos terrígenos. En el Mioceno, Ángeles (2004) menciona que la erosión de la Sierra de Chiapas aportó grandes volúmenes de sedimentos terrígenos a la cuenca propiciando la progradación de los sedimentos arcillosos y arenosos hacia la plataforma acumulándose una gruesa secuencia de lutitas y areniscas bentoníticas. Así mismo, Ángeles (2004) atribuye el origen de la bentonita a la gran cantidad de volcanes resultado del levantamiento de la SMOr provocando emanaciones sustanciales de material piroclástico que a través de fuentes eólicas y fluviales fue transportada y depositada en la zona.

El depósito continuó hasta finales del Mioceno con un patrón general progradante hacia el norte y noroeste sobre el área del Pilar Reforma-Akal y hacia la parte norte de la Cuenca Salina del Istmo (Schlumberger, 2010). Ya para el Plioceno, ocurrió un evento de regresión marina que propició el depósito de secuencias arcillosas; actualmente funcionan como rocas sello en algunos sistemas petroleros locales. Finalmente, en el Pleistoceno, la configuración de las cuencas y plataformas de la zona eran muy similares a las modernas por lo que la sedimentación comenzó a asemejarse a la actual.

4.3. Estratigrafía

Las secuencias estratigráficas de la Sonda de Campeche se componen de cinco conjuntos principales: Jurásico, Cretácico, Paleógeno y Neógeno, delimitados por eventos geológicos de gran magnitud que cambiaron por completo sus condiciones de depósito y litología. De acuerdo con Ortiz (2010), las secuencias son: a) evaporítica del Calloviano, b) calcáreo-arcillosa del Jurásico superior, c) carbonatada del Cretácico, d) brecha calcárea del Cretácico superior-Paleógeno y e) clástica del Cenozoico (Figura 9).

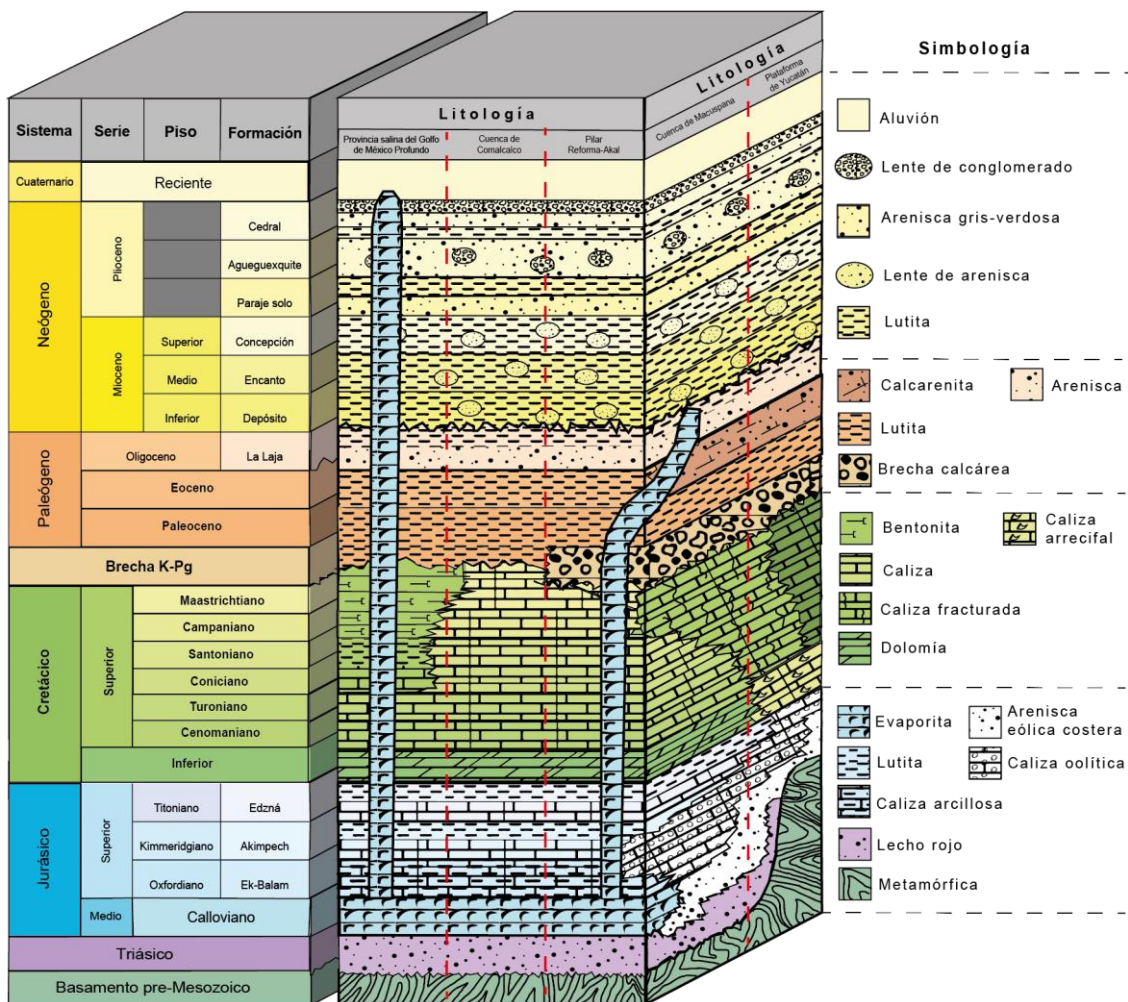


Figura 9. Columna estratigráfica de la Sonda de Campeche. Modificado de Ángeles (2004).

El basamento está compuesto principalmente por rocas metamórficas y metasedimentarias altamente fracturadas, como esquistos del Precámbrico superior

y del Paleozoico inferior, que fueron intrusionados por granitos, granodioritas y tonalitas del Permo-Triásico (CNH, s. f.); estas rocas afloran en algunas regiones de la Sierra Juárez y de Chiapas. Las rocas metasedimentarias consisten principalmente en areniscas de grano grueso y limonitas, con algunos horizontes ocasionales de conglomerados y lutitas con metamorfismo de bajo grado (CNH, s. f.).

Tras el basamento, la ruptura de Pangea en el proto-Golfo de México, se favoreció el depósito de lechos rojos en grandes valles fluviales, posteriormente con una mayor subsidencia ocurrió la primera transgresión en la protocuenca, lo que permitió un flujo constante de agua marina que indujo el depósito clástico hasta inicios del Calloviano, cuando fue reemplazado por el depósito salino.

4.3.1. La secuencia evaporítica del Calloviano

El Calloviano es el piso más reciente del Jurásico medio y data entre 165 y 161 [Ma]. Durante este lapso se depositaron potentes estratos de evaporitas cristalinas translúcidas con un espesor del orden de 2,000 metros según los datos obtenidos por los pozos que han cortado la unidad como el Trinitaria-1, Bacab-2, Balam-1, Ek-31, entre otros (Ortiz, 2010). Su extensión abarca desde la Sierra de Chiapas hasta la Provincia Salina del Golfo de México Profundo.

4.3.2. La secuencia calcáreo-arcillosa del Jurásico superior

Las secuencias calcáreo-arcillosa y arcillosa del Jurásico superior formadas en un ambiente anóxico, contienen la mayor concentración de materia orgánica tanto continental como marina que propició el desarrollo de hidrocarburos y, debido a sus condiciones geológicas que involucran cambios de facies, fungen como rocas almacén o generadoras. El Bloque de Yucatán fue el elemento topográfico del sur de México, que al erosionarse produjo arenas de playa y barras arenosas, conjuntando la acción del oleaje y del viento constituyeron las areniscas eólicas costeras de la Paleoplataforma de Yucatán y de la Cuenca de Macuspana. A continuación, se describe lo más relevante de la estratigrafía del Oxfordiano al Tithoniano.

4.3.2.1. Oxfordiano

Está representado por la unidad litoestratigráfica Ek-Balam propuesta por Ángeles (1996). Litológicamente se conforma por areniscas y limonitas bentoníticas de color gris olivo en paquetes que van desde los 57 metros hasta los 440 metros, con intercalaciones de calizas arcillosas y algunas parcialmente silicificadas. En su base también hay registro de calizas *wackestone* y *packstone* con peletoides que gradúan a *mudstone* y lutitas bentoníticas.

4.3.2.2. Kimmeridgiano

La unidad estratigráfica del Kimmeridgiano es la Formación Akimpech; se formó por la erosión del Bloque de Yucatán y la Sierra de Chiapas (Ángeles, 1996) y por carbonatos en ciclos transgresivos-regresivos; se caracteriza por una secuencia cíclica de carbonatos y terrígenos, el espesor va desde los 63 metros en el pozo Mucuy-1 hasta los 1,272 metros en el pozo Ku-407 con un promedio de 454 metros (Ángeles, 1996).

Ángeles (1996) dividió a la unidad en los miembros denominados “B, C, D y E”. a) el miembro “B” se compone de limonitas y lutitas arenosas bentoníticas; b) el “C” lo componen dolomías microcristalinas y calizas *packstone* con peletoides intercaladas con limonitas y lutitas arenosas de color gris olivo; c) el miembro “D” se constituye de limonitas y lutitas arenosas con abundante materia orgánica, principalmente algácea y c) el miembro oolítico “E” se compone de dolomías mesocristalinas y microcristalinas que se desarrollaron a partir de calizas con presencia de ooides (Ángeles, 2004).

4.3.2.3. Tithoniano

Es una secuencia importante dado que son las rocas generadoras más productoras de las cuencas del Sureste Mexicano. Ángeles (1996) propone denominarla Formación Edzná, la que se compone de los siguientes 3 miembros: a) El miembro “F” se compone principalmente de calizas *mudstone* de color gris claro con presencia de materia orgánica; b) el miembro “G” se compone de lutitas calcáreas y calizas arcillosas oscuras con ligeras intercalaciones de margas y abundante

materia orgánica de origen algáceo; y c) el miembro “H” es predominantemente carbonatado, con presencia de calizas *mudstone* y calizas arcillosas.

4.3.3. La secuencia carbonatada del Cretácico

El registro estratigráfico del Cretácico en la Sonda de Campeche está marcado por secuencias carbonatadas de baja porosidad con una consecuente transición a secuencias clásticas bentoníticas al final del periodo debido a la actividad volcánica que afectó a la región.

En el Cretácico inferior, se depositaron estratos de calizas *mudstone* bentoníticas dolomitizadas de color verde grisáceo y dolomías microcristalinas de color gris verdoso; así como calizas cretosas de color crema. Al sur, en la Plataforma de Yucatán se depositaron paquetes de calizas fosilíferas con rudistas.

En el Cretácico superior, se depositaron capas de *mudstone* y calizas arcillosas de color gris oscuro y dolomías microcristalinas de color gris olivo a gris blanquizo, además de lutitas oscuras. En el sector noroccidental se depositaron capas de calizas bentoníticas y bentonita; el evento volcánico duró hasta el Maastrichtiano. En el talud de la Plataforma de Yucatán se desarrollaron brechas calcáreas y calizas fracturadas debido al cambio de pendiente en la cuenca. Por su parte, en la cima de la columna se formaron estratos de *mudstone* a *wackestone* con abundancia de exoclastos, bioclastos y litoclastos de color crema, café y gris olivo (Ángeles, 2004).

4.3.4. La secuencia de brecha calcárea del Cretácico superior-Paleógeno

También denominada brecha K-Pg, en su registro de la Sonda de Campeche, es la principal roca almacenadora de hidrocarburos dada su excelente porosidad y permeabilidad donde es casi nulo el porcentaje de matriz. Tiene un espesor de 700 metros en algunas localidades como Akal (Padilla y Sánchez, 2007), que la hace capaz de almacenar grandes volúmenes de hidrocarburos en un área extensa. De acuerdo con Ángeles (2004), litológicamente se compone de dolomías, calizas y exoclastos heterogéneos de tamaño grava con fósiles retrabajados de aguas someras; presenta un significativo cambio de facies desde brechas proximales a

brechas distales. Es discordante a las rocas del Cretácico y tiene una distribución irregular, con los mayores espesores en el sector nororiental de la Sonda de Campeche.

4.3.5. La secuencia clástica del Cenozoico

Los ambientes de depósito cambiaron bruscamente después del desarrollo de la brecha calcárea, debido al inicio del levantamiento del Orógeno Mexicano ocurrido en el noroeste de la región y por el Orógeno de Chiapas, cuyo desarrollo de ambos inició en Paleógeno, que al erosionarse propiciaron el transporte y depósito de sedimentos clásticos en un clima tropical con abundantes ríos que desembocaban en el sur del Golfo de México. Los depósitos son principalmente bentonitas grisáceas y lutitas bentoníticas con intercalaciones de brechas intraformacionales. En el Eoceno, se depositaron arcillas con flujos turbidíticos calcáreos conocidos como “Calcarenitas del Eoceno” (Ángeles, 2004). En el Oligoceno, se formaron lutitas grisáceas intercaladas con areniscas de la Formación La Laja, las que se presentan discordantes a las rocas terrígenas del Mioceno, principalmente lutitas y areniscas que tienen una distribución irregular en la región.

Durante el Mioceno, se depositaron sedimentos clásticos que constituyen las secuencias de las formaciones Depósito, Encanto, Concepción Inferior, Concepción Superior y Filísola (Ángeles, 2004); en su conjunto, están integradas de lutitas bentoníticas con lentes de areniscas azules y cafés de grano fino y grueso; estas secuencias fueron deformadas debido al movimiento de sal del Calloviano, que en algunos sectores los diapiros formaron minicuenas con sus respectivos rellenos terrígenos.

Para el Plioceno, se depositaron las rocas de las formaciones Paraje Solo, Agueguexquite y Cedral. La primera se compone por areniscas gris verdosas intercaladas con lutitas arenosas y lutitas carbonosas; la segunda se conforma de areniscas grises intercaladas con lentes de grava con un espesor de 400-500 [m] (PEMEX, 1988), y la tercera, está compuesta por areniscas intercaladas con lutitas grises y conglomerados rojizos mal estratificados. Hacia el sur y sureste, se destaca el desarrollo de calizas que continuó hasta el Plioceno en la Plataforma de Yucatán

debido a su estabilidad tectónica, donde en el Cuaternario, se depositó un aluvión carbonatado con poca o nula compactación.

4.4. Geología estructural

La geología estructural de la Sonda de Campeche es compleja debido a su estrecha relación con la historia geológica del Golfo de México. El primer evento tectónico ocurrió en el Triásico, con la ruptura de Pangea y el último el Plioceno, con el fin de la Orogenia Chiapaneca. A lo largo de este tiempo, se depositaron secuencias evaporíticas, carbonatadas y clásticas en un orden cronológico, las cuales al deformarse en varias fases de deformación dieron como resultados conjuntos de fallas (normales, inversas y laterales), estructuras salinas (domos, diapiros y canopies) y pliegues (simétricos, asimétricos, buzantes, entre otros).

Los eventos de deformación mencionados provocaron discordancias en el depósito estratigráfico del Sureste Mexicano siendo las más estudiadas, las de basamento y las ocasionadas por la Orogenia Chiapaneca. Las últimas, se presentan como discordancias angulares que separan las rocas más antiguas y deformadas de las más jóvenes, que tienen poca deformación y son afectadas por fallas normales. Así mismo, Ángeles (1994) propone la existencia de tres estilos de deformación principales que afectaron estructuralmente a la Sonda de Campeche: primero, ocurrió un evento de tectonismo que acusó deformación extensional entre el Jurásico y el Cretácico temprano. Luego, durante el Mioceno, se produjo un evento de tectonismo compresional y de fallamiento lateral. Finalmente, durante el Plioceno-Holoceno, hubo otro evento de tectonismo que causó deformación extensional.

El primer episodio se correlaciona con la apertura del Golfo de México, generando fallas normales de bloques inclinados con una orientación preferente NW-SE (Ángeles, 1994). El cambio compresional en el segundo episodio ocurrió debido a la interacción de la Paleoplaca de Farallón y de la Placa del Caribe con la Placa de Norteamérica, del Paleoceno al Mioceno medio, correlacionable con las últimas fases de deformación del Orógeno Mexicano. El último evento se correlaciona con el Orógeno Chiapaneco. La deformación producida por el tectonismo y la carga de

sedimentos (presión litostática) generaron esfuerzos que propiciaron la halocinesis, deformando las calizas mesozoicas y las rocas clásticas desde el Paleoceno hasta el Mioceno temprano.

Los eventos de deformación favorecieron el desarrollo de grandes pliegues anticlinales y fallas inversas con orientación general NW-SE, que forman parte del Pilar Reforma-Akal; las fallas inversas de mayor desplazamiento conforman cabalgaduras que despegan en un *décollement* a nivel de la sal calloviana (Padilla y Sánchez, 2007), lo que origina que haya yacimientos de hidrocarburos tanto en los bloques autóctonos como alóctonos. Se destaca también el fracturamiento de las calizas mesozoicas lo que facilitó en gran medida su dolomitización, incrementando su porosidad efectiva.

Los planos de falla actuaron como rutas de escape de la sal hacia niveles estratigráficos superiores provocando en el Paleógeno el basculamiento de la cadena Chiapas-Reforma-Akal en dirección NW desarrollando depocentros que permitieron la acumulación de gruesas secuencias terrígena del orden de kilómetros que, por su propio peso, comenzaron a deslizarse en la misma dirección que los pliegues propiciando por efectos gravitatorios el desarrollo de fallas normales lístricas con orientación NE-SW.

Las fallas normales lístricas se relacionan con procesos de sedimentación acelerada y en conjunto con el último episodio extensional producto del movimiento de la sal calloviana propició el desarrollo de fallas casi perpendiculares a la orientación del sistema de pliegues de Chiapas-Reforma-Akal. Entre estas fallas normales regionales, sintéticas y antitéticas (Padilla y Sánchez, 2007) destacan las fallas de Le-Acach, Comalcalco (con caída hacia el NW), de Frontera y de Macuspana que a su vez son correlacionables a la Orogenia Chiapaneca, por lo que tienen una componente de fallas laterales transtensivas; estas fallas son los límites estructurales de las cuencas de Comalcalco y Macuspana, así como el levantamiento del Pilar de Reforma-Akal.

Los eventos tectónicos con su deformación resultante, configuraron la geología estructural de la Sonda de Campeche, la que de manera esquemática se ilustra en

la figura 10, donde las trampas petroleras estructurales y combinadas han permitido almacenar volúmenes considerables de hidrocarburos, como es el caso del Complejo Cantarell donde el aceite se almacena en un anticlinal afallado con orientación NE-SE limitado al N-NE por una falla inversa (Figura 10) o como la trampa estructural donde se perforó el pozo Kinbe-1, ubicado en la porción suroeste del Pilar de Reforma-Akal, que corresponde a un anticlinal alargado con cierre en tres direcciones (PEMEX, 2012) cortado en su flanco oeste con un cuerpo salino intrusivo.

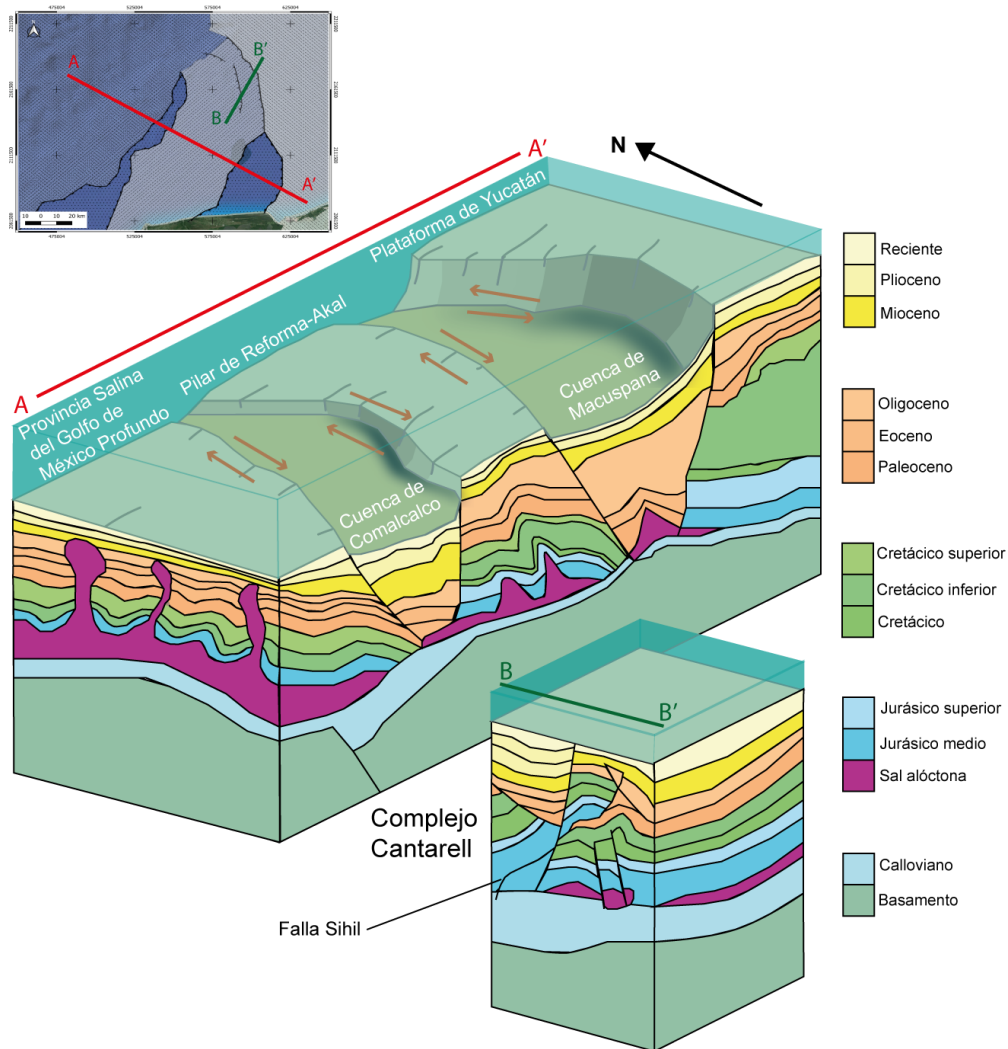


Figura 10. Sección estructural del complejo sistema de pliegues y fallas que configuran a las provincias morfoestructurales de la Sonda de Campeche. Se añade una sección del Complejo Cantarell donde se observa el pliegue afallado donde se almacena grandes cantidades de hidrocarburos. Modificado de CNH (s. f.).

Ángeles (2004) propone seis provincias morfoestructurales reconocibles que configuran a la Sonda de Campeche ilustradas en la figura 11, aunque en este trabajo se considera el talud y la Plataforma de Yucatán como una sola. Sus principales características son:

a) Provincia Salina del Golfo de México Profundo. Se localiza en la parte occidental de la Sonda de Campeche, limita al este con el Pilar de Reforma-Akal y al oeste con el Istmo de Tehuantepec. Se integra de domos, diapiros y canopies que debido al movimiento de la sal deformaron a las unidades estratigráficas clásicas del Mioceno.

b) Cuenca de Comalcalco. Corresponde solo a la prolongación subacuática de la Cuenca de Comalcalco, es un graben angosto y alargado de dirección general NE-SW. Esta cuenca está delimitada por fallas normales lítricas con una componente lateral (transtensión) que convergen en la zona de los domos y diapiros salinos. El relleno es de terrígenos cenozoicos, principalmente areniscas y lutitas.

c) Pilar de Reforma-Akal. Constituye la porción central de la Sonda de Campeche y es la principal provincia productora de hidrocarburos de México. Esta región se extiende desde el sur, en el Cinturón Plegado de la Sierra de Chiapas, hasta la Plataforma de Yucatán en el norte. En su sección occidental, limita con el sistema de fallas Comalcalco, y al este, con el sistema de fallas Frontera, el alineamiento de diapiros arcillosos Amate-Barrancas y la falla Topén-Níspero (Bernal *et al.*, 2010). La zona presenta amalgamamiento de estilos estructurales como resultado de los tres eventos tectónicos de deformación que propuso Ángeles (1994), por lo que se tienen pliegues y fallas inversas, fallas normales, domos y diapiros, además de fallas laterales.

En su sector oriental, se evidencia el resultado de un evento de deformación extensional, caracterizado por bloques fallados-rotados, y *salt rollers* (Bernal *et al.*, 2010). Respecto al evento de deformación producto de esfuerzos compresionales, se tiene como ejemplo al Alto de Jalpa donde se tienen pliegues y una cabalgadura. Los pliegues tienen orientación general NW-SE con vergencia al NE, con despegue favorecido por las rocas evaporíticas del Calloviano.

d) Cuenca de Macuspana. Específicamente la porción marina de la Cuenca de Macuspana y se integra principalmente por intrusiones salinas y rellenos terrígenos del Cenozoico. Está limitada por las fallas de Macuspana y de Frontera en el oeste y este, respectivamente. Estas fallas fueron sincrónicas al depósito terrígeno del Mioceno superior permitiendo así una gran acumulación de sedimentos, las que presentan una componente lateral con transtensión.

e) Plataforma-talud de Yucatán. Se ubica al oriente de la Sonda de Campeche, corresponde a la plataforma actual y a la planicie costera del Golfo de México. Limita al sur con la depresión del Caribe, al norte con el Golfo de México y al oeste con el Pilar de Reforma-Akal y la cuenca de Macuspana. Se constituye principalmente por calizas de plataforma que yacen sobre depósitos terrígenos del Jurásico. Se desarrolló durante el Cretácico y el Paleógeno, sin deformación significativa porque durante los eventos tectónicos se comportó como un bloque rígido que resistió los esfuerzos aplicados. Sin embargo, en el límite Cretácico-Paleógeno, ocurrió el impacto de un cuerpo extraterrestre (Meteorito de Chicxulub), que formó un cráter de más de 100 [km] de diámetro causando un gran cambio en la biota (extinción masiva) y en los procesos de sedimentación, resultando el depósito en el talud y cuenca de un gran volumen de brecha calcárea, la que presenta diferentes facies (proximales, medias y distales). Evidentemente, la plataforma-talud durante el Paleógeno, tuvo mejores niveles de preservación, por lo que las secuencias estratigráficas durante este tiempo se conformaron de facies de laguna interna, desarrollos arrecifales en sus bordes y algunos arrecifes aislados dentro de la plataforma; además de las facies de talud constituidas por brechas calcáreas producto de flujos de escombros desde el borde de plataforma hasta la zona de aguas profundas; siendo muy similar a la morfología actual.

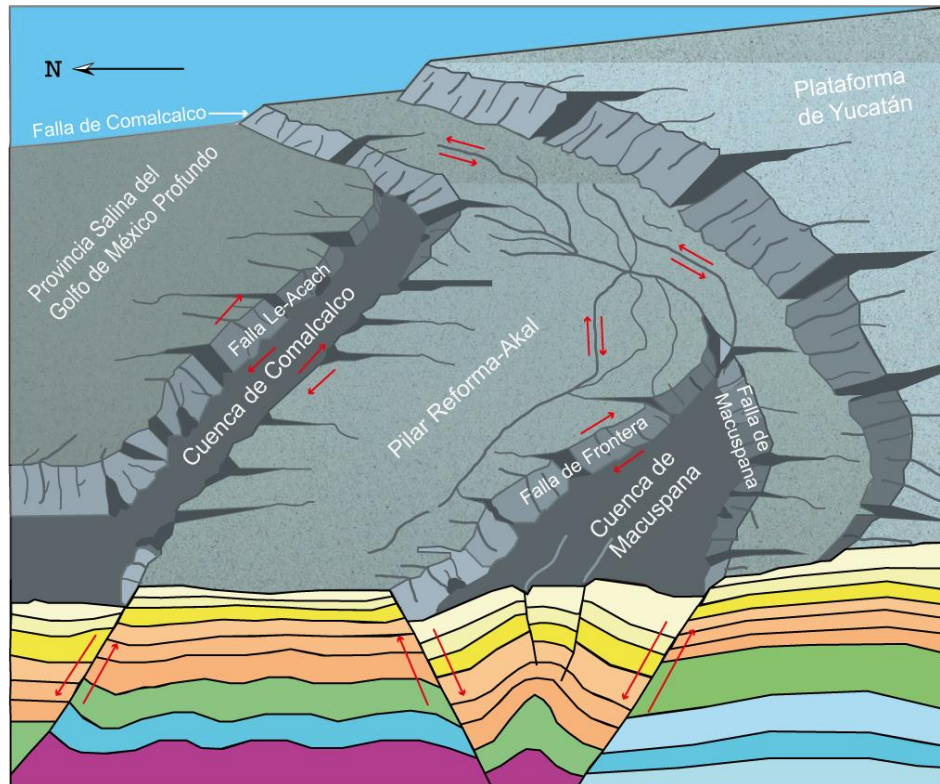


Figura 11. Provincias morfoestructurales en las que se divide la Sonda de Campeche. Se observan los sistemas de fallas normales y laterales que las dividen. Modificado de Ángeles (2004).

4.5. Contenido paleontológico

En la Sonda de Campeche se tiene registro de una gran cantidad de macrofósiles y microfósiles como los foraminíferos, moluscos y amonitas que datan a partir del Jurásico hasta el Plioceno (Tabla 1). El estudio paleontológico ha sido principalmente a través de muestras de núcleos o esquirlas obtenidas por la perforación de pozos petroleros.

Tabla 1. Distribución cronoestratigráfica de los fósiles presentes en la Sonda de Campeche.

Sistema	Serie	Piso	Formación	Contenido fósil
Neógeno	Plioceno		Cedral	Sin contenido fósil destacable.
			Agueguexquite	Gasterópodos y foraminíferos: <i>Planilina depressa</i> , <i>Cassidulina subglobosa</i> , <i>Globigerina bulloides</i> y <i>Ceratolithus cristatus</i> .
			Paraje solo	Gasterópodos y foraminíferos: <i>Amonia beccarii</i> .
	Mioceno	Superior	Concepción	Moluscos y foraminíferos: <i>Globorotalia acostaensis</i> y <i>Sphaeroidellopsis subdehiscens</i> .
		Medio	Encanto	Foraminíferos planctónicos: <i>Globorotalia siakensis</i> y <i>Globorotalia fohsrobusta</i> .
		Inferior	Depósito	Foraminíferos bentónicos: <i>Gyroidinoides broeckiana</i> y <i>Heterolepa granosa</i> y foraminíferos planctónicos: <i>Catapsydrax stainforthi</i> y <i>Catapsydrax dissimilis</i> .
Paleógeno	Oligoceno		La Laja	Foraminíferos bentónicos: <i>Cyclogyra</i> , <i>archimides</i> , <i>Cibicides</i> , <i>Valvulina pennatula</i> y <i>Textularia nipeensis</i> y foraminíferos planctónicos: <i>Cassigerinella chipolensis</i> , <i>Globigerina ciperoensis</i> y <i>Pseudohastigerina micra</i> .
	Eoceno			Sin contenido fósil destacable.
	Paleoceno			Sin contenido fósil destacable.
Brecha K-Pg				Moluscos, gasterópodos, rudistas, miliólidos, alveolínidos, foraminíferos bentónicos (<i>Chubbina sp.</i>) y orbitolínidos: <i>Dictyoconus walnutensis</i> y <i>Paracoskinolina sunnilandensis</i> .
Cretácico				Sin contenido fósil destacable.
Jurásico	Superior	Titoniano	Edzná	Radiolarios, saccocomas: Eotriz alpina, Lombardia arachnoidea y Lombardia angulosa; calpionélidos: <i>Calpionella alpina</i> y <i>Crasicollaria massutiniana</i> .
		Kimmeridgiano	Akimpech	Foraminíferos: <i>Rhaxella sorbyana</i> y <i>Nautiloculina oolítica</i> ; algas dacicladáceas (<i>Acicularia</i>) y amonitas: <i>Idoceras</i> , <i>Salinites</i> , <i>Haploceras</i> , <i>Aspidoceras</i> , <i>Nebroditis</i> y <i>Taramelliceras</i> .
		Oxfordiano	Ek-Balam	Foraminíferos (<i>Caucasella oxfordiana</i>) y amonitas: <i>Ochetoceras</i> y <i>Glochiceras</i> .

4.5.1. Fósiles del Jurásico superior

El registro fósil del Jurásico superior consiste en foraminíferos y amonitas principalmente debido al carácter transgresivo marino al que estuvo regido la Sonda

de Campeche durante la apertura de Pangea a partir de la transgresión que inició en el Calloviano con depósitos transicionales y después marinos de diferente batimetría.

Para el Oxfordiano, Ángeles (1996) propone la biozona del foraminífero *Caucasella oxfordiana*, hallado en el núcleo 16 del pozo Chac-1, como el fósil que mejor lo caracteriza ya que, al tratarse de un organismo planctónico pelágico permite ubicar su ambiente de depósito en la nascente cuenca oceánica. De la misma forma, Cantú (2009) realizó un estudio bioestratigráfico con amonitas, donde describió taxonómicamente algunos miembros de la familia *Haploceratoidea* distinguible por su concha involuta, donde se desprenden los géneros *Ochetoceras* y *Glochiceras*, ambos útiles para obtener la edad relativa de la Formación Ek-Balam.

Para el Kimmeridgiano, Ángeles (2003) señala la presencia de foraminíferos como *Rhaxella sorbyana* y *Nautiloculina oolitica*, además de algas daci cladáceas del género *Acicularia*. En cuanto a amonitas se tiene registro de los géneros *Idoceras*, *Salinites*, *Haploceras*, *Aspidoceras*, *Nebrodités* y *Taramelliceras*, siendo estos dos últimos muy útiles en la obtención de la edad relativa de la Formación Akimpech.

El registro paleontológico del Tithoniano se compone por los fósiles hallados en la Formación Edzná. Ángeles (1996) describe la presencia de saccocomas de las especies *Eotriz alpina*, *Lombardia arachnoidea*, *Lombardia angulosa* y por radiolarios calcificados y piritizados; además de calpionélidos de las especies *Calpionella alpina* y *Crasicollaria massutiniana*; además de radiolarios calcificados. Estos fósiles se desarrollaron en ambiente anóxico donde se acumularon en grandes cantidades con depósitos de arcillas permitiendo su preservación y constituyendo una excelente secuencia generadora de hidrocarburos, la que disminuye su potencial hacia la parte superior, donde ocurrió un cambio de ambiente a uno principalmente carbonatado con mayor oxigenación y profundidad.

4.5.2. Fósiles del Cretácico

El registro paleontológico del Cretácico es limitado, ya que no se ha realizado un análisis detallado de núcleos y esquirlas obtenidos de los pozos petroleros

perforados en la zona. No obstante, en los abundantes clastos la brecha K-Pg se tienen vestigios de fósiles alóctonos que fueron acarreados desde la plataforma a la cuenca a través de abanicos submarinos calcáreos. Grajales *et al.* (2003) hicieron una descripción de los ambientes de depósito de los clastos con base en el registro fósil de las rocas del Complejo Cantarell, donde indican la presencia de calizas *wackestone* con miliólidos relativos a un ambiente de plataforma interna restringida además de calizas *wackestone* con alveolínidos y foraminíferos bentónicos determinados como *Chubbina sp.*, que indican un ambiente de depósito lagunar restringido de baja energía; describieron los fragmentos de calizas *packstone* con orbitolínidos como *Dictyoconus walnutensis* y *Paracoskinolina sunnilandensis* y abundantes fragmentos esqueléticos de moluscos, gasterópodos y rudistas.

4.5.3. Fósiles del Cenozoico

De los pozos petroleros han perforado se han obtenido principalmente fósiles de foraminíferos. Reyna (2007) señala que, en un pozo ubicado en la región noroeste de la Sonda de Campeche, se ha registrado un total de 19 géneros, 126 especies y 32 subespecies de foraminíferos planctónicos, así como 77 géneros con 96 especies de foraminíferos bentónicos.

En la Formación La Laja del Oligoceno, se tiene reporte de la presencia de los foraminíferos bentónicos *Cyclogyra*, *archimides*, *Cibicides*, *Valvulina pennatula* y *Textularia nipeensis*; además de los foraminíferos planctónicos *Cassigerinella chipolensis*, *Globigerina ciperoensis* y *Pseudohastigerina micra* (Aguilera *et al.*, 2003). La presencia de los foraminíferos planctónicos indica un ambiente de mar abierto; sin embargo, el depósito terrígeno ocurrió en la zona de talud dado el registro de los organismos bentónicos.

En el Mioceno inferior, en la Formación Depósito, Aguilera *et al.* (2003) reportaron la presencia de los foraminíferos bentónicos *Gyroidinoides broeckiana* y *Heterolepa granosa* y de los foraminíferos planctónicos *Catapsydrax stainforthi* y *Catapsydrax dissimilis*, en lutitas, por lo que infieren un ambiente de depósito en la zona marina mesobatial (Miranda, 1982).

En el Mioceno medio, Águilera *et al.* (2003) estableció la acumulación de la secuencia terrígena de la Formación Encanto, cuya edad se determinó por la presencia de los foraminíferos planctónicos *Globorotalia siakensis* y *Globorotalia fohsirobusta*. A su vez, Aguilera *et al.* (2003) dedujo a través del contenido fósil, que el depósito ocurrió en un medio infralitoral de pendiente suave en la región occidental y de un ambiente más profundo (zona epibatial) en la región oriental.

En el Mioceno superior, se tiene registro paleontológico en las formaciones Concepción Inferior, Concepción Superior y la Formación Filísola (sin contenido fósil destacable). Aguilera *et al.* (2003) indican un registro paleontológico muy rico en las formaciones Concepción de restos de moluscos y de foraminíferos como *Globorotalia acostaensis* y *Sphaeroididellopsis subdehiscens*, con los que se obtuvieron sus edades relativas. Así mismo, Aguilera *et al.* (2003) infieren que la relación entre las especies de foraminíferos bentónicos y planctónicos define un ambiente epibatial-circalitoral para el depósito estratigráfico donde predominan las lutitas.

Del Plioceno, se tiene a la Formación Paraje Solo, donde se ha reportado la presencia de restos de moluscos y de foraminíferos neríticos como *Amonia beccarii* en terrígenos de un medio ambiente transicional (Aguilera *et al.*, 2003). En la Formación Agueguexquite se tiene abundantes gasterópodos y foraminíferos determinados como *Planilina depressa*, *Cassidulina subglobosa* y *Globigerina bulloides* (Castillo, 1955). En la Formación Cedral, no se tiene reporte de registro fosilífero importante.

4.6. Evolución geológica

La historia geológica de la Sonda de Campeche está estrechamente ligada a la evolución tectónica del Golfo de México, por lo que se debe de estudiar en conjunto como parte de las Cuencas del Sureste. Davison *et al.* (2020) mencionan que su desarrollo comenzó con el *rifting* de la corteza continental de la actual Norteamérica y Sudamérica incluyendo la rotación y movimiento del Bloque de Yucatán durante la ruptura de Pangea en el Triásico medio.

Los trabajos de Pindell (1985), Pindell y Kennan (2009) y Padilla y Sánchez (2007) se tomaron como base para explicar la evolución del Golfo de México debido a su importancia y precisión geológica. Davison *et al.* (2020) dividen la evolución tectónica del Golfo de México en una serie de eventos en relación con el tiempo en el cual se desarrollaron y sus aspectos tectónicos y sedimentarios más destacables. En este trabajo se consideran siete eventos que explican la evolución geológica de la Sonda de Campeche, los que se describen a continuación.

4.6.1. La apertura inicial del Golfo de México del Triásico tardío al Jurásico medio

Al inicio del proceso de *rifting* se formaron un conjunto de grabenes donde se depositaron gruesas secuencias de lechos rojos con orientación casi paralela a la actual línea de costa veracruzana (Padilla y Sánchez, 2007). El *rifting* también generó una enorme fisura en medio del paleo-Golfo de México, donde se desarrolló corteza oceánica con subsidencia continua, lo que permitió en el Calloviano una lenta invasión marina desde el Pacífico cambiando por completo el depósito sedimentario de la región, mezclando la sedimentación continental con la emergente sedimentación marina.

Davison *et al.* (2020) mencionan que el periodo de *rift* inicial duró alrededor de 70 [Ma], primero fue un *rift* continental que formó una cuenca continental donde se depositaron terrígenos que evolucionó debido a subsidencia continua, lo que permitió una transgresión generalizada. El proceso de *rift* formó una cresta de generación de corteza oceánica en el Jurásico temprano y medio, que se encuentra actualmente en la sección central del Golfo de México (Padilla y Sánchez, 2007). La rotación y desplazamiento del Bloque de Yucatán estuvo íntimamente ligada a la generación de corteza oceánica (Figura 12), lo que permitió que el Bloque de Yucatán y su entorno (Sonda de Campeche) se desplazara hasta alcanzar su posición actual. Marton y Buffler (2016) mencionan que tal rotación ocurrió durante el Calloviano al Berriasiano donde se separó de Norteamérica hacia el sur con un desplazamiento de 42° (o 39° según Padilla y Sánchez, 2020) en sentido antihorario.

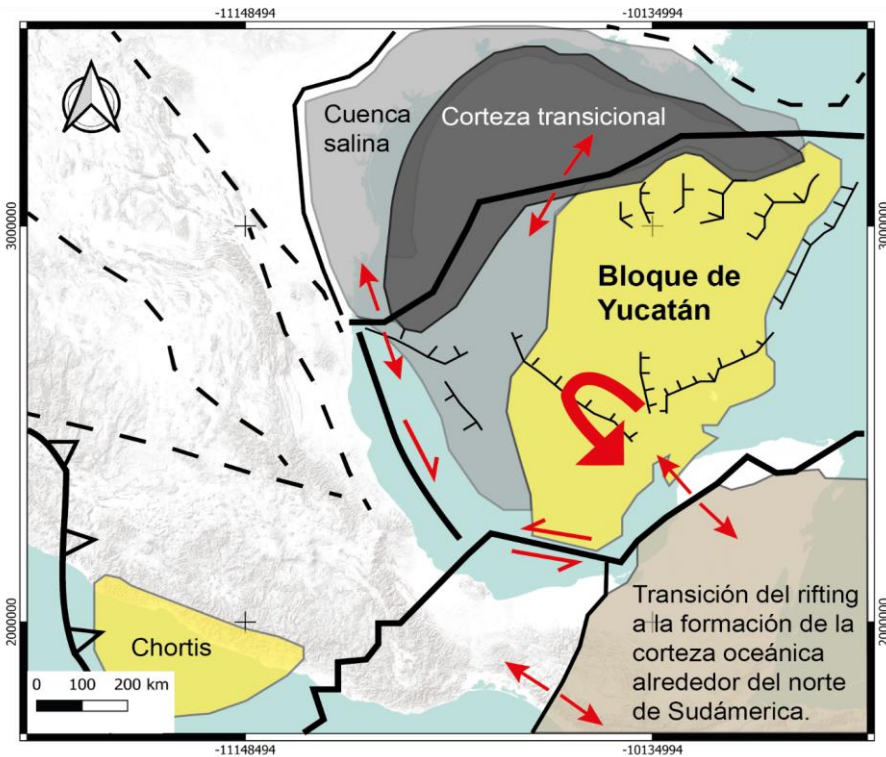


Figura 12. Mapa paleogeográfico de hace 165 [Ma] donde se muestra la posición de corteza oceánica en la porción central y hacia los lados los depósitos salinos, tanto al norte como al sur de la cuenca. Se observa además el movimiento y rotación del Bloque de Yucatán. Modificado de Pindell y Kennan (2009).

Pindell (1985) menciona que la distancia aproximada que se movió el Bloque de Yucatán fue de 470 a 520 [km] con una propagación de 0.5 [cm/año]; tal propagación ocurrida en un periodo relativamente corto, lo que hacer suponer que el proceso de *rifting* en el Golfo de México fue mucho más rápido en comparación con su lenta subsidencia generando así, un relieve muy suave con poca deformación en toda su extensión (Padilla y Sánchez, 2007).

4.6.2. El depósito salino del Calloviano

Con la apertura progresiva del Golfo de México y el predominante clima árido global, el agua salina que ingresaba en la naciente cuenca somera subsidente se evaporaba constantemente, dado que el ambiente era tipo *sabkha*, favoreciendo el depósito continuo de evaporitas durante todo el Calloviano. Las capas evaporíticas se formaron de manera relativamente rápida en un periodo de 5 millones de años,

en una antigua cuenca de miles de kilómetros cuadrados, actualmente dividida en dos partes (Padilla y Sánchez, 2007).

En la figura 12 se observa tal división con ausencia de cuerpos salinos en su sección central debido a la generación de corteza oceánica que se propagaba en dirección N-S impidiendo su depósito. En la Sonda de Campeche las capas de evaporitas representan un elemento estructural importante dado que la tectónica salina a la cuál fue sometida posteriormente, principalmente en el Cenozoico, generó trampas petroleras importantes y rutas de escape para los hidrocarburos almacenados.

4.6.3. Depósito sedimentario post-salino del Jurásico al Cretácico tardío

En el Oxfordiano la actividad tectónica asociada al *rift* disminuyó significativamente, propiciando el depósito de secuencias calcáreo-arcillosas relativas al grupo Ek-Balam en las zonas de transición y en las plataformas que bordeaban a la cuenca recién formada, acumulándose en varios kilómetros de espesor de secuencias arcillosas y calcáreo-arcillosas que en el Cretácico cambiaron a carbonatos. La presencia de estructuras primarias como dunas desérticas y *wadís* parecen indicar que el Golfo de México no se encontraba conectado completamente al sistema oceánico global hasta el final del Oxfordiano (Davison *et al.*, 2020).

En el Kimmeridgiano las transgresiones marinas alcanzaron completamente todos los bordes del joven Golfo de México desarrollando grandes barreras de ooides que restringieron el flujo de agua marina dentro del continente propiciando exhaustivamente la generación de nuevas capas de sal de forma local (Padilla y Sánchez, 2007). Actualmente, las facies de ooides desarrolladas en los altos estructurales cubiertos de aguas someras, son importantes rocas almacenadoras de hidrocarburos debido a su excelente permeabilidad.

Davison *et al.* (2020) explican que durante todo el Jurásico tardío y hasta el Cretácico inferior, el Golfo de México presentó subsidencia debido al enfriamiento termal y el peso de la columna estratigráfica depositada, al mismo tiempo que el movimiento rotacional del Bloque de Yucatán cesaba. Tal columna alcanzó espesores entre 1 y 3 [km] entre los 165 [Ma] y los 65 [Ma] según Galloway (2008).

Pindell y Kennan (2009) mencionan que el Bloque de Yucatán cesó su migración tras los últimos pulsos de generación de corteza oceánica hace 135 [Ma] durante el Valanginiano, alcanzando su posición actual (Figura 13). Davison *et al.*,(2020) menciona que la superficie total desarrollada de corteza oceánica alcanzó aproximadamente 700-800 [km] de longitud la que posteriormente se incrementó (Davison *et al.*, 2020).

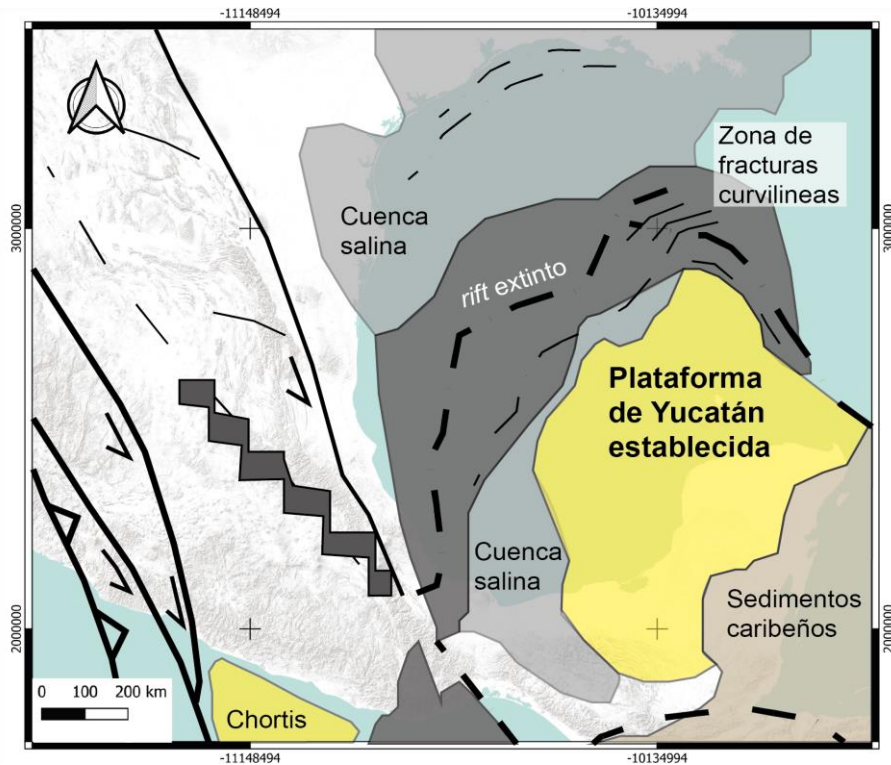


Figura 13. Paleomapa de hace 130 [Ma] donde se observa la posición actual del Bloque de Yucatán. Para este tiempo la generación de corteza oceánica ya había cesado. Modificado de Pindell y Kennan (2009).

4.6.4. Impacto del Meteorito de Chicxulub

El impacto del Meteorito de Chicxulub en el límite Cretácico-Paleógeno, marcó un importante cambio global tanto climático, como geológico y biológico, ya que se calcula se extinguió a más del 60% de seres vivos mesozoicos (Schulte *et al.*, 2010). Su impacto ocurrió en parte de la Paleoplataforma de Yucatán hace 66 [Ma] y de acuerdo con Davison *et al.* (2020) su tamaño estimado fue de 10-15 [km] creando un cráter de 110 [km] de diámetro. La energía liberada equivalente fue de 10 u 11

terremotos (Davison *et al.*, 2020), cambiando de fase a las rocas carbonatadas afectadas, generando millones de toneladas de material eyectado y gases hacia la atmósfera tapando la luz solar durante bastante tiempo, además de provocar grandes incendios forestales, tsunamis y terremotos excepcionales; se puede interpretar que ocurrió un cambio climático global.

El impacto también fracturó y desintegró a las calizas de la plataforma, generando grandes depósitos de brechas de impacto que se desplazaron hacia el talud y la cuenca. En el Complejo Cantarell, la secuencia de brechas se encuentra cubierta por una capa de lutita del Paleoceno que funciona como roca sello. La brecha en las zonas proximales llega a alcanzar hasta 2.2 [km] de espesor (Shann, 2020). Es importante considerar que la mayor parte de las brechas del Complejo Cantarell se formaron por este evento y otros por procesos gravitacionales propios de los bordes de plataforma; además la excelente porosidad también se debe a procesos de karsticidad y dolomitización, por lo que se tienen rocas de doble o triple porosidad. Esta secuencia tiene actualmente una gran importancia económica para el país, por ser la roca almacén de los grandes campos petroleros del área marina del Sureste de México (Padilla y Sánchez, 2007).

4.6.5. El Orógeno Mexicano y el depósito clástico del Paleógeno

Al mismo tiempo que continuaba el depósito carbonatado en parte de las Cuencas del Sureste, el Orógeno Mexicano comenzaba sus primeros pulsos (Padilla y Sánchez, 2007), es decir, comenzó el levantamiento de la Sierra Madre Oriental (SMOr) cambiando el depósito de carbonatos a uno principalmente clástico al erosionarse constantemente las zonas levantadas y transportarse por los ríos hasta la costa y a las cuencas paleógenas que iniciaban su desarrollo.

Según Davison *et al.* (2020) el proceso de subducción de la Paleoplaca Farallón debajo de la Placa Norteamericana empezó hace 100 [Ma]. En las cuencas del Sureste Mexicano y debido a las cargas de sedimentos, inicia el movimiento de la sal que se desarrollaron durante el Eoceno, probablemente como resultado combinado de presión de sobrecarga y de la compresión generada por el mencionado evento (Davison *et al.*, 2020).

4.6.7. Orogenia Chiapaneca del Mioceno

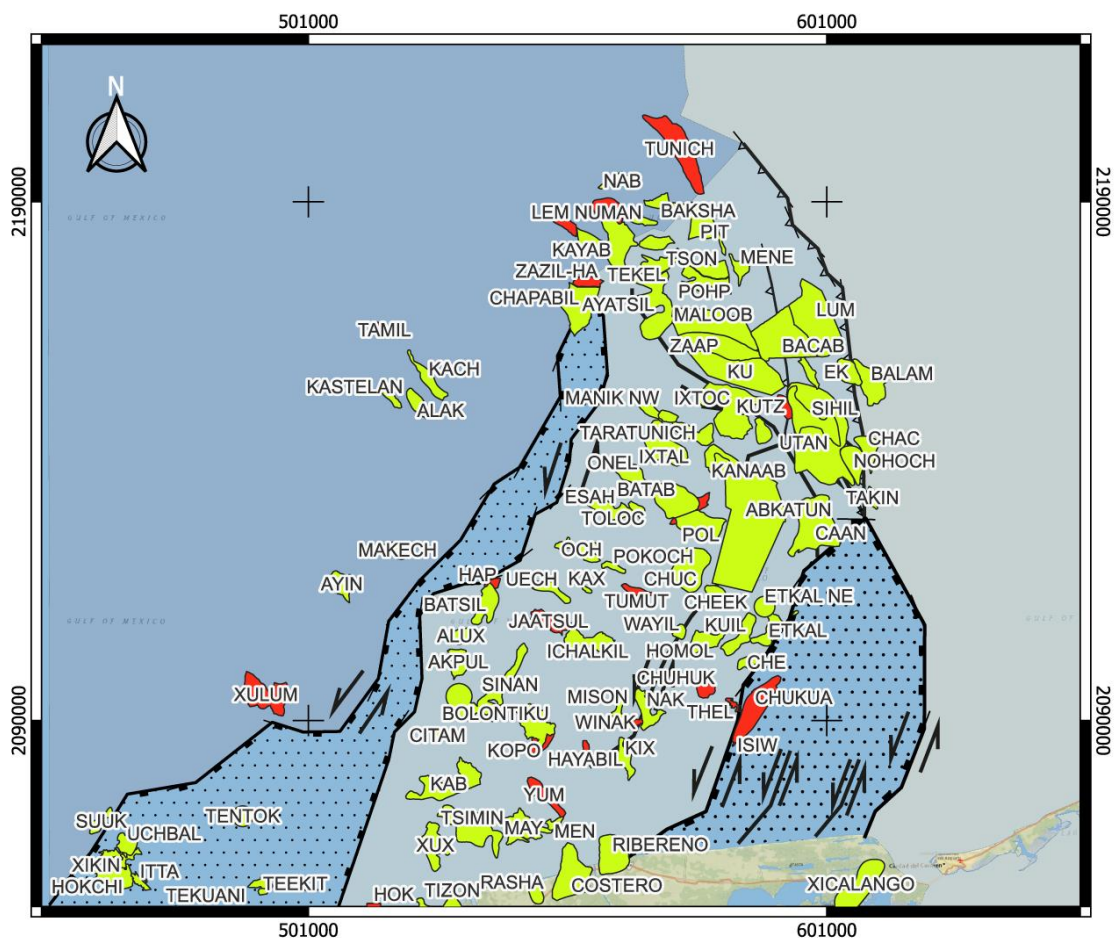
La Orogenia Chiapaneca inició en el Paleoceno, continuó con un mayor desarrollo en el Oligoceno y culminó en el Plioceno, con su máximo paroxismo durante el Mioceno (Davison *et al*, 2020). Se originó debido al movimiento lateral del Bloque de Chortis y de la subducción de la Placa de Cocos contra la terminación meridional de la Placa Norteamericana (CNH, s. f.), que contribuyó a la configuración estructural de la Sonda de Campeche y la Sierra de Chiapas. Este evento es el responsable del levantamiento del Pilar Reforma-Akal sobre las cuencas de Comalcalco y Macuspana en un despegue a nivel de la sal calloviana, al formar fallas normales y fallas laterales de flor negativa en una fase de transpresión. Padilla y Sánchez (2007) menciona el desarrollo de pliegues orientados NW-SW con vergencia hacia el noreste movilizando grandes cantidades de la sal hacia el N-NW generando además grandes depocentros donde varios kilómetros de sedimentos clásticos que se depositaron hasta finales del Neógeno en minicuencas.

El peso de los sedimentos contribuyó al desarrollo de fallas normales lístricas orientadas NE-SW, que junto con las fallas laterales configuraron los límites estructurales de las cuencas de Comalcalco y Macuspana. Padilla y Sánchez (2007) menciona que, durante el Pleistoceno, las cuencas de Comalcalco y Macuspana fueron sometidas a un régimen tectónico extensional desarrollando pliegues de inversión tectónica, donde los más evidentes se encuentran en la cuenca de Macuspana.

Davison *et al.* (2020) mencionan que el sistema de fallas inversas originadas por el movimiento del Bloque de Yucatán y por el desarrollo del Orógeno Mexicano del Cretácico, se reactivaron en fallas lístricas en el Mioceno medio. Tal reactivación es correlacionable con el final de la Orogenia Chiapaneca afectando el Bloque de Chortis y el Bloque de Oaxaca.

La tectónica regional actual está definida por las placas tectónicas Norteamericana, del Caribe y de Cocos; aunque la Sonda de Campeche está comprendida solamente sobre la Placa Norteamericana (Ángeles, 1996).

La extensa historia geológica en la cual estuvo involucrada la Sonda de Campeche ha dado lugar a un complejo sistema estructural y a una gruesa columna estratigráfica con importantes cambios de facies. En la actualidad, se exploran y explotan grandes yacimientos de hidrocarburos. Los conjuntos de fallas normales, inversas y laterales, junto con los pliegues, han generado trampas estructurales de variadas dimensiones y la columna estratigráfica permitió las condiciones termodinámicas adecuadas (presión, volumen y temperatura) para la generación de hidrocarburos, teniendo el sistema petrolero completo. En la figura 14 se observa la ubicación de los campos petroleros más destacados de la Sonda de Campeche como Balam, Ayatsil, Xanab o el Complejo Ku-Maloob-Zaap, entre otros.



Simbología

- Campos (Reservas 01-01-2024)
- Áreas con recursos

- Fallas
- Inversa
- Normal

1:1,000,000



Figura 14. Principales campos petroleros de la Sonda de Campeche. Modificado de la CNH (2024).

4.7. Tipo de cuenca

La Sonda de Campeche se conforma por seis provincias morfoestructurales principales según Ángeles (2004): a) Provincia Salina del Golfo de México Profundo, b) Cuenca de Comalcalco, c) Pilar Reforma-Akal, d) Cuenca de Macuspana, e) Talud y f) Plataforma de Yucatán. Estos elementos tienen un origen tectono-sedimentario en común, sin embargo, corresponden a elementos estructuralmente diferentes. La Sonda de Campeche no integra una cuenca *sensu stricto* de la definición porque no es propiamente una depresión donde los sedimentos tienden a acumularse, además no está delimitada por discordancias estratigráficas, sino que forma parte de la cuenca *rift* desarrollada durante el Triásico y Jurásico.

Por ejemplo, la Provincia Salina del Golfo de México Profundo es conformada por un complejo de domos y diapiros salinos, mientras que la Cuenca de Comalcalco, el Pilar Reforma-Akal y la Cuenca de Macuspana configuran un sistema de *Horst* y *Graben* con fallas laterales (el Pilar Reforma-Akal corresponde al *Horst*); producto de la deformación ocurrida durante el Cenozoico; con respecto al Talud y Plataforma de Yucatán, como sus nombres lo dicen, son partes esenciales de la gran cuenca del Golfo de México durante el Cretácico y el Paleógeno, donde la plataforma es carbonatada y el talud se conforma principalmente de brechas. De esta forma, los límites geográficos de la Sonda de Campeche no están dados por aspectos de carácter geológico, sino por su interés económico dado que, corresponde a la provincia petrolera de mayor producción de hidrocarburos del país, donde se encuentran campos petroleros importantes como el Complejo Cantarell y los campos Maloob, Zaap, Xanab, Ayatsil y Balam.

4.8. Propuesta de modelo de cuenca

El depósito sedimentario en la Sonda de Campeche ha sido continuo desde la formación de un *rift* continental en el Triásico (Figura 15) hasta el desarrollo del *rift* con corteza oceánica en el Jurásico medio, no obstante, los elementos

geomorfológicos que la constituyen actualmente se desarrollaron por varios eventos de deformación, particularmente el Orógeno Mexicano y la Orogenia Chiapaneca.

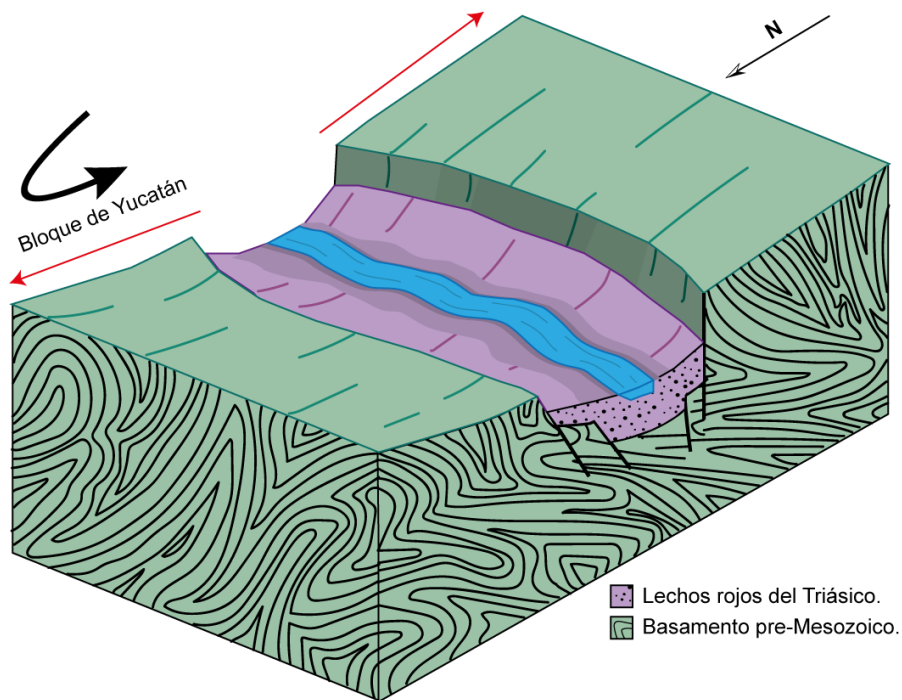


Figura 15. Modelo del *rift* continental con generación de lechos rojos del Triásico, antes de la invasión marina.

Las rocas más antiguas son constituidas por el basamento pre-Mesozoico metamórfico y metasedimentario, después del *rifting* del Golfo de México se depositaron capas de lechos rojos que continuaron hasta el Calloviano, donde además se desarrollaron capas de evaporitas por los ambientes de sabkha predominantes (Figura 16). La corteza oceánica restringió el desarrollo sedimentario a los márgenes de la cuenca, como en el Bloque de Yucatán que aún continuaba desplazándose.

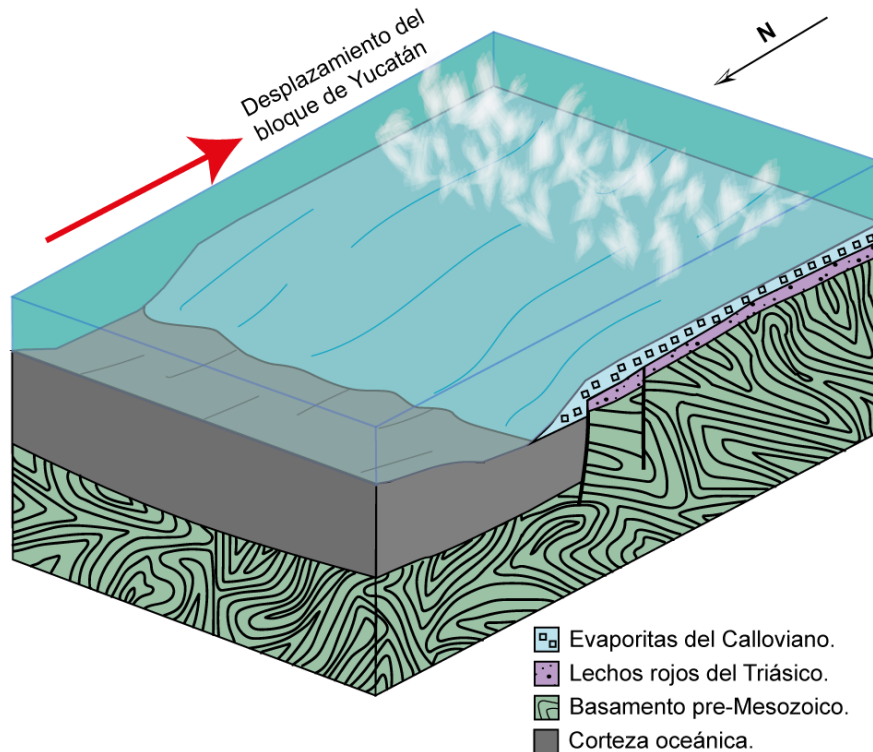


Figura 16. Modelo de la cuenca hasta el Calloviano donde se desarrollaron las capas de sal que actualmente son un elemento tectónico importante. La generación de corteza oceánica y el desplazamiento del Bloque de Yucatán fueron elementos importantes en el depósito estratigráfico.

Posteriormente se depositaron en la cuenca estratos sucesivos de arcillas y carbonatos al generar un espacio de acomodo adecuado como resultado del desplazamiento del Bloque de Yucatán desde el norte hasta alcanzar su posición actual en el Valanginiano. A su vez, en el Kimmeridgiano, la joven plataforma favoreció la formación de capas oolíticas altamente porosas, sobre altos de basamento cubiertas de aguas someras. Durante el Tithoniano, el clima tropical y las aguas someras propiciaron el desarrollo de un rico ecosistema que facilitó el depósito masivo de material arcilloso y calcáreo-arcilloso con abundante materia orgánica. Además, las transgresiones marinas en la plataforma permitieron el depósito continuo de material arenoso continental alrededor de la paleoisla o de la playa (Figura 17).

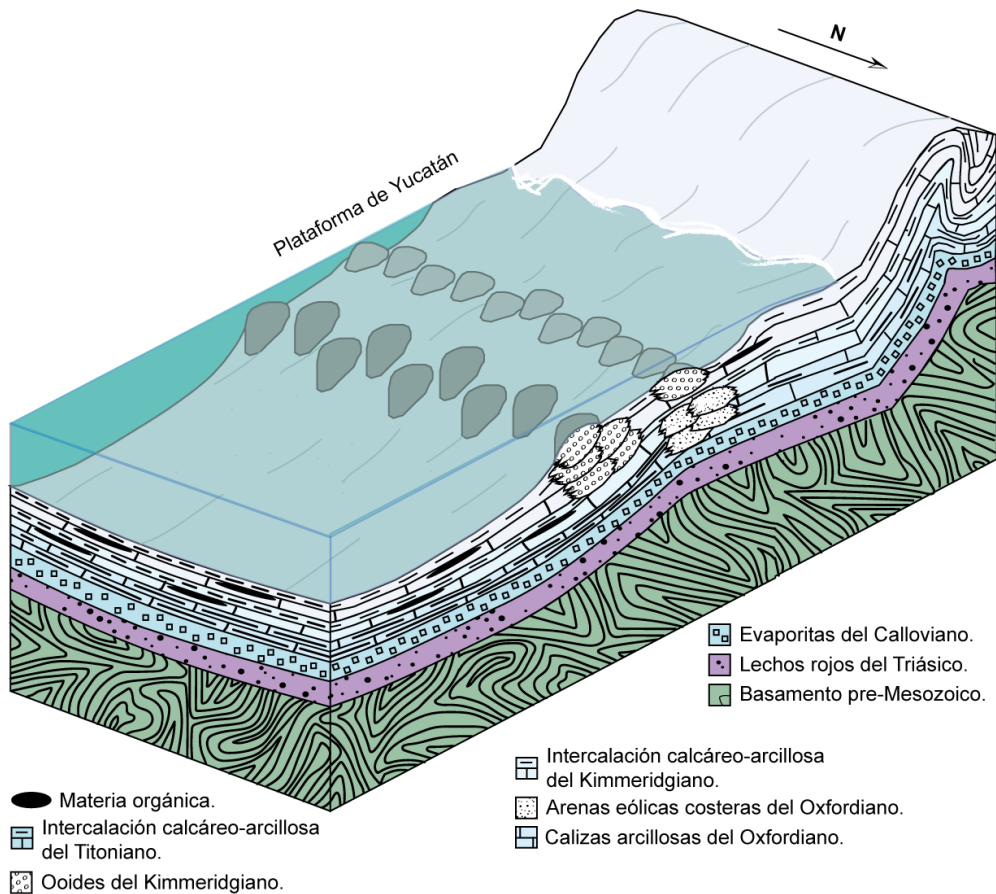


Figura 17. Modelo de la cuenca en el Kimmeridgiano-Tithoniano donde se observa el desarrollo de capas oolíticas y el depósito masivo de materia orgánica. La Plataforma de Yucatán fue el elemento que configuró la máxima expresión sedimentaria de la cuenca.

En el Cretácico, el depósito carbonatado fue completamente predominante debido a que las zonas continentales estaban alejadas y no había aporte de terrígenos, además de un clima favorable y el desarrollo de organismos con caparazón calcáreo que permitió la constante acumulación de carbonatos de diferentes facies. Se formaron gruesas secuencias de calizas *mudstone*, *wackestone* en una cuenca de margen pasivo con subsidencia tectónica como explica Padilla y Sánchez (2007).

En el límite Cretácico-Paleógeno, como resultado del impacto del meteorito de Chicxulub, las calizas de la Plataforma de Yucatán se fracturaron significativamente y las que se ubicaban en el borde de plataforma se fragmentaron y se desplazaron hacia el talud y el fondo de la cuenca debido a la enorme cantidad de energía liberada, en un proceso similar a las turbiditas, aunque de mayor velocidad y gran

volumen. Este evento configuró el último depósito de brechas, previo al depósito de clásticos que rellenaron las cuencas del sureste durante el Paleógeno y Neógeno (Figura 18).

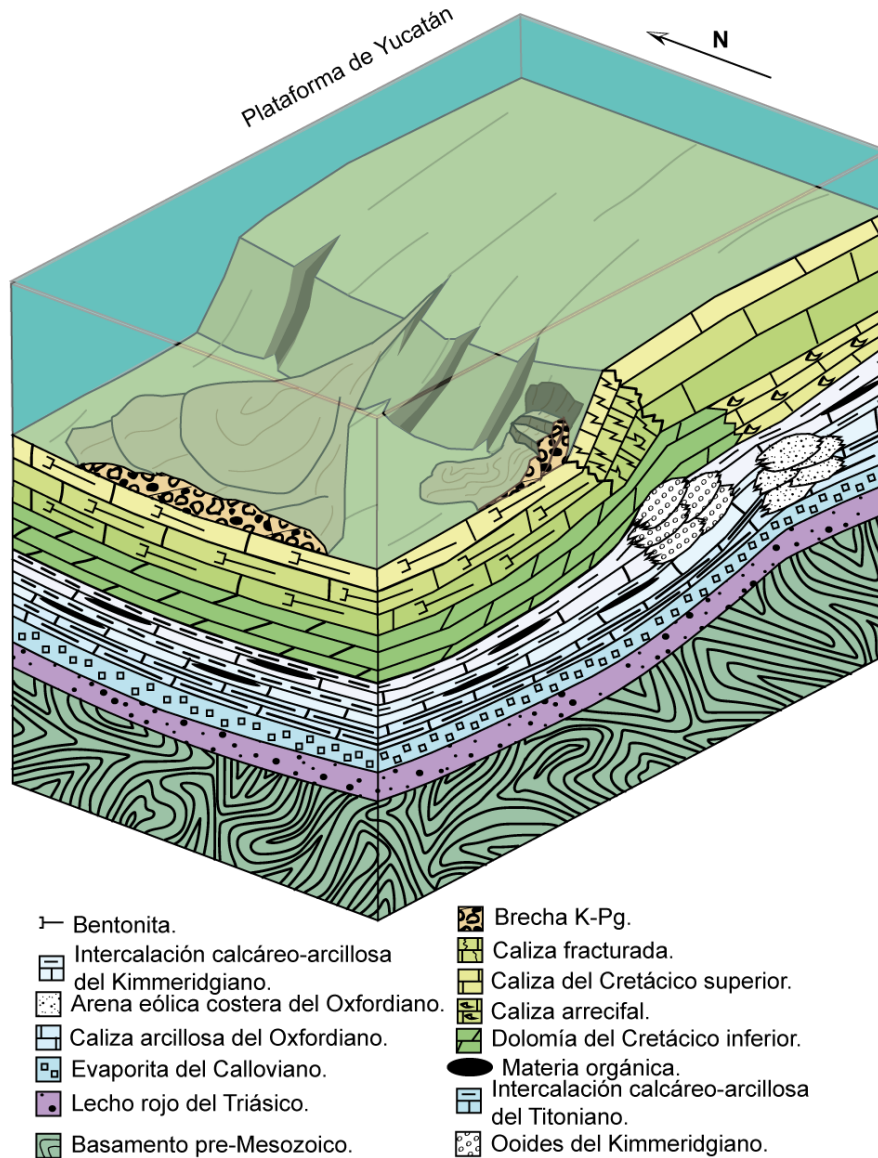


Figura 18. Modelo de la cuenca hasta el final del Cretácico. Se observan los depósitos de talud producto del impacto del meteorito de Chicxulub y de bentonita debido a las primeras erupciones volcánicas del Orógeno Mexicano.

5. Consideraciones económicas

Desde el descubrimiento del Complejo Cantarell en 1971, la Sonda de Campeche se ha convertido en una de las regiones productoras de hidrocarburos más importantes de México. Este hallazgo impulsó significativamente la prospección por parte de PEMEX que descubrió y nombró los campos Akal, Abkatun, Kutz, Nohoch, Sihil, Taratunich y el Complejo Ku-Maloob-Zaap. En conjunto, estos campos representaron el 55% de todo el petróleo producido históricamente en México hasta 2006, según Chernikoff et al. (2006). Desde entonces, se han construido aproximadamente 350 plataformas petroleras (Réyez, 2023), con un éxito geológico relevante, pues la producción de hidrocarburos en la región no ha cesado.

Aunque la mayor parte del petróleo extraído de las brechas calcáreas del límite Cretácico-Paleógeno corresponde a crudo pesado, en la Formación Edzná del Tithoniano se produce petróleo ligero de calidad excepcional. Ángeles (1996) menciona que las secuencias del Oxfordiano tienen un alto valor económico debido a sus excelentes propiedades como roca almacén, con porosidades que varían entre el 6% y el 25%, sin embargo, son de reducido volumen.

Hasta antes del declive en la producción de petróleo del Complejo Cantarell entre 2004 y 2005, representaba el 2.7% del aceite extraído a nivel mundial, con una producción diaria de un millón 479 mil barriles de petróleo crudo, que generó divisas que contribuían de manera muy significativa a la economía del país (Zuñiga, 2009). Los recientes trabajos de exploración en la Sonda de Campeche y el aumento en la productividad de los campos en desarrollo permitieron la extracción de 616 [Mbd] de crudo y 315 [MMpcd] de gas en el Complejo Ku-Maloob-Zaap, lo que representó el 33% y 8% de la producción nacional, respectivamente, durante el 2023.

En el Complejo Cantarell se extrajeron 164 [Mbd] de crudo y 447 [MMpcd] de gas, equivalentes al 9% y 11% de la producción nacional, respectivamente. Asimismo, en el Activo Abkatún-Pol-Chuc se extrajeron 126 [Mbd] de petróleo y 345 [MMpcd] de gas, contribuyendo con el 7% y 9% de la producción nacional (PEMEX, 2023).

En la tabla 2 se resalta la producción de aceite y gas de los principales campos productores en el último sexenio.

Tabla 2. Producción de aceite y gas en el periodo 2018-2024 de los principales campos productores de la Sonda de Campeche. Datos obtenidos de la CNIH (2024).

Campo	Producción de aceite anual [Mbd]						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Maloob	432	393	334	299	275	305	320
Zaap	297	285	276	261	238	190	167
Xanab	109	46	86	92	81	60	44
Ayatsil	49	76	92	94	86	92	88
Balam	21	33	46	48	48	65	58
Campo	Producción de gas anual [MMpcd]						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Maloob	176	228	277	312	298	356	446
Zaap	199	233	227	223	187	188	179
Xanab	84	32	61	78	66	45	29
Ayatsil	6	9	10	11	10	10	9
Balam	6	9	13	14	14	19	17

Además de la producción de hidrocarburos, que genera ingresos a la nación, se contemplan los empleos generados antes, durante y después de la perforación y extracción del recurso, con ello la zona sur y sureste de México ha incrementado su percepción de renta y la calidad de vida reduciendo así los índices de marginación y pobreza extrema desde 1970. La industria petrolera ha fomentado el desarrollo de

polos económicos como Villahermosa, Ciudad del Carmen y Coatzacoalcos (Cámara, 2023).

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

La historia geológica de la Sonda de Campeche inició con el *rifting* del Golfo de México que configuró una cuenca continental (Triásico-Jurásico inferior), que evolucionó a una oceánica con el desarrollo completo del *riff* formando el paleo-Golfo de México (Jurásico medio-superior). Las condiciones tectónicas cambiaron en la parte final del Jurásico y durante el Cretácico, convirtiéndose en una cuenca de margen pasivo.

Los eventos de deformación que originaron el Orógeno Mexicano, la Orogenia Chiapaneca y la halocinesis en sus respectivos tiempos, desarrollaron las trampas estructurales que formaron las trampas petroleras. Las secuencias evaporíticas llevadas a niveles estratigráficos superiores y las lutitas fungieron como rocas sello. Su historia tectónica estableció las provincias geomorfológicas del Sureste Mexicano entre las que destacan la Cuenca de Macuspana, el Pilar Reforma-Akal y la Cuenca de Comalcalco.

Las unidades estratigráficas del Jurásico superior, como Edzná, se formaron en una zona de circulación restringida, en un ambiente anóxico que permitió el desarrollo y preservación de una gran cantidad de materia orgánica proveniente de diferentes organismos, principalmente el plancton que constituyeron a las principales rocas generadoras de la zona.

Las secuencias oolíticas del Kimmeridgiano y la brecha K-Pg corresponden con las rocas almacenadoras, siendo la última la de mayor calidad debido a su gran espesor y su alta permeabilidad. La Sonda de Campeche ha sido ampliamente estudiada desde el punto de vista geológico debido a los grandes yacimientos de hidrocarburos que se han explotado desde el descubrimiento del Complejo Cantarell, por lo que es una zona de gran relevancia.

6.2. Recomendaciones

Aunque la Sonda de Campeche se ha estudiado enormemente, aún queda duda sobre sus límites geográficos específicos, ya que varían según la interpretación de cada autor. Se recomienda definir estrictamente sus límites con base en sus aspectos estructurales-sedimentarios fácilmente identificables como fallas regionales o cambios de facies. También se recomienda realizar estudios más profundos en cuanto a las secuencias del Cretácico y definir las en formaciones concretas, debido a que no se encuentra con información suficiente, posiblemente debido a su bajo potencial económico.

Referencias

Aguilera, M. A., Cureño, R., Zarate, J., De La Calleja, A. y López, A. (2003). *Carta Geológico-Minera Minatitlán E15-7, escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo, México*. Consejo de Recursos Minerales. Informe, 68.

Ángeles, F. J., Reyes, J. y Quezada, J. M. (1992). *Evolución tectónica de la Sonda de Campeche, estilos estructurales resultantes y su implicación en la generación y acumulación de hidrocarburos: II Simposio de Exploración Petrolera*. Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). Ciudad de México. México.

Ángeles, F. J., Reyes, J., Quezada, J.M., y Meneses, J.D. (1994). *Tectonic Evolution, Structural Styles, and Oil Habitat in Campeche Sound*. México.

Ángeles, F. J. (1996). *Estratigrafía del Jurásico Superior del subsuelo en la Sonda de Campeche (Golfo de México)* [Tesis de maestría]. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional.

Ángeles, F. J. (2003). *Monografía petrolera de la zona marina* (2a edición). Petróleos Mexicanos.

Ángeles, F. J. (2004). Bosquejo geológico de la Sonda de Campeche. *Ingeniería petrolera* (pp. 48-58).

Arche, A. (2010). *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.

Audley, M. G. (2009). *Timor–Tanimbar Trough: The Foreland Basin of the Evolving Banda Orogen*. 10.1002/9781444303810.ch5.

Bardach, J. E., Cotter, C. y Morgan, R. (2024). Pacific Ocean. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/place/Pacific-Ocean>

Bernal, L., Clara, L., Gómez, R. D., Hernández, U., Maldonado, V., Miranda, E., Mora, G., Patiño, J., Robles, J. y Ruiz, J. (2010). *Provincia Petrolera Sureste (Salina del Istmo, Reforma-Akal y Macuspana)*. Subdirección técnica de exploración, Petróleos Mexicanos: Exploración y Producción.

Biju, B. (2002). *Sedimentary Geology: Sedimentary basins, depositional environments, petroleum formation*. Editions TECHNIP.

Boggs, S. Jr. (2006). *Principles of stratigraphy and sedimentology (4ta edición)*. Pearson Prentice Hall.

Cámara, F. R. (2023). *Las carencias de la zona sur sureste del país y su transición a la reactivación económica*. Cámara Periodo Legislativo. <https://comunicacionsocial.diputados.gob.mx/revista/index.php/pluralidad/las-carencias-de-la-zona-sur-sureste-del-pais-y-su-transicion-a-la-reactivacion-economica>

Cantú, A. (2009). Upper Jurassic stratigraphy (Oxfordian and Kimmeridgian) in petroleum wells of Campeche Shelf, Gulf of Mexico. En C. Bartolini y J. R. Román Ramos (eds.), *Petroleum systems in the southern Gulf of Mexico*. AAPG Memoir (Vol. 90, pp. 79–91).

Castillo, C. (1955). Bosquejo Estratigráfico de la Cuenca Salina del Istmo de Tehuantepec. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, (Vol. 7(5-6), pp. 173-212).

Centro Nacional de Información de Hidrocarburos (CNIH). (2024). *Producción de Hidrocarburos de los campos Maloob, Zaap, Xanab, Ayatsil y*

Balam [Archivo Excel]. CNIH - Producción.
<https://produccion.hidrocarburos.gob.mx/#>

Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH). (2024). *Campos (Reservas 01/01/2024) y Áreas con Recursos* [Archivo Shape]. Mapa de Hidrocarburos.
<https://mapa.hidrocarburos.gob.mx/>

Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH). (s. f.). *Atlas Geológico de las Cuencas del Surestes-Cinturón Plegado de la Sierra de Chiapas*.

Covey, M. (1986). The evolution of foreland basins to steady state: Evidence from the western Taiwan foreland basin. En P. A. Allen & P. Homewood (eds.), *Foreland basins* (Vol. 8, pp. 77–90). International Association of Sedimentologists.

Coordinación de Plays Establecidos (CPE). (2006a). *Informe de Play Cretácico Superior*. Activo Regional de Exploración Marina. Región Marina Suroeste.

Coordinación de Plays Establecidos (CPE). (2006b). *Informe de Play Jurásico Superior, Oxfordiano*. Activo Regional de Exploración Marina. Región Marina Suroeste.

Davison, I., Pindell, J., y Hull, J. (2020). The Basins, Orogens and Evolution of the southern Gulf of Mexico and northern Caribbean. *Geological Society, London, Special Publications*, SP504–2020–218. 10.1144/sp504-2020-218

Einsele, G. (2000). *Sedimentary Basins: Evolution, Facies and Sediment Budget* (2da edición). Springer.

Flores, A. (1978). *Paleosedimentología y diagénesis del área Chac*. Superintendencia de Paleosedimentación, Zona Sur, Petróleos Mexicanos (pp. 1–11). Inédito.

Galloway, W. E. (2008). Chapter 15: Depositional evolution of the Gulf of Mexico sedimentary basin. En *Sedimentary basins of the world* (Vol. 5, pp. 505–549).

Grajales, J. M., Murillo, G., Rosales, C., Cedillo, E. y García, J. (2003). Heterogeneity of Lithoclast Composition in the Deep-water Carbonate Breccias of the K/T Boundary Sedimentary Succession, Southeastern Mexico and Offshore Campeche. En C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede (eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir (Vol. 79, pp. 312–329).

Guzmán, A. E., Limón, M. y Márquez, B. (2000). *Petroleum Provinces of the 21st Century*. Second Wallace E. Pratt memorial Conference. San Diego, California.

Hernández, A. (2008). *Origen, evolución e importancia económica petrolera del Campo Cantarell, en la Sonda de Campeche* [Tesis de licenciatura]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Mariano, E. (5 de julio de 2024). Pemex avanza en la perforación del pozo Etkal-201EXP. *Energy & Commerce*. <https://energyandcommerce.com.mx/pemex-avanza-en-la-perforacion-del-poza-etkal-201exp/>

Mariano, E. (18 de julio de 2024). Fieldwood Energy actualiza plan de exploración superficial en Pokoch e Ichalkil. *Energy & Commerce*. <https://energyandcommerce.com.mx/fieldwood-energy-actualiza-plan-de-exploracion-superficial-en-pokoch-e-ichalkil/>

Marton, G. L. y Buffler, R. T. (2016). *Jurassic-Cretaceous Tectonic Evolution of the Southeastern Gulf of Mexico, Constrains on the Style and Timing of Gulf of Mexico Rift-Drift Development*. Adaptado de la presentación oral dada en la Convención y Exhibición internacional de la AAPG 2016, Cancún, México, Septiembre 6-9, 2016.

Meneses de Gyves, J. (1980). Geología de la Sonda de Campeche. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* (Vol. 32, pp. 1-26).

Miranda, C. E. (1982). *Contribución al estudio de los sistemas de depósito de las rocas y sedimentos miocénicos de la región sur de la cuenca Salina del*

Istmo [Tesis profesional]. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional.

Ortiz, A. (2010). *Secuencias estratigráficas de la Sonda de Campeche* [Tesis de licenciatura]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México].

Ortuño, S., Soriano, E., Romero, C., Rosales, J., Bahena, E., Hernández, S. y Cárdenas, A. (2009). Two-dimensional and three-dimensional numerical simulation of petroleum systems approaching the deep-water gulf of Mexico (Kayab Area, Campeche Sound, Mexico): *Definition of thermally mature and prospective areas*. En C. Bartolini and J. R. Román Ramos (eds.), *Petroleum systems in the southern Gulf of Mexico*. AAPG Memoir (Vol. 90, pp. 117–136).

Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución Geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (Tomo LIX, Vol. 1, pp. 19-42).

Padilla y Sánchez, R. J. (8 de diciembre de 2020). *Apertura y evolución tectónica del Golfo de México desde el Triásico Tardío* [Conferencia]. Serie Cátedras Selectas 2020. División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

http://www.dict.unam.mx/Catedras_Selectas_de_Geologia_de_Mexico.php

Petróleos Mexicanos (PEMEX). (1988). *Estratigrafía de la República Mexicana: Cenozoico* (p 140).

Petróleos Mexicanos (PEMEX). (2012). *Las Reservas de Hidrocarburos en México* (pp. 37-40). Inédito.

Petróleos Mexicanos (PEMEX). (2023). *Informe Anual 2023*.

Pindell, J. L. (1985). Alleghanian reconstruction and the subsequent evolution of the GoM, Bahamas and Proto-Caribbean Sea. En *Tectonics* (Vol. 4, pp. 1-39).

Pindell, J., y Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean, and northern South America in the mantle reference frame: An update. *Geological Society, London, Special Publications* (Vol. 328, pp. 1–55).
<https://doi.org/10.1144/SP328.1>

Read, J. F. (1985). Carbonate Platform Facies Models. *AAPG Bulletin* (Vol. 69 (1), pp. 1–21). <https://doi.org/10.1306/AD461B79-16F7-11D7-8645000102C1865D>

Réyez, J. (2023). Sonda de Campeche, atractiva para piratas modernos: Cesnav-Semar. *Contra Línea*. <https://contralineacom.mx/interno/semana/sonda-de-campeche-atractiva-para-piratas-modernos-cesnav-semar/#:~:text=Es%20conocida%20por%20su%20importancia,de%20hidrocarburos%20en%20la%20regi%C3%B3n>.

Reyna, B. A. (2007). *Estudio bioestratigráfico con foraminíferos planctónicos y bentónicos del Terciario en un pozo en la Sonda de Campeche* [Tesis de licenciatura]. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México.

Shann, M. V. (2020). The Sureste Basin of Mexico: its framework, future oil exploration opportunities and key challenges ahead. En Davison, I., Hull, J. N. F. y Pindell, J. (eds) *The Basins, Orogens and Evolution of the southern Gulf of Mexico and Northern Caribbean*. Geological Society, London, Special Publications (Vol. 504). 10.1144/SP504-2019-214

Schlumberger (2010). *Well Evaluation Conference: WEC*. México.

Schulte, P., *et al.* (2010). The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous- Paleogene boundary. *Science* (Vol. 327, pp. 1214-1218).

Shepard, P. S. (1977). *Geological Oceanography: Evolution of coasts, continental margins and the deep-sea floor*. Crane, Russak & Co. New York.

Spalleti, L. A. (2006). *Nociones sobre las cuencas sedimentarias en el marco de la tectónica global* [Diapositiva de PowerPoint]. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/65bcuencasSed.pdf>

Tarback, E. J., Lutgens, F. K. y Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física* (8va edición). Pearson Educación S. A. Madrid.

Wu, J. E., McClay, K., Whitehouse, P., y Dooley, T. (2009). 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins. *Marine and Petroleum Geology* (Vol. 26(8), pp. 1608–1623). 10.1016/j.marpetgeo.2008.06.007

Zuñiga, J. A. (12 de julio de 2009). Mantiene Pemex la sonda de Campeche como área fundamental. *Economía, La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/2009/07/12/index.php?section=economia&article=022n2eco>