

Interpretación estructural de una sección sísmica en la región Arcabuz–Culebra de la Cuenca de Burgos, NE de México

Arturo Ortiz-Ubilla^{1,2,*} y Gustavo Tolson³

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México D. F.

² Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Norte Lázaro Cárdenas 152, Apdo. Postal 14-805, 07730 México, D.F.

³ Departamento de Geología Regional, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510 México D. F.

* aubilla@imp.mx

RESUMEN

En la región Arcabuz–Culebra, dentro de la porción occidental de la provincia petrolera Cuenca de Burgos, la secuencia estratigráfica constituida por un basamento probablemente metamórfico y de edad Paleozoico tardío y una cubierta sedimentaria del Jurásico Medio(?)–Oligoceno temprano, se caracteriza a lo largo de una sección sísmica conformando dos paquetes con distinto comportamiento estructural que describen una deformación distensiva de tipo despegado. El paquete inferior incluye el basamento así como las unidades mesozoicas con una disposición homoclinal de echado general hacia el oriente y una ausencia aparente de deformación en la escala de la resolución sísmica. El paquete deformado suprayacente contiene las unidades paleógenas afectadas por fallas normales lítricas inclinadas al este, las cuales enraizan en el límite Mesozoico–Paleógeno, así como cuerpos diapíricos de lutita. La deformación distensiva despegada desarrolla dos estilos estructurales: fallas normales despegadas, predominante en la parte occidental de la sección, y estructuras de lutita en la parte oriental. El análisis de las relaciones entre las estructuras de deformación y de sedimentación sugiere que la deformación acaeció durante el Eoceno. Se interpretan tres etapas espacial y temporalmente distintas de fallamiento normal; una de carácter postdeposicional en el Eoceno temprano y dos de tipo sinsedimentario en el Eoceno medio y en el Eoceno tardío–Oligoceno temprano. Se interpretan también tres etapas de diapirismo de lutita, una etapa reactiva en el Eoceno medio, una etapa activa en la parte tardía del Eoceno medio y una nueva etapa reactiva en el Eoceno tardío–Oligoceno temprano. La interacción de los dos estilos de deformación en el Eoceno medio en la porción media de la sección redundó en la formación de un depocentro en el cual se llevó a cabo la acumulación de importantes espesores de las formaciones Queen City, Weches y Cook Mountain.

Palabras clave: Fallas normales despegadas, estructuras de lutita, Eoceno, Cuenca de Burgos.

ABSTRACT

The seismically imaged subsurface stratigraphy of the Arcabuz–Culebra area in the Burgos Basin (Nuevo León State, northeast Mexico) consists of a probably metamorphic basement of late Paleozoic age unconformably overlain by a sequence of sedimentary rocks which spans from the Middle Jurassic (?) to the early Oligocene. This stratigraphic sequence can be subdivided into two packages with different structural behavior that define a detached extensional deformation. The lower sequence appears undeformed, and includes the basement as well as the mesozoic marine strata which dip shallowly to the east. The upper sequence includes the paleogene units and is deformed by a series of eastward dipping normal faults with listric geometry, which sole out at the Mesozoic–Paleogene boundary. The upper

sequence also exhibits shale diapir structures. Two structurally distinct domains can be identified within the detached upper plate: the deformation within the western domain is dominated by listric faulting defining a detached normal fault style, while in the eastern domain, shale mobility or flow appears to be the dominant deformation mechanism defining a shale structure style. The truncation of fault systems by paraconformities constrains their age to the Eocene. In detail, the first deformational phase, of early Eocene age, is post-depositional, while the latter two phases in middle Eocene and late Eocene–early Oligocene time, respectively, correspond to syn-sedimentary events. These last two pulses are also spatially and temporally associated with three periods or stages of shale mobility: a middle Eocene reactive stage, a late middle Eocene active stage and a new late Eocene–early Oligocene reactive stage. Toward the middle of the seismic section, the intersection of the two structural styles corresponds with the development of an important depocenter, in which important thicknesses of Queen City, Weches, and Cook Mountain strata accumulated.

Key words: Detached normal faults, shale structures, Eocene, Burgos Basin.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca de Burgos es una provincia petrolera productora básicamente de gas que se encuentra sobre parte de la Planicie Costera y de la Plataforma Continental del Golfo de México, en el noreste de México (Figura 1). Geológicamente, considerando los elementos estructurales de la región del Golfo de México (Ewing, 1991), esta cuenca constituye la porción meridional de un rasgo paleogeográfico cenozoico conocido como *Rio Grande Embayment*.

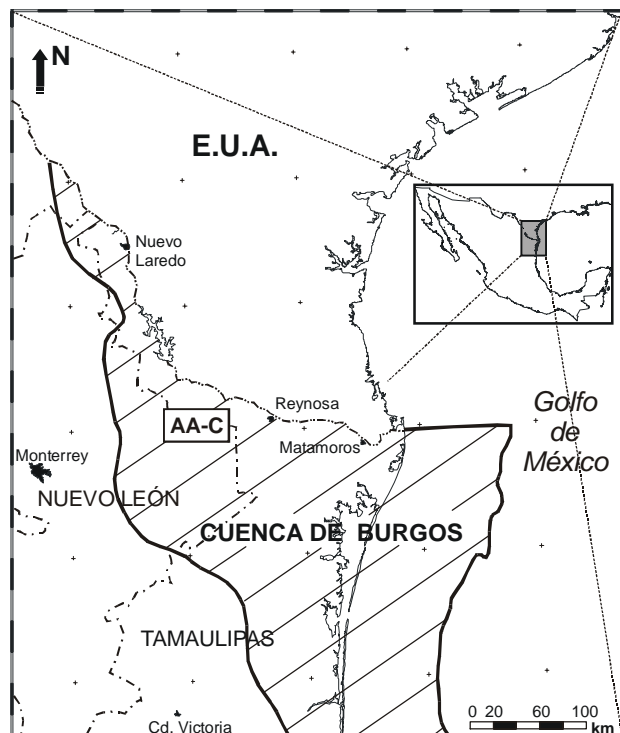


Figura 1. Localización de la Cuenca de Burgos (área achurada) y del área Arcabuz–Culebra (AA–C).

La región de la cuenca se ha individualizado de las áreas circundantes por su distintiva evolución cenozoica, caracterizada por dos sucesos mayores: uno es la acumulación de una potente secuencia sedimentaria siliciclástica, relacionada con el desarrollo de sistemas deltáicos, que llega a tener un espesor de hasta 10,000 m (González, 1976; González y Holguín, 1992), y el otro es la manifestación de una deformación extensiva definida primordialmente por numerosas fallas normales (Harris, 1952; Guzmán, 1956; Carrasco, 1966; Rodríguez, 1969; Echánove, 1976, 1986).

El basamento de la cuenca, de acuerdo con información de algunos pozos en su margen occidental, está formado por rocas metamórficas e ígneas intrusivas cuya distribución y relaciones geológicas entre ellas no son bien conocidas ni entendidas. La cubierta sedimentaria comprende un paquete de rocas mesozoicas (Triásico Tardío–Jurásico Medio(?))–Cretácico Tardío) y de rocas cenozoicas.

En el área de la Cuenca de Burgos sólo se encuentran aflorando las rocas cenozoicas, las cuales describen hasta la línea de costa una serie de fajas orientadas en una dirección general NNW–SSE que disminuyen en edad de Oeste (Paleoceno) a Este (Mioceno) (Figura 2). De esta manera, la distribución de las rocas cenozoicas dentro de la cuenca, dependiendo de su edad, se restringe a la zona comprendida desde su área de afloramiento hacia el oriente, manifestando un echado regional y profundizando continuamente hacia el Este, además de un marcado aumento de espesor (Yzaguirre, 1969) y una variación hacia facies de mayor batimetría (Rodríguez, 1976; Pérez-Cruz, 1992; PEMEX, 1998). El basamento y las rocas mesozoicas tienen un comportamiento similar, ya que profundizan paulatinamente hacia el oriente, llegando a estar profundamente sepultadas hacia el centro de la cuenca.

Como resultado de lo anterior, hacia la zona central de la cuenca no se conocen de manera directa las características de las rocas cenozoicas más antiguas, de las mesozoicas y del basamento. Lo mismo sucede con el detalle de la arquitectura de la cuenca, que prácticamente no se mani-

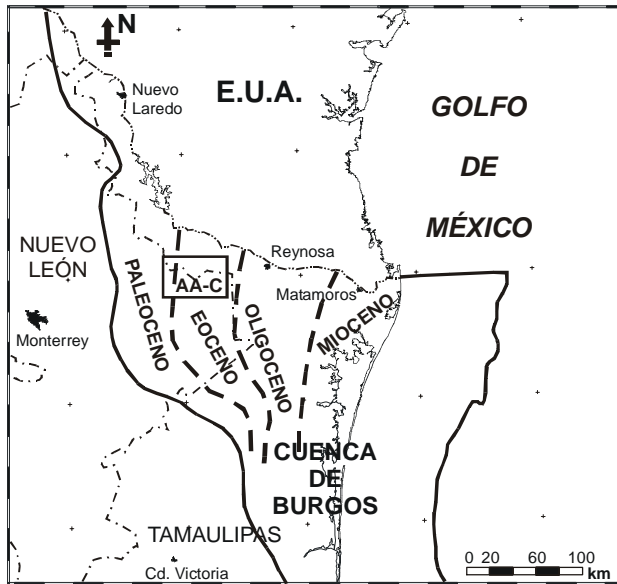


Figura 2. Franjas geológicas de la Cuenca de Burgos (AA-C: área Arcabuz–Culebra). Modificada de Echánove (1986).

fiesta superficialmente, debido al bajo relieve de la zona y a las escasas y aisladas áreas de afloramiento. De esta manera, tanto las características de las unidades estratigráficas como la estructura de la cuenca se han descrito básicamente a partir de información sísmica y de pozos.

Las numerosas fallas normales presentes en la Cuenca de Burgos, tanto de carácter postdeposicional como de crecimiento, conforman una serie de bloques subparalelos de orientación general norte–sur en donde el bloque de techo de la falla, generalmente al oriente, baja en dirección al centro de la cuenca (Figura 3). Al igual que la distribución superficial de los depósitos sedimentarios cenozoicos, las fallas son más jóvenes hacia el este, indicando una estrecha relación espacial y temporal de la actividad tectónica y sedimentaria en el desarrollo del área. Los trabajos anteriores (*e.g.*, González y Holguín, 1992) no han presentado un análisis estructural detallado, ya que han tenido otros objetivos, como la identificación de blancos de exploración someros, o bien por falta de resolución sísmica en las partes más profundas del área.

El propósito de este trabajo consiste en caracterizar la deformación extensiva presente en el área Arcabuz–Culebra, así como analizar los mecanismos que la produjeron. El área Arcabuz–Culebra se encuentra ubicada en la porción occidental de la Cuenca de Burgos, en la parte limítrofe entre los estados de Nuevo León y Tamaulipas (Figura 1). Tomando en consideración las franjas con rocas de distinta edad bosquejadas superficialmente en la cuenca, el área de estudio se localiza en su mayor parte dentro de la Franja del Eoceno, con sólo la porción más occidental en la Franja del Paleoceno (Figura 2). El análisis de la deformación extensiva se muestra y se describe a lo largo

de una sección sísmica de orientación general oeste–este con una extensión de 33 km, apoyada en información adicional de otras líneas sísmicas aledañas, así como en datos de pozos.

DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN

En el área Arcabuz–Culebra, la secuencia estratigráfica abarca edades del Paleozoico tardío al Oligoceno temprano (Figura 4), en donde las más antiguas, muy probablemente de carácter metamórfico y del Paleozoico tardío, constituyen el basamento de una potente cubierta sedimentaria con un rango de edad que va del Triásico Tardío–Jurásico Medio, aunque probablemente sólo desde la parte final del Jurásico Medio, hasta el Oligoceno temprano. Únicamente las rocas del Paleoceno–Oligoceno inferior se conocen de manera directa, ya sea en afloramientos o porque han sido cortadas por algunos pozos, mientras que la porción inferior restante de la columna estratigráfica sólo ha sido reconocida sísmicamente.

La caracterización de las unidades estratigráficas presentes en la sección de estudio se realizó individualizando paquetes o unidades con diferente respuesta sísmica, cada una de las cuales fue relacionada con alguna de las unidades litoestratigráficas conocidas mediante correlación sísmica, extrapolando a través de secciones sísmicas la información de los pozos que han cortado estas rocas al poniente del área, en la margen occidental de la Cuenca de Burgos. Las unidades sísmicas así consideradas toman en cuenta la distinta respuesta sísmica ocasionada por las heterogeneidades litológicas mayores de la secuencia estratigráfica, en donde pueden quedar incluidas una o más unidades litoestratigráficas (Figura 5), y que son referidas por su edad o por la unidad litoestratigráfica representativa. La información de los pozos localizados a lo largo de la sección auxilió de manera directa en la identificación de dichas unidades estratigráficas.

El basamento se distribuye hacia la base de la sección (Figura 6), profundizando paulatinamente hacia el oriente. La base de esta unidad no se presenta, mientras que su cima se caracteriza por una discordancia, mostrando remanentes de una paleotopografía preexistente.

Sobreyaciendo al basamento y también profundizando hacia el oriente, se diferencian cuatro unidades de la cubierta sedimentaria. La primera de ellas, directamente sobre el basamento, se relaciona a un paquete de rocas de carácter clástico, areniscas, limolitas y algunos conglomerados, de edad incierta. Se le ha definido con un rango muy amplio, Triásico Tardío–Jurásico Medio, y de manera práctica Pre-Oxfordiano, por lo que el horizonte sísmico que marca su cima es referido como Base Oxfordiano (BO). Sobreyace a esta unidad otra que representa un paquete evaporítico–carbonatado y terrígeno–carbonatado que incluye varias unidades litoestratigráficas (Figuras 4 y 5) de edad Oxfordiano–Titoniano, por lo que se le denomina Jurásico

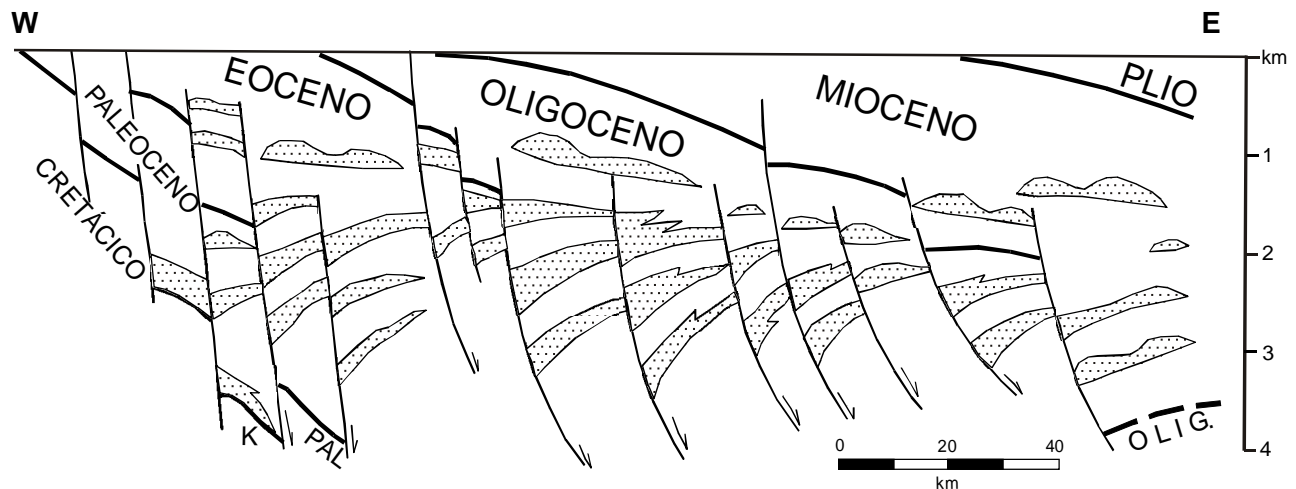


Figura 3. Sección esquemática transversal de la Cuenca de Burgos mostrando su arquitectura regional (modificada de González y Holguín, 1992).

Superior (JS). Encima se tiene otra unidad que se relaciona con una secuencia calcáreo-arcillosa asociada con las formaciones Tamaulipas Inferior y Otates de edad Berriasiano–Aptiano y que se refiere como Cretácico Inferior (KI). Sobre esta última se tiene la unidad que se considera representa un paquete calcáreo de lodos finos de la Formación Tamaulipas Superior del Albiano–Cenomaniano a la que se le denomina, en círculos petroleros, Cretácico medio (KM) (Pérez-Cruz, 1992).

Las relaciones entre estas cuatro unidades se marcan en la sección de manera paralela y concordante. Los espesores de cada una de ellas son sensiblemente homogéneos, excepto el de la unidad BO que presenta algunas variaciones. No se puede definir con seguridad la distribución de estas unidades hacia la porción oriental de la sección, en parte por profundizar más allá del alcance del registro sísmico y en parte porque la respuesta sísmica hacia esta porción no es clara (Figura 6).

Sobreyaciendo concordantemente a la unidad KM se presenta la unidad que se denomina Cretácico Superior (KS) ya que se considera constituida por calizas arcillosas, lutitas calcáreas, margas y lutitas de las formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez referidas en la margen occidental de la Cuenca de Burgos con un rango de edad Turoniano–Maestrichtiano (Figuras 4 y 5; Echánove, 1986). La unidad KS muestra un espesor homogéneo y está también inclinada al oriente en la parte occidental de la sección (Figura 6), pero hacia la porción central, la continuidad hacia el oriente de la parte superior de la unidad se ve interrumpida por un cambio en la respuesta sísmica. Se presenta una zona caótica, hecho que se presenta también en su parte inferior un poco más al oriente, de manera similar que con las unidades infrayacentes.

Estratigráficamente encima se tiene otra unidad de lutita con algunos cuerpos arenosos que se relacionan con

la Formación Midway del Paleoceno y con las Secuencias 60 Ma y 63 Ma: Estas dos últimas unidades fueron determinadas en estudios de estratigrafía de secuencias (PEMEX, 1998) en los que se utilizó como referencia la escala de tiempo de Haq *et al.* (1987), por lo que se le denomina como Paleoceno Midway (PM). Esta unidad está afectada por fallas normales en la parte occidental de la sección, pero hacia la porción central su continuidad se interrumpe por una zona de respuesta sísmica relativamente más caótica, que sugiere la ocurrencia de una unidad diferente.

La zona de respuesta sísmica caótica, ampliamente distribuida en la parte oriental de la sección con una forma irregular, pero básicamente definiendo una geometría diapírica (Figura 6), se considera una unidad constituida predominantemente por lutita, la cual sería el material equivalente temporal que representa una variación de facies hacia esta porción del área de los depósitos de la parte superior de la unidad KS (Formación Méndez) y de la unidad PM. Las relaciones de corte o intrusión que esta unidad describe con las unidades circundantes y su respuesta sísmica caótica, sugieren la movilidad o alteración de la disposición original de los materiales arcillosos, por lo que la unidad se refiere como Lutita Móvil (LM).

La unidad estratigráficamente arriba se asocia con un paquete de composición areno-arcillosa de edad Paleoceno tardío–Eoceno temprano denominada Formación Wilcox (Figura 4), compuesta de dos partes (Figura 5): una del Paleoceno denominada Wilcox Inferior o Wilcox Paleoceno (WP) y la otra del Eoceno citada como Wilcox Superior o Wilcox Eoceno (WE), y con estratigrafía de secuencias como las Secuencias 54.2 Ma y 48.5 Ma (PEMEX, 1998), respectivamente. La unidad WP se distribuye a lo largo de toda la sección, profundiza hacia el oriente y está afectada por fallas normales y diapiros de lutita. Sobreyace a las

unidades PM y LM, y en la zona de esta última manifiesta una disminución de espesor (Figura 6), probablemente por la asimilación o canibalización de una porción de su base que pasa a ser parte de la unidad LM. Infrayace a la unidad WE pero su cima llega a estar parcialmente erosionada poniéndose en contacto discordante con la Formación Recklaw. Por su parte, la unidad WE se encuentra afectada también por fallas normales y tiene una distribución discontinua en la sección (Figura 6). En algunas zonas no está presente, sugiriendo que parte o aún la totalidad de ella ha sido removida o erosionada, como en la parte oriental donde es cortada y sobreyacida discordantemente por la Formación Yegua.

La siguiente unidad se relaciona con la Formación Recklaw, una secuencia arcillosa con desarrollos arenosos de la parte temprana del Eoceno medio (Figuras 4 y 5). Esta unidad está inclinada al oriente, es afectada por fallas normales y exhibe característicos cambios de espesor. Variaciones en la respuesta sísmica señalan que está constituida por varios cuerpos que en su mayoría tienen forma lenticular, aunque tres mayores se individualizan a

grandes rasgos con relaciones discordantes de carácter intraformacional entre sí. Dos de ellos están presentes sólo en la zona de mayor espesor de la unidad en la parte occidental de la sección, y el tercero en la cima en toda la extensión de la unidad (Figura 6). En la zona engrosada, la Formación Recklaw sobreyace discordantemente a la unidad WP y en la parte oriental de la sección llega a estar ausente por erosión.

La Formación Recklaw es a su vez sobreyacida concordantemente por otra unidad que se asocia con la Formación Queen City, una secuencia más arenosa de la parte temprana del Eoceno medio, distribuida en casi toda la sección, excepto la parte oriental donde fue erosionada, mostrándose con un paulatino incremento de espesor hacia el oriente y afectada por fallas normales. A esta unidad le suprayace concordantemente otra que se asocia con la Formación Weches, una secuencia relativamente más arcillosa de edad Eoceno medio cuya cima se relaciona con el límite de los 44 Ma (PEMEX, 1998), que se distribuye en la sección mostrando engrosamiento y afectación por fallas normales, hasta que es truncada erosionalmente en la parte oriental de la misma. Sobreyaciendo de manera concordante a la unidad de la Formación Weches se encuentra una unidad que se relaciona con la Formación Cook Mountain, consistente en una secuencia arcillo-arenosa de la parte tardía del Eoceno medio cuya cima se relaciona con el límite 39.5 Ma (PEMEX, 1998), la cual presenta fallas normales y cuya distribución en la sección es interrumpida en la parte oriental por un contacto erosivo.

Una unidad que se relaciona con la Formación Yegua sobreyace discordantemente a la de la Formación Cook Mountain, y en la parte oriental de la sección también a la sucesión Wilcox Eoceno-Weches (Figura6). Está constituida por una secuencia areno-arcillosa con escasa microfaua afectada por fallas normales a la cual se le asigna una edad de Eoceno tardío, y se distribuye a lo largo de toda la sección con un considerable incremento en espesor hacia la porción oriental. En esta unidad se pueden reconocer tres cuerpos o paquetes mayores con relaciones discordantes de carácter intraformacional entre ellos, el inferior está presente sólo en la parte oriental de la sección, en la zona de mayor espesor de la unidad.

Sobreyaciendo concordantemente a la unidad de la Formación Yegua se presenta otra que se relaciona con la Formación Jackson, que consiste en una secuencia areno-arcillosa en la base que varía a arcillo-arenosa hacia la cima, del Eoceno tardío y cuya cima se ha relacionado con el límite de los 36 Ma (PEMEX, 1998). Esta unidad se encuentra sólo en la porción oriental de la sección, afectada por fallas normales y mostrando un incremento de espesor hacia el oriente. La unidad que se asocia con la Formación Vicksburg sobreyace concordantemente a la de la Formación Jackson, y se considera como una secuencia areno-arcillosa del Oligoceno temprano afectada por fallas normales. Esta unidad también aflora sólo en la porción oriental de la sección, siendo la unidad más joven presente en el área.

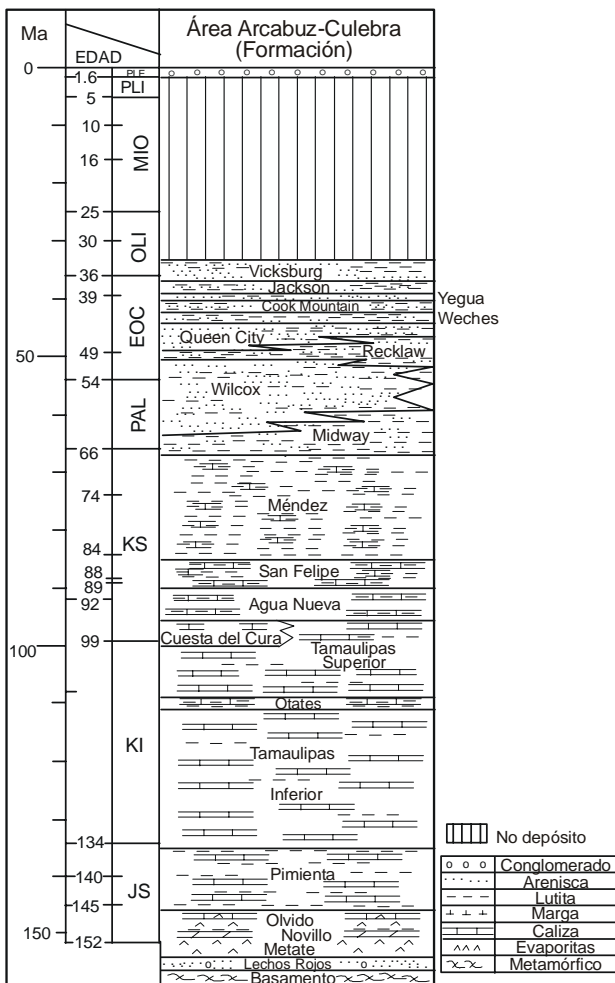
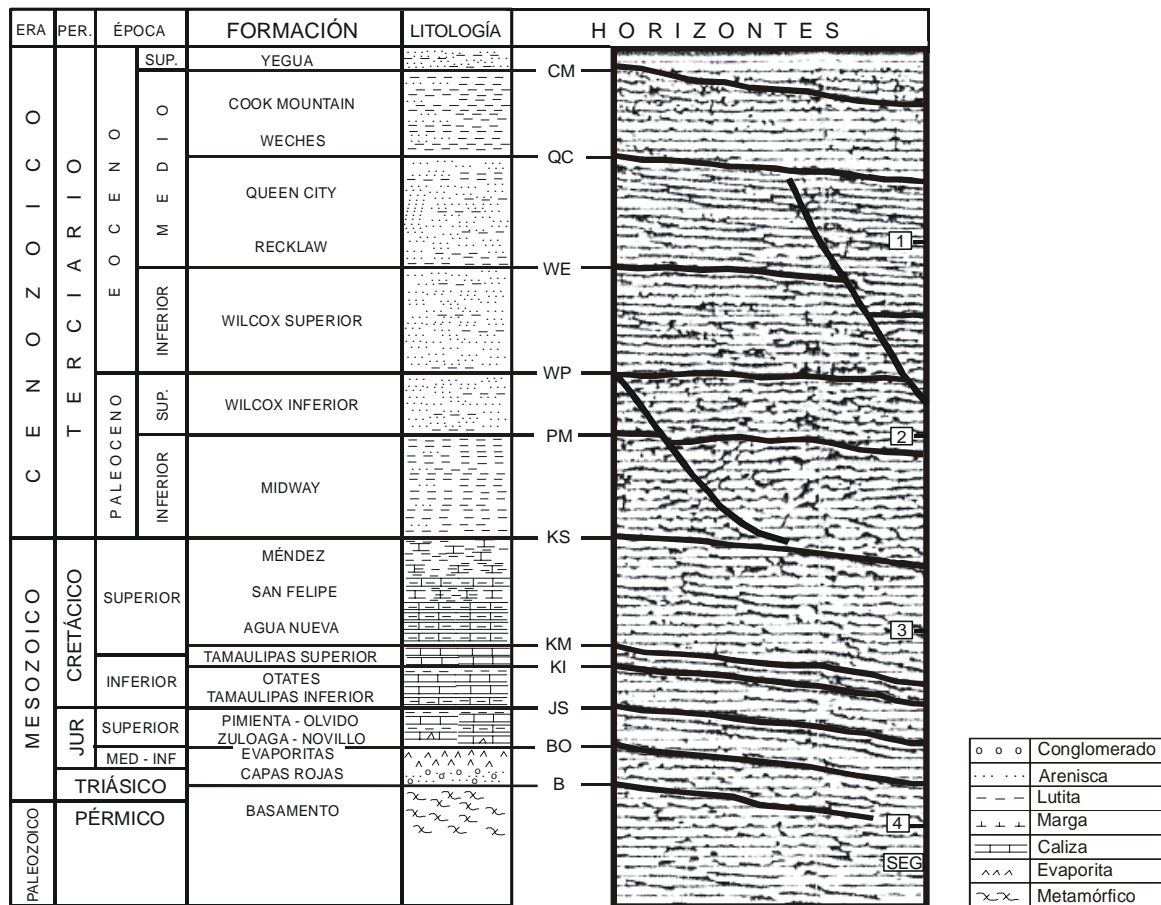


Figura 4. Columna estratigráfica compuesta del área Arcabuz-Culebra.



(modificado de Pérez, 1992)

Figura 5. Correlación de unidades litoestratigráficas y horizontes sísmicos en el área Arcabuz-Culebra. B: Basamento; BO: Base Oxfordiano; JS: Jurásico Superior; KI: Cretácico Inferior; KM: Cretácico medio; KS: Cretácico Superior; PM: Paleoceno Midway; WP: Wilcox Paleoceno; WE: Wilcox Eoceno; QC: Queen City; CM: Cook Mountain.

INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

Caracterización geométrica

A lo largo de la sección de estudio del área Arcabuz-Culebra, la disposición espacial de las distintas unidades litoestratigráficas presentes permiten diferenciar la secuencia estratigráfica con dos zonas o dominios estructurales de distinta arquitectura: un paquete que no presenta deformación extensional aparente y otro que sí la manifiesta (Figura 6). El primero incluye las rocas del basamento y las secuencias mesozoicas y el segundo las secuencias cenozoicas paleógenas.

La zona deformada presenta básicamente estructuras de carácter extensivo y se manifiesta sobreyaciendo a la no deformada, describiendo para la sección un estilo de deformación del tipo despegado o de cobertura (*thin-skinned*). En este tipo específico de deformación extensional, el basamento o un substrato de una parte o de toda la cubierta sedimentaria no se encuentra involucrado en la deformación (Harding y Lowell 1979; Bally, 1983; Lowell, 1985; Mandl,

1988; Foster y Beaumont, 1989).

En la sección, el paquete infrayacente no deformado por extensión se caracteriza por una estructura sensiblemente homoclinal, donde el basamento y las secuencias mesozoicas, con un espesor relativamente constante, exhiben un echado regional hacia el oriente, con ligeras ondulaciones. La continuidad de este paquete con dicho comportamiento hacia la parte más oriental de la sección es incierta, ya que está oscurecida por el desarrollo de una estructura diapírica de lutita que no permite visualizar con claridad la parte profunda de este sector de la sección.

El límite entre los paquetes no deformado y deformado por extensión, en la parte occidental de la sección, se define a través de un nivel continuo representado por la cima de la unidad Cretácico Superior (KS), el cual constituye el nivel de despegue. Hacia la parte oriental es difícil bosquejar la continuidad de este límite, también debido a la presencia del cuerpo de lutita.

Dentro del paquete deformado resalta la presencia de una serie de fallas normales de diversas magnitudes, varias de las cuales terminan a profundidad, o enraizan, en el nivel

de despegue. Esta arquitectura conforma un estilo estructural de *fallas normales despegadas* (Harding y Lowell, 1979). Aunque también, por otro lado, la ocurrencia en la porción oriental de la sección de la unidad Lutita Móvil con geometría de un cuerpo dapírico de dimensiones importantes, del cual no es clara la definición de su base, sugiere asimismo la presencia de un estilo estructural de *estructuras de lutita* (Harding y Lowell, 1979).

Fallas normales despegadas

Este estilo estructural se caracteriza por presentar fallas principalmente de geometría lítrica, con una orientación predominantemente perpendicular a la dirección de la sección, es decir, de manera general con un rumbo de falla norte-sur, y con una dirección de inclinación principalmente hacia el oriente, sobre todo en las de mayores dimensiones, ya que algunas pocas tienen inclinación al oeste. Dado el predominio de los bloques descendentes en dirección al oriente, hacia la cuenca del depocentro del Golfo de México, el sistema de fallas normales despegadas conforma un sistema de tipo sintético, con la presencia en menor proporción de fallas antitéticas. Es común dentro de este sistema observar que se define la unión de varias fallas de menor magnitud o secundarias, con una de mayor magnitud o maestra, lo que origina una geometría con un patrón de fallas ramificadas. Las relaciones de corte entre unidades estratigráficas y sistemas de falla en distintos sectores de la sección nos ha permitido identificar tres eventos discretos de deformación.

En la parte más occidental de la sección, en la zona del pozo CN1, se observa un grupo de dos fallas normales las cuales se unen hacia abajo en una sola para terminar sobre la superficie de despegue, en la cima de la unidad Cretácico Superior (Figura 6). Éstas fallas están afectando exclusivamente a las unidades Wilcox Paleoceno y Wilcox Eoceno, a las que desplazan sin mostrar variaciones de espesor notables, y se muestran también aparentemente interrumpidas por la discordancia de la base de la Formación Recklaw. Estas relaciones permiten considerar que constituyen fallas de tipo post-depositacional que implicarían una edad de fallamiento de Eoceno Temprano, post-Wilcox Eoceno y pre-Recklaw.

Otro conjunto de fallas normales, el más desarrollado en la sección y ubicado en la zona entre los pozos CN1 y SAS1 (Figura 6), afecta las unidades desde Paleoceno Midway (PM) hasta la Formación Cook Mountain, teniendo como superficie de despegue la cima del Cretácico Superior en la parte poniente de la sección, y probablemente la cima de la unidad Lutita Móvil en la parte oriente. Sin embargo, esta última relación no es muy clara debido a la respuesta sísmica de dicha unidad, que en algunos casos sugeriría la prolongación de las fallas penetrando y disipándose en un nivel dentro de ella. Hacia su porción superior, las fallas de este conjunto se encuentran limitadas por la discordancia

de la base de la unidad de la Formación Yegua.

Algunas de las unidades estratigráficas afectadas muestran aumentos de espesor relacionados al desplazamiento de las fallas, un poco menos evidente hacia la parte occidental de la sección, pero bien marcado en la porción central con las unidades Queen City, Weches y probablemente Cook Mountain, aunque ésta última está erosionada en su cima. Estas características permiten calificar a este grupo de fallas como fallas normales sinsedimentarias o de crecimiento, cuyo periodo de actividad habría sido de la parte media y tardía del Eoceno medio.

Un tercer conjunto de fallas normales se manifiesta en la porción oriental de la sección, en la zona adyacente al pozo PN1, afectando a las unidades estratigráficas relativamente más jóvenes, las formaciones Yegua, Jackson y Vicksburg. La falla de mayor dimensión, que se ubica hacia la base del pozo PN1, marca su superficie de movimiento sobre la unidad Lutita Móvil y también limita lateralmente a esta última. El nivel de despegue de las fallas de este conjunto no es visible dentro de la sección, aunque pudiera ser también la cima de la unidad Cretácico Superior en una posición más profunda hacia el oriente. Sin embargo, como lo sugieren las fallas más orientales que se observan, cuya inclinación disminuye pasando a ser prácticamente horizontales en una posición relativamente más somera (Figura 6), el nivel de despegue en la parte oriental de la sección y hacia el oriente del área bien podría constituirlo un nivel estratigráfico más joven. Las porciones superiores de este conjunto de fallas no se definen con claridad en la sección aunque bien pudieran llegar a aflorar.

Asociados con este conjunto de fallas normales, la unidad Jackson manifiesta incrementos en su espesor que se relacionan con la actividad de las mismas. Esta característica las califica como de carácter sinsedimentario o de crecimiento. Su periodo de actividad está relacionado al tiempo de depósito de esta unidad, es decir, a la parte terminal del Eoceno tardío y podría extenderse posiblemente a parte del Oligoceno temprano.

De una manera general, la deformación con el estilo estructural de *fallas normales despegadas* progresó en su desarrollo en tiempo y en espacio con un sentido hacia el oriente a lo largo de la sección.

Estructuras de lutita

Este estilo estructural se presenta en la porción centro-oriental de la sección, en la zona desde el pozo SAS1, y se caracteriza por la ocurrencia de un cuerpo diapírico de lutita conformado por la unidad Lutita Móvil, el cual en su parte oriental se manifiesta como si fuera un cuerpo individual en el que la geometría diapírica se observa bien desarrollada, a diferencia de su porción occidental, donde dicha geometría no está bien desarrollada, aunque se bosquejan cuando menos tres prominencias con un relieve estructural menos conspicuo que el de la parte oriental (Figura 6).

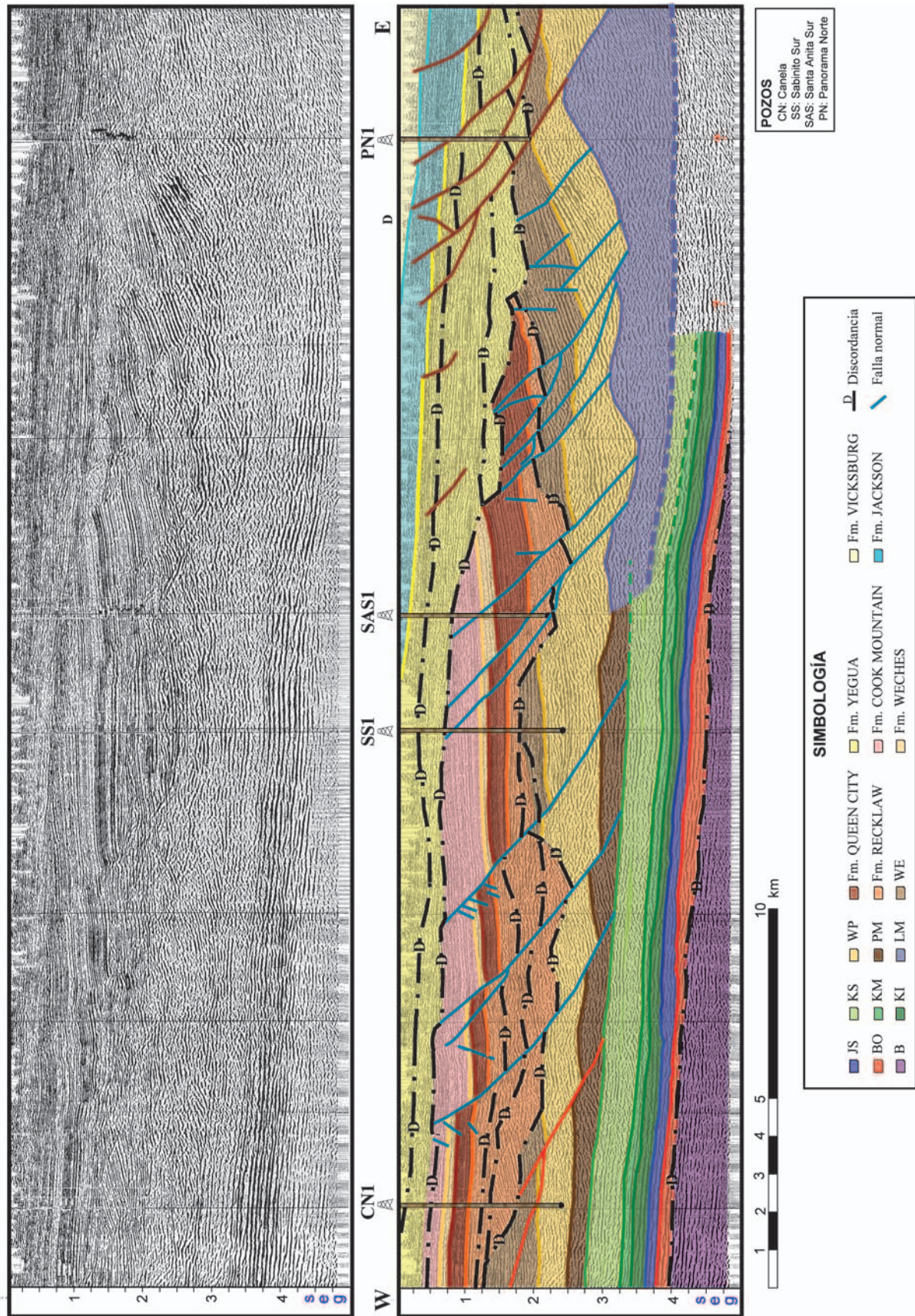


Figura 6. Interpretación geológica-estructural de la sección de estudio del área Arcabuz–Culebra. Los diferentes colores en que se representaran las fallas indican la edad del fallamiento, naranja: Eoceno Temprano; azul: Eoceno Medio; café: Eoceno tardío. Abreviaturas como en Figura 5.

Dada la relación geométrica que guarda la estructura con los estratos suprayacentes, en donde estos últimos exhiben un arqueamiento o rotación que se ajusta a la forma del cuerpo de lutita, el diapiro se define como del tipo almohadilla (Powley, 1999). Aunque, en la parte oriental del mismo parecen manifestarse también rasgos de un diapiro del tipo penetrante, ya que se observan dentro de él relictos de estratificación de la base de la unidad sobreyacente, que habría sido asimilada o canibalizada por la Lutita Móvil.

El análisis de las relaciones entre las unidades estratigráficas en las que se imprime o manifiesta la deformación de *estructuras de lutita* y del cuerpo diapírico mismo, aunque con ciertas complicaciones, permite hacer algunas inferencias acerca de su desarrollo.

Hacia la porción de la sección entre los pozos SAS1 y PN1 se marca el desarrollo de un depocentro, en el cual se llevó a cabo la acumulación, con un espesor proporcionalmente mayor que en el resto de la sección, de las unidades Queen City, Weches y Cook Mountain, relacionado con el funcionamiento de fallas de crecimiento que se extendieron hasta la cima y/o penetraron dentro de la unidad Lutita Móvil. Esto a su vez propició el desarrollo de una carga diferencial sobre esta última unidad y la subsidencia o hundimiento diferencial de porciones localizadas de la misma, de tal manera que sus materiales componentes comenzaron a adquirir movilidad y se alteró la disposición inicialmente tabular que debieron haber tenido como parte de la continuidad lateral de las unidades Cretácico Superior y Paleoceno Midway. Este proceso define una primera *etapa reactiva* de deformación y diapirismo de lutita (*sensu* Morley y Guerin, 1996) en la región, la cual se habría dado entonces durante el Eoceno medio.

Un resultado de lo anterior fue que, hacia la misma porción centro-oriental de la sección, se desarrolló una mayor sobrepresurización de los fluidos de poro presentes dentro de la unidad Lutita Móvil, lo que pudo provocar que la lutita incrementara su comportamiento móvil, de tal manera que un movimiento lateral y ascendente de ésta rotara y levantara la secuencia sedimentaria sobreyacente, canibalizando inclusive partes de la porción más basal de ésta última y dando lugar a la conformación de la estructura de diapiro hacia la porción oriental del área. Este proceso define una *etapa activa* de deformación de lutita (*sensu* Morley y Guerin, 1996) en la zona, la cual habría acaecido durante la parte tardía del Eoceno medio. La separación temporal de estas dos etapas de diapirismo en lutita es difícil de establecer por la ausencia de horizontes sedimentarios sindiapíricos en contacto directo con los diapiros.

Hacia la porción más oriental de la sección, en la zona del pozo PN1, se marca otro desarrollo de carga diferencial sobre la unidad Lutita Móvil, producido por la acumulación localizada de un espesor relativamente mayor de sedimentos de las unidades Jackson y posiblemente Vicksburg que en la zona inmediatamente adyacente al oeste (Figura 6). Esto dio lugar a la subsidencia o hundimiento diferencial de esa

porción de la unidad Lutita y al desarrollo de un depocentro, el cual aparentemente debió tener un mayor desarrollo hacia el oriente del área de la sección. Este proceso describe una nueva *etapa reactiva* de diapirismo de lutita en la región, la cual habría ocurrido durante el Eoceno tardío–Oligoceno temprano.

De manera general, también se puede calificar que la deformación con el estilo de *estructuras de lutita* progresó en su desarrollo en tiempo y en espacio con un sentido hacia el oriente en el área de la sección.

CONCLUSIONES

El área de Arcabuz–Culebra se encuentra afectada por dos estilos estructurales de deformación extensional; uno de *fallas normales despegadas* y otro de *estructuras de lutita*. Las relaciones temporales y espaciales entre ambos es aparente a partir de un análisis detallado de los aspectos tanto estructurales como estratigráficos. Con base en éstos concluimos que los dos estilos de deformación pueden estar ligados e inclusive ser complementarios.

El funcionamiento de las fallas normales sindeposicionales de la segunda etapa de fallamiento está asociado en tiempo y espacio con el desarrollo del depocentro relacionado con las etapas reactiva y activa de diapirismo de lutita. El depósito con un espesor incrementado de las unidades Queen City, Weches y Cook Mountain en esa zona es una respuesta y un detonador, respectivamente, de dichos procesos de deformación durante el Eoceno medio.

Las fallas normales de crecimiento de la tercera etapa de fallamiento en la porción más oriental del área de la sección, están vinculadas al depocentro originado por la etapa reactiva de diapirismo de lutita del Eoceno tardío–Oligoceno temprano, en donde el resultado fue el depósito de las unidades Jackson y Vicksburg.

Como se ha podido ver, la evolución de la deformación distensiva despegada del área de estudio, no se puede conceptualizar como un evento individual o aislado dentro de la cubierta sedimentaria. Su desarrollo está estrechamente vinculado a la historia sedimentaria, de tal manera que es necesario considerar las estructuras resultantes como verdaderos sistemas estructurales sindeposicionales.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó en el marco del trabajo doctoral del primer autor, quien agradece las facilidades proporcionadas por el Área de Geociencias del Instituto Mexicano del Petróleo. La información sísmica y de pozos fue proporcionada por personal de Petróleos Mexicanos en el Activo de PEP Reynosa. El presente trabajo también se vio beneficiado por los atinados comentarios, tanto de estilo como de contenido, de Susana Alaniz Álvarez, Javier Arellano Gil y Ángel Nieto Samaniego.

REFERENCIAS

- Bally, A.W. (ed.), 1983, Seismic expression of structural styles - a picture and work atlas: American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, 15, 2, 1-20.
- Carrasco, V.B., 1966, Bioestratigrafía del Mioceno en el área de Matamoros, Tamaulipas y su aplicación a la reinterpretación de los datos geofísicos locales: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, XVIII (1 y 2), 13-39.
- Echánove, E.O., 1976, Geología del Paleoceno-Eoceno, Cuenca de Burgos (resumen), *en* Memoria del III Simposium de Geología de Subsuelo, Zona Noreste, Reynosa, Tamaulipas: Reynosa, Tamaulipas, Petróleos Mexicanos (PEMEX), 254-271.
- Echánove, E.O., 1986, Geología petrolera de la Cuenca de Burgos. Parte I. Consideraciones Geológico-petroleras: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, XXXVIII (1), 3-39.
- Ewing, T.E., 1991, The Gulf of Mexico, structural framework, *in* Bally, A.W., Palmer, A.R. (eds.), The Geology of North America - an overview: Boulder, Colorado, Geological Society of America, The Geology of North America, v. J, 31-52.
- Foster, N.H., Beaumont, E.A. (eds.), 1989, Structural concepts and techniques II. Basement-involved deformation: American Association of Petroleum Geologists. Treatise of Petroleum Geology, Reprints Series No. 10, 457 p.
- González, G.R., 1976, Bosquejo geológico de la zona noreste (resumen), *en* Memoria del III Simposium de Geología de Subsuelo, Zona Noreste, Reynosa, Tamaulipas: Reynosa, Tamaulipas, Petróleos Mexicanos (PEMEX), 5-30.
- González, G.R. y Holguín, Q.N., 1992, Las Rocas generadoras de México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, XLII (1), 9-23.
- Guzmán, E.J., 1956, Bosquejo geológico de las Regiones Noreste, Este y de la Meseta Central de México, *en* XX Congreso Geológico Internacional, Excursiones A-14 y C-6, Estratigrafía del Cenozoico y del Mesozoico a lo largo de la Carretera entre Reynosa, Tamaulipas y México, D. F.: México, Universidad Nacional Autónoma de México, 11-36.
- Haq, B.U., Handerbol, J., Vail, P.R., 1987, Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic: Science, 235, 1156-1167.
- Harding, T.P., Lowell, J.D., 1979, Structural styles, their plate-tectonic habitats, and hydrocarbon traps in petroleum provinces: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 63 (7), 1016-1058.
- Harris, B.A., 1952, Ejemplos de afallamientos en el Distrito Noreste de México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, IV (7 y 8), 297-302.
- Lowell, J.D., 1985, Structural styles in petroleum exploration: Tulsa, Oklahoma, E.U.A., Oil and Gas Consultants International Inc., 460 p.
- Mandl, G., 1988, Mechanics of Tectonic Faulting, Models and Basic Concepts: Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 407 p.
- Morley, C.K., Guerin, G., 1996, Comparison of gravity-driven deformation styles and behavior associated with mobile shales and salt: Tectonics, 15 (6), 1154-1170.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX), 1998, Informe final del estudio del potencial remanente de la Cuenca de Burgos: Petróleos Mexicanos, reporte interno.eos Mexicanos, reporte interno (inédito).
- Pérez-Cruz, G.A., 1992, Geologic Evolution of the Burgos Basin, Northeastern Mexico: Houston, Texas, Rice University, tesis doctoral, 155 p.
- Powley, D.E., 1999, Shale Domes (publicación en línea): American Association of Petroleum Geologists, Search and Discovery, Article #60001 <http://www.searchanddiscovery.net/documents/Shale/shale.htm>. Fecha de consulta: 13 de Junio, 2004.
- Rodríguez, L.D.E., 1976, Bioestratigrafía de la Franja Paleoceno-Eoceno de la Cuenca de Burgos (resumen), *en* Memoria del III Simposium de Geología de Subsuelo, Zona Noreste, Reynosa, Tamaulipas: Reynosa, Tamaulipas, Petróleos Mexicanos (PEMEX), 241-253.
- Rodríguez, S.E., 1969, Sedimentos del Oligoceno de la Cuenca de Burgos; aspecto regional, *en* Memoria del Seminario sobre Exploración Petrolera, Mesa Redonda No. 1, Problemas de Exploración de la Cuenca de Burgos: México, D.F., Instituto Mexicano del Petróleo, MR1(2).
- Yzaguirre, S.L.A., 1969, Geología Regional de la Cuenca de Burgos, *en* Memoria del Seminario sobre Exploración Petrolera, Mesa Redonda No. 1, Problemas de Exploración de la Cuenca de Burgos: México, D.F., Instituto Mexicano del Petróleo, MR1(1).

Manuscrito recibido: Junio 26, 2003

Manuscrito corregido recibido: Septiembre 20, 2003

Manuscrito aceptado: Octubre 4, 2003