

## “Tectónica salina”, actividad e influencia en las secuencias depositadas durante el Mesozoico

*Rodrigo Portillo Pineda*  
*Luis Lauro Villanueva Gonzalez*  
*Verónica Alicia Muñoz Bocanegra*  
*Rolando Heberto Peterson Rodríguez*  
*Pemex Exploración y Producción*

Información del artículo: recibido en 2022-revisado-evaluado-corrigido y aceptado en marzo 2023

### Resumen

En la provincia geológica Cinturón Plegado Akal se observaron evidencias estratigráficas de erosiones, ausencias y acuñaamientos de secuencias depositadas durante el Mesozoico. Por medio de una sección restaurada se observó la relación estrecha entre la dinámica de la tectónica salina y la progradación de las secuencias Jurásicas sobre los cuerpos de sal, que constituían altos estructurales preexistentes. Así mismo se observa (de acuerdo a los estadios restaurados), que al momento del depósito muchas de las secuencias se depositaron parcialmente o no se depositaron sobre algunos flancos de diapiros. Lo anterior confirma la hipótesis que la actividad alokinética de los cuerpos de sal preexistentes, controlaron el depósito de las secuencias Jurásicas y probablemente las secuencias del cretácicas parcialmente.

Adicionalmente a los resultados de la restauración, fue posible observar los efectos de la deformación (pulsos de acortamiento regional evento del Paleógeno y Neógeno), cuyas evidencias principales se manifiestan en colapsos de diapiros, emplazamiento de sal alóctona y basculamiento de flancos, evidenciando que algunos bajos estructurales actuales, fueron altos al momento del depósito.

**Palabras clave:** Tectónica salina, Mesozoico, Cinturón Plegado Akal, secuencias Jurásicas, evidencias estratigráficas, erosiones.

## “Salt tectonics”, activity and influence on the Mesozoic sequences

### Abstract

In the Akal Fold Belt geological province, evidence of erosions, gaps and wedging of sequences deposited during the Mesozoic were observed and interpreted. By means of a restored section it was possible to observe the dynamic relationship of the salt tectonics and the Jurassic sedimentary deposits on the salt bodies, which constituted pre-existing structural highs.

Likewise, it was observed (according to the restored stages) that at the time of deposit many of the sequences were partially deposited or there was no deposit on the flanks of the active diapirs. This confirms the hypothesis that the allokinetic activity of the pre-existing salt bodies controlled the deposition of the Jurassic sequences and probably partially the Cretaceous sequences.

Additionally, it was also possible to observe the effects of deformation, caused by regional events (Palaeogene and Neogene events), whose main evidence is manifested in diapir collapses, emplacement of allochthonous salt and tilting of flanks, showing that some current structural lows, were previously high at the time of deposit.

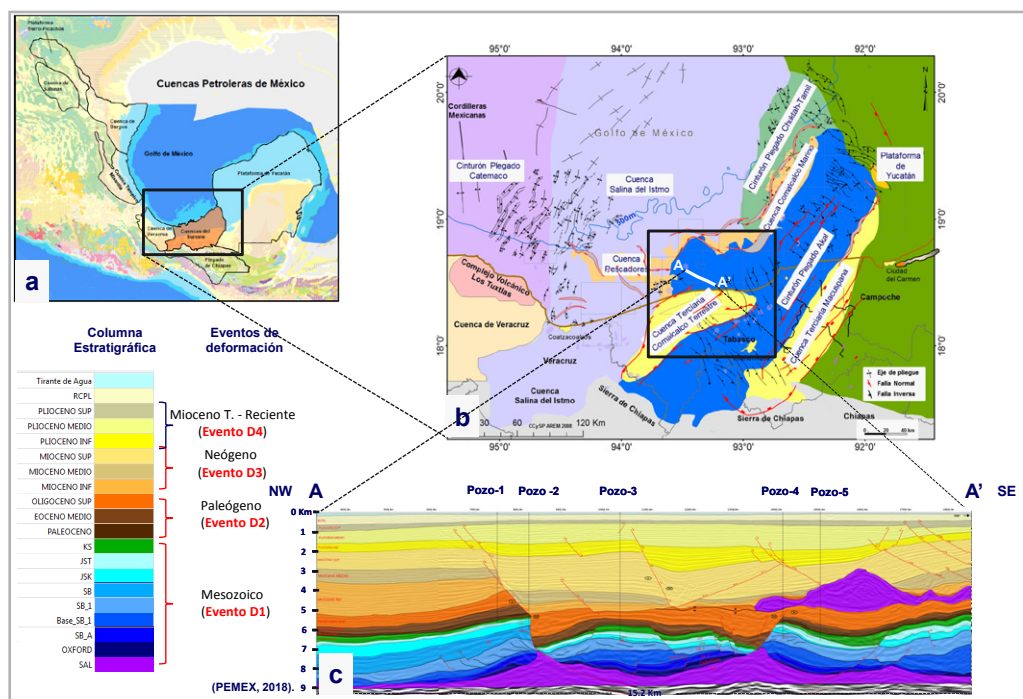
**Keywords:** Salt tectonics, Mesozoic, Akal Fold Belt, Jurassic sequences, stratigraphic evidence, erosions.

## Introducción

De acuerdo con la clasificación de cuencas petroleras, la zona de estudio está ubicada dentro del área comprendida como Cuencas del Sureste, **Figura 1.a**. Esta porción incluye actualmente áreas marinas del Golfo de México, así como de varios sectores terrestres zonificados en diferentes provincias y/o dominios, **Figura 1.b**.

La línea sísmica A-A' interpretada en este trabajo se ubica dentro del sector Cinturón Plegado Akal, el cual se caracteriza por presentar diversas estructuras plegadas en la dirección preferencial NE-SW y dando como resultado numerosos ejes de pliegue con dirección NW-SE perpendiculares al vector de acortamiento tectónico, **Figura 1.b**.

La selección de la sección restaurada tuvo como objetivo principal, entender la evolución tectónica-sedimentaria del Jurásico Superior, considerando que el régimen tectónico durante ese periodo fue de tipo extensional y estuvo asociado a la apertura del Golfo de México. De esta manera se contaba con una cuenca salina extensional donde predominaban ambientes sedimentarios de rampa asociados a una rampa-estructurada (Brun y Ford 2011; Flügel, 2006; Portillo-Pineda *et al.* 2017; Wright y Bruchette, 1998). Por lo tanto, la línea sísmica A-A' en dirección NW-SE representa la dirección de extensión gravitacional activa durante el Jurásico superior, **Figura 1.b-c**.

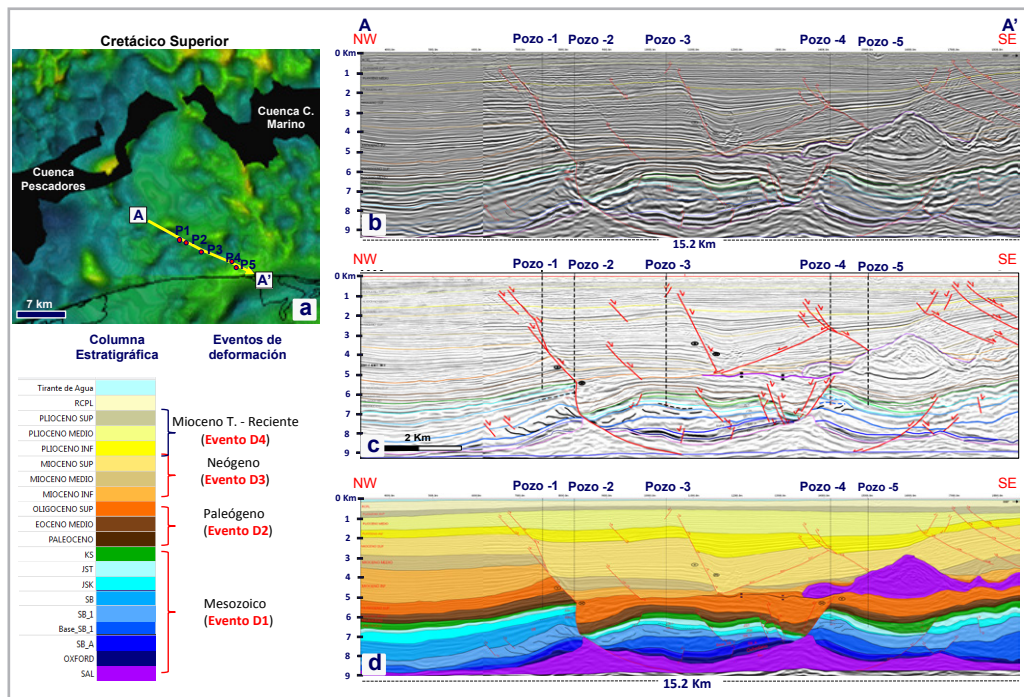


## Sección restaurada (A-A') en la dirección de estructuración durante el Jurásico Superior, (NE-SW)

La sección interpretada, tiene una longitud de 15.2 km y alcanza una profundidad de 9 km. La interpretación sísmica se realizó en profundidad PSDM, **Figura 2.b**. La correlación se realizó a partir de cinco pozos, de los cuales se interpretaron: secuencias del Cuaternario (1), Neógeno (6), Paleógeno (3) y del Mesozoico (9), ver **Figura 2.a-b**.

Normalmente para la restauración de una sección se requiere de alrededor de 13 secuencias, en esta restauración

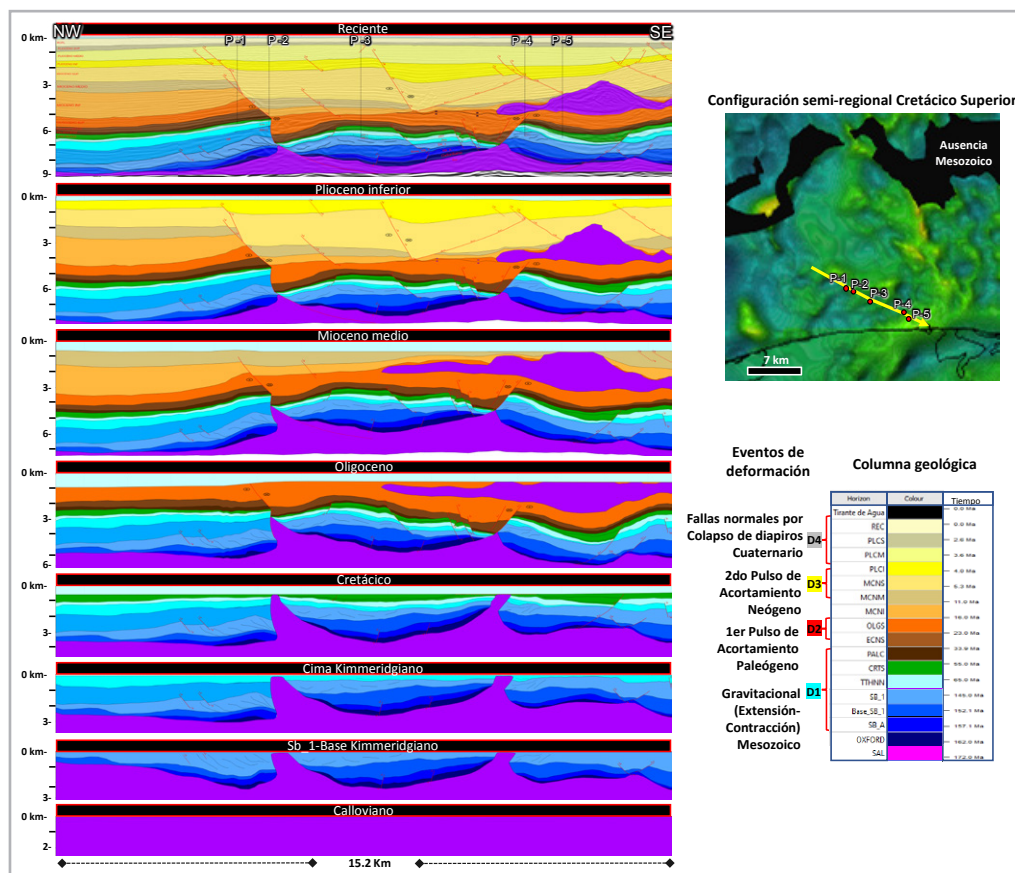
se trabajó con 19, ya que se integraron límites de secuencias establecidos a partir del análisis de facies sísmicas, para las secuencias del Jurásico Superior con el objetivo de diferenciar las facies carbonatadas de las siliciclásticas, lo cual implicó un mayor detalle y control de las facies sin-sedimentarias respecto a la dinámica de los cuerpos de sal activos. Por ejemplo: la secuencia denominada SB\_1 (correlacionable con las facies tempranas del Kimmeridgiano (cabe señalar que ningún pozo ha cortado aún esta secuencia), se asoció con clinoforras y/o sigmoides correspondientes a depósitos del tipo complejo de bancos, **Figura 1.c**.



**Figura 2.** Sección restaurada A-A'; a) Dirección en planta de la sección teniendo como base la cima del Cretácico superior; b) Interpretación de la sección en paleta de grises; c) Interpretación en paleta blanco y negro para resaltar los rasgos sismo-estratigráficos; d) Resultado final de la interpretación con polígonos, (Pemex 2017).

El estilo estructural que presenta actualmente esta sección es el resultado de varias etapas de deformación. En primera instancia se observan en el Mesozoico diferencias en el espesor de sus distintas unidades estratigráficas. Algunas de ellas muestran cambios laterales de delgados a gruesos, indicando la asociación de los primeros con diapiros activos de sal, que actualmente están colapsados. Otro

rasgo observado es, en el Paleógeno existen depocentros rellenados por la secuencia del Oligoceno, caracterizados por incrementos de espesor en estas zonas asociadas con los diapiros colapsados, además se interpreta el emplazamiento de un cuerpo de sal alóctona sobre esta secuencia, indicador sin-cinemático típico del evento del Paleógeno (D2) presente en la cuenca, **Figura 3**.



**Figura 3.** Sección restaurada: ED1- Mesozoico/CRTL. Diapirismo activo y formación de cuencas primarias; ED2- Paleógeno/OGNL. Colapso de diapiros; Plegamiento; Emplazamiento de sal (fuera de línea) y expansión de la secuencia de Oligoceno; ED3-Neógeno/PLCI. Máximo acortamiento regional (perpendicular a esta sección). Se observan expansiones de los depósitos sin-cinemáticos (Mioceno superior y Plioceno inferior); ED4- Cuaternario. Etapa actual, con procesos de evacuación y colapso de diapiros por sobrecarga sedimentaria. Generando extensión, fallas normales y basculamiento de secuencias.

La evidencia del pulso de acortamiento tectónico del evento Chiapaneco (D3), se ve reflejado en el paquete del Mioceno superior, ya que presenta variación en su espesor a lo largo de la sección, indicando que el depósito fue contemporáneo a la estructuración, **Figura 3.**

Por último, se observa un patrón de fallas normales que cortan a las secuencias más recientes, las cuales están relacionadas al evento D4, ver tabla de eventos, **Figura 2.b** y **Figura 3.**

### Modelo conceptual estructural

De acuerdo con la integración regional plasmada en el mapa de provincias estructurales, **Figura 1.b**, la porción conocida

como Cinturón Plegado Akal actualmente se caracteriza por presentar dominios estructurales de pliegues alargados en la dirección NW-SE, esta deformación afecta hasta las secuencias del Mioceno superior y en algunas porciones al Plioceno inferior (Cruz-Mercado *et al.*, 2011). Sin embargo, al observar secciones perpendiculares a esta deformación a lo largo de todo el Cinturón Plegado, se vislumbra una deformación más antigua y generada a partir de un régimen extensional, caracterizada por la formación de *rollers*, almohadas y en algunos casos diapiros (Sánchez-Rivera *et al.*, 2011).

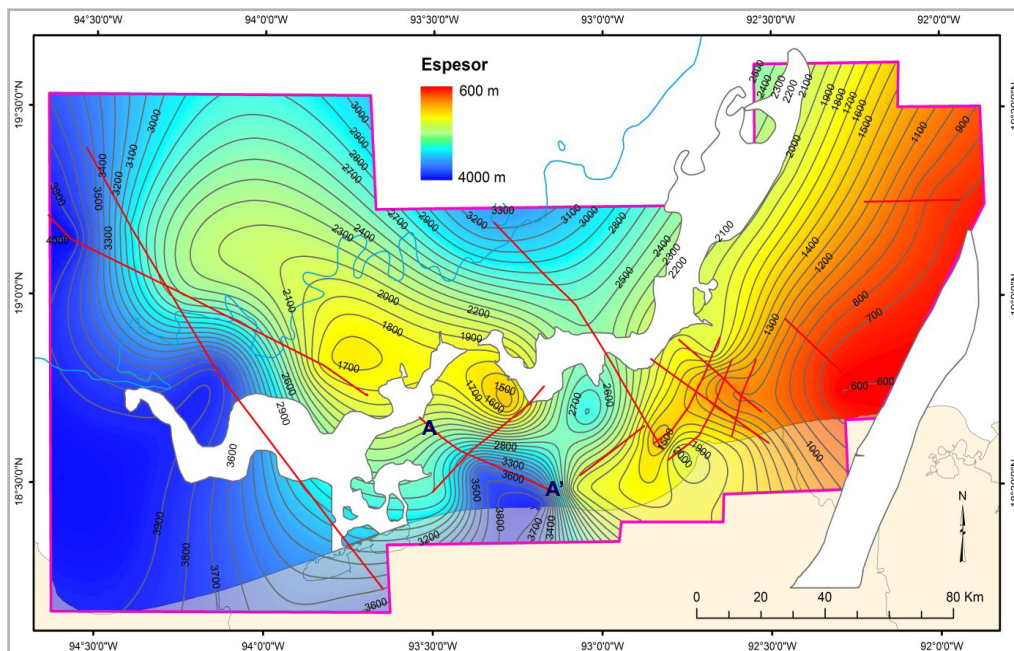
El área de estudio donde se trazó la sección A-A' indica que, en esta porción de la cuenca, originalmente existió un mayor espesor de sal autóctona, de acuerdo con el arreglo estructural actual (diapiros colapsados), y con los resultados



obtenidos de la restauración. De esta manera se plantea la hipótesis que a lo largo de todo el Cinturón Plegado Akal existieron variaciones en los espesores iniciales de sal, mismos que condicionaron los estilos estructurales posteriores (eventos de deformación D1, D2 y D3).

Para demostrar la diferenciación de espesores, se realizó el ejercicio de integrar los productos finales de 13 secciones restauradas, para ello se tomaron los datos de los espesores de la capa salina restaurada para el estadio del Calloviano en tres diferentes puntos a lo largo de cada sección. Dando

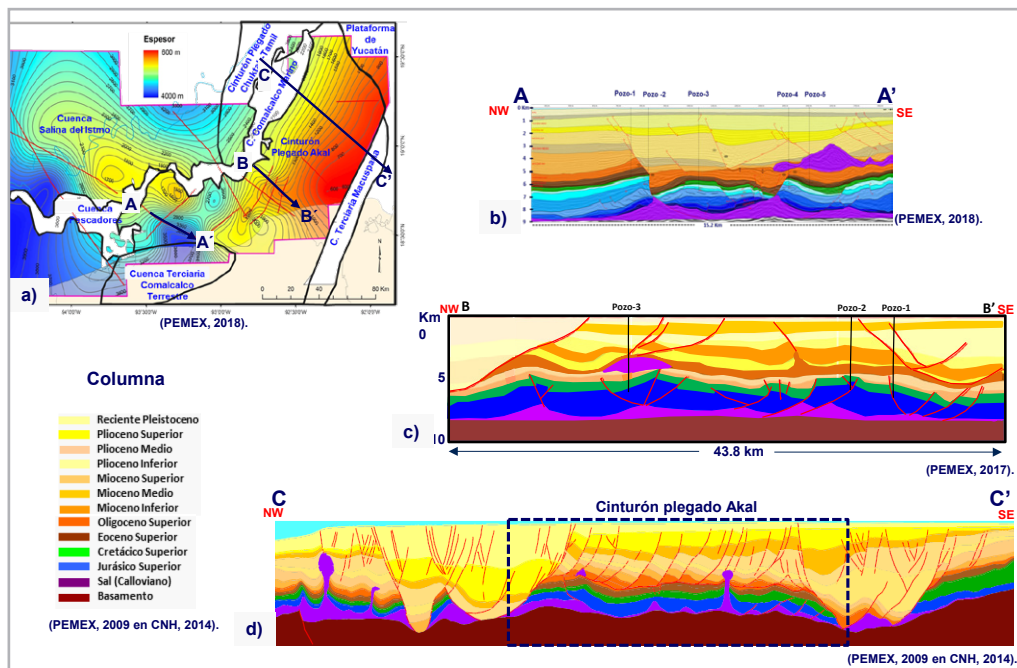
como resultado una configuración regional de espesores iniciales de sal autóctona que refleja el final del depósito salino, en la **Figura 4** la Configuración regional de espesores iniciales de sal autóctona para el Calloviano. Las líneas rojas representan las trazas de secciones restauradas donde se obtuvieron los datos de espesores. De acuerdo con la configuración resultante se observa que los espesores varían desde 600 m (donde inicialmente fue más delgada) hasta 4000 m para las zonas más profundas de la cuenca. Cabe mencionar que, para la zona de estudio, la línea A-A' tienen un espesor inicial de 3600 m.



**Figura 4.** Configuración regional de espesores iniciales de sal autóctona para el Calloviano.

Poniendo en contexto el concepto anterior y haciendo uso de tres secciones interpretadas (A-A', B-B' y C-C' **Figura 5**, a) Sección A-A' implica un estilo por tectónica salina con diapiros actualmente colapsados; b) Sección B-B' línea donde se observan almohadas de sal y bloques basculados re-deformados y c) Sección nororiental del Cinturón plegado donde se observan bloques rotados y un diapiro activo), se demuestra que para las zonas donde inicialmente se depositó un espesor delgado de sal ( 600 m) predominan estilos estructurales de bloques rotados y *rollers* de sal.

Para las zonas donde el espesor inicial fue moderado (~1300 m) el estilo resultante, son almohadas de sal y bloques basculados, **Figura 5.c**. Mientras que para las zonas del Cinturón Plegado donde el espesor inicial de sal fue muy potente ( 3600 m) predominaron estilos estructurales de diapiros de sal. Relacionado a esta condicionante se justifica, que esta última zona sea el área donde actualmente más volumen de sal emplazada hay dentro del todo el Cinturón Plegado de Akal, **Figura 5.a**.



**Figura 5.** Ejemplo de los diferentes estilos estructurales por extensión a lo largo del Cinturón Plegado Akal, generados durante el Jurásico Superior.

### Influencia del diapirismo en la formación de complejos de bancos, durante el Jurásico Superior (Evento D1)

A partir del trabajo de restauración, se hizo un análisis comparativo de los estadios restaurados del Kimmeridgiano, con respecto a una sección de correlación estratigráfica, que tenía como objetivo observar la influencia de los diapiros activos y su relación con las secuencias sedimentarias alrededor de ellos, así como explicar el gran desarrollo de espesor de estas secuencias, confinado a las mini cuencas primarias. La sección estratigráfica se correlaciona entre los pozos: 2, 3 y 4 y todos reportaron facies marino someras carbonatadas, correspondientes a complejos de bancos, constituidos por peloides, y ooides, con gran cantidad de re-depósitos de facies más someras, **Figura 6, a**. Mapa de localización de la línea restaurada sobre la cima del Kimmeridgiano; b) sección restaurada durante el JSK; c) sección de correlación estratigráfica; d) restauración del estadio restaurado para la secuencia SB\_1.).

Desde el punto de vista de microfacies sedimentarias, el Kimmeridgiano fue dividido en 3 niveles (JSK-1, 2 y 3), para el pozo 4 el complejo de bancos se encuentra dentro de la subdivisión del JSK-3. Mientras que para el pozo 3 los bancos se encuentran dentro del subnivel JSK-2 y para el pozo 2 los bancos están dentro del paquete JSK-1. Este arreglo estratigráfico se interpreta como una “progradación de las facies”, en función del movimiento temprano de la sal que condicionó el depósito de las mismas.

Al comparar la sección de correlación estratigráfica con la sección restaurada en el estadio del Kimmeridgiano, se observa que todos los pozos están asociados a tres distintas cuencas secundarias separadas por los diapiros activos. Además, se observa que el pozo 2 corta las facies JSK y el límite de secuencia SB (Presente solo en este extremo de la sección), mientras que los pozos 3 y 4 cortan las facies.

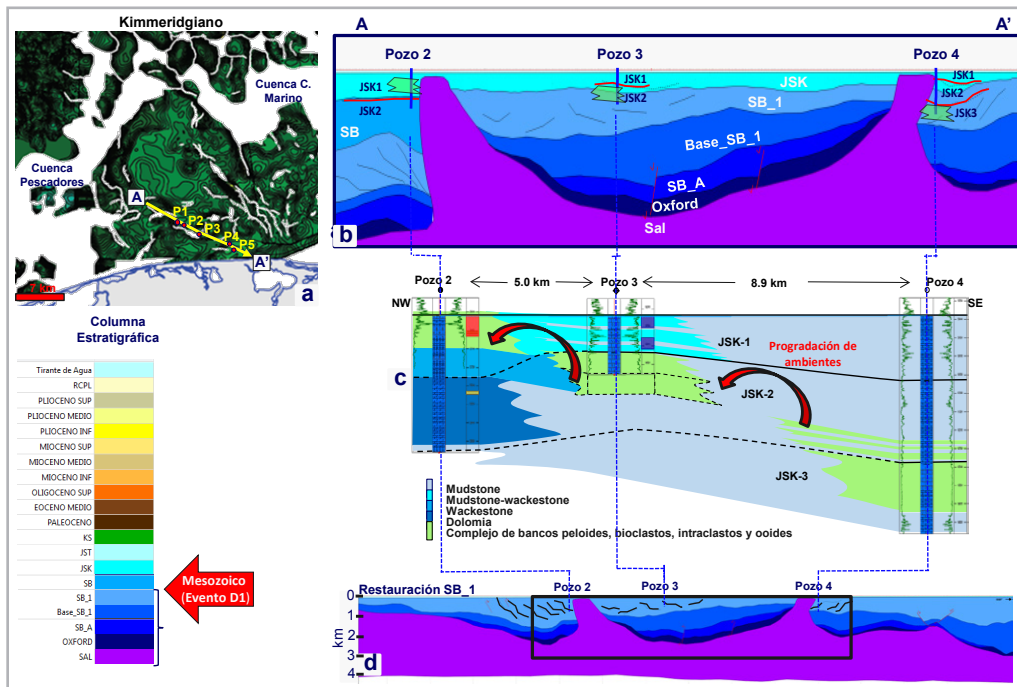


Figura 6. Relación de los estadios restaurados para el Kimmeridgiano con respecto a la sección de correlación estratigráfica.

JSK, SB\_1, Figura 6.b. Si posteriormente se compara el estadio restaurado de la secuencia SB\_1 (intervalo donde se interpretaron patrones sigmoidales, asociados con facies de complejos de bancos), se observa que tanto los bancos que reportaron los pozos: 3 y 4 se encuentran dentro de esta secuencia y por lo tanto, se considera que durante el depósito de esta secuencia, predominaron ambientes muy someros en toda la cuenca. De esta manera se interpreta, si el pozo 2 se profundizara es muy posible que corte la secuencia SB\_1 y por consiguiente encuentre complejos de bancos, Figura 6.b.

### Influencia del diapirismo durante el depósito de las secuencias del Cretácico, (Evento D1)

Para el análisis del Cretácico, se utilizaron los pozos 2, 3, 4 y 5, los cuales fueron calibrados estratigráficamente con datos de pozo, Figura 7.c. La correlación estratigráfica fue del pozo 3 con el pozo 2 (separados 5 km entre ellos), destacando que en el pozo 2 se encuentran presentes todas las subdivisiones temporales del Cretácico, mientras que en el pozo 1 hay ausencias parciales y totales de algunas secuencias: Campaniano, Coniaciano y Cenomaniano.

Esto indica que las secuencias ausentes en el pozo 1, no se depositaron y/o están acunadas entre ambos pozos, Figura 7. Se muestran las correlaciones de los pozos que cortaron el Cretácico (b), resaltando que los pozos asociados a las zonas de cuenca (zonas más bajas) es donde se reportan la presencia de la mayoría de los pisos, mientras que para los pozos relacionados con los flancos del diapiro es donde los pozos reportan más ausencias y erosiones (b-c).

La segunda figura es una tabla estratigráfica de los pozos 4 y 5 enfocada al Cretácico y sus divisiones, en ella destacan las zonas de ausencia y presencia, indicando que en ésta se registraron cambios y/o variaciones en el ambiente de depósito, así mismo se generaron condiciones de erosión evidenciadas por discordancias, Figura 7.c.

Al integrar y relacionar los datos estratigráficos a la sección restaurada, para el estadio del Cretácico se observa que los pozos 5 y 3 (pozos que cortaron todos los pisos), corresponden a un ambiente de cuenca, mientras que los pozos donde se reportan ausencias de pisos (2 y 4), se relacionan con diapiros activos, es decir, estas zonas fueron altos estructurales, susceptibles a la erosión, ver Figura 7.d.

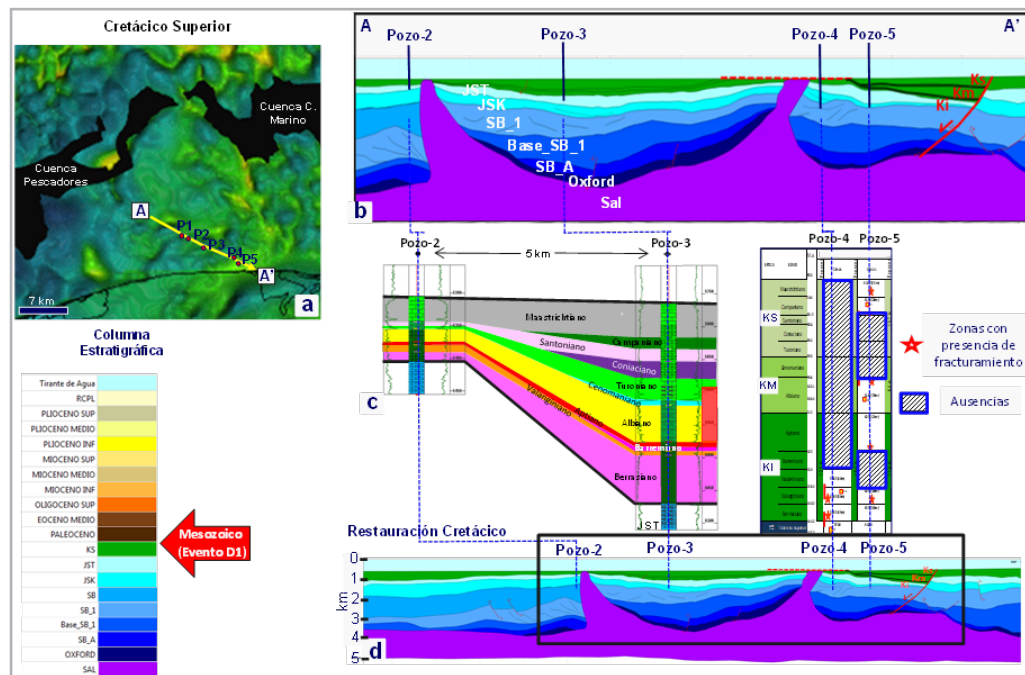


Figura 7. Restauración del Cretácico.

Por último, en la **Figura 7.b**, se presenta un acercamiento de la zona de los diapiros activos, donde se observa que en el extremo derecho de la sección el Cretácico se encuentra acuñado, mientras el extremo más grueso de la cuña se relaciona con la activación de una falla normal, el extremo delgado se relaciona con la pared del diapiro. Dentro de esta cuña es visible que una porción del Cretácico inferior se depositó en ambos flancos del diapiro, a excepción de la cresta, esto se interpreta como una discordancia de tipo erosional, destacada por una línea punteada de color rojo, **Figura 7.b**. También se observa que el Cretácico medio (término usado solo en Pemex), se acuña hacia el flanco del diapiro (de acuerdo con el pozo 5), lo mismo sucede para el Cretácico superior (Ks). Estos rasgos estratigráficos se interpretan como la relación directa entre el crecimiento paulatino del cuerpo salino con los depósitos sin-sedimentarios.

### Efectos del evento de acortamiento regional durante el Paleógeno (D2)

De acuerdo a la restauración realizada, el Eoceno marca el límite activo de los diapiros, ya que todo el Paleoceno se encuentra acuñado y erosionado hacia los altos estructurales, mientras que el Eoceno colmata todas las cuencas preexistentes, **Figura 8. a**), mapa de localización, b)

línea sísmica actual, c) línea perpendicular en la dirección del acortamiento tectónico, d) restauración del Oligoceno (después del pulso de contracción) y e) estadio previo a la deformación). Posteriormente durante el Oligoceno se activó un cambio en el régimen de esfuerzos regionales, plegando y acortando a las secuencias previamente depositadas con un vector preferencial NW-SE, conocido comúnmente como el evento del Paleógeno (D2).

Los efectos generados a partir de la incidencia del evento D2, sobre las secuencias previamente depositadas son muy relevantes, puesto que en este tiempo es cuando los diapiros colapsan y las cuencas son plegadas, invirtiendo de esta manera la posición de los altos y bajos estructurales, **Figura 8.d**. A su vez, este evento tectónico también provoca mucha movilidad de sal, generando nucleaciones de sal en estructuras plegadas, cierre de alimentadores de diapiros, colapso de estructuras, adelgazamiento y emplazamiento de sal sobre la secuencia del Oligoceno, **Figura 8.c-d**.

Otra característica, a destacar dentro del mismo proceso de colapso de diapiros, es aquel donde los flancos se bascularon formando nuevos depocentros, que al mismo tiempo generaron espacio de acomodo para la secuencia del Oligoceno (capa sin-sedimentaria a la deformación del evento D2), resultando así que esta secuencia presente diferencias en su espesor durante su depósito, **Figura 8.d**.



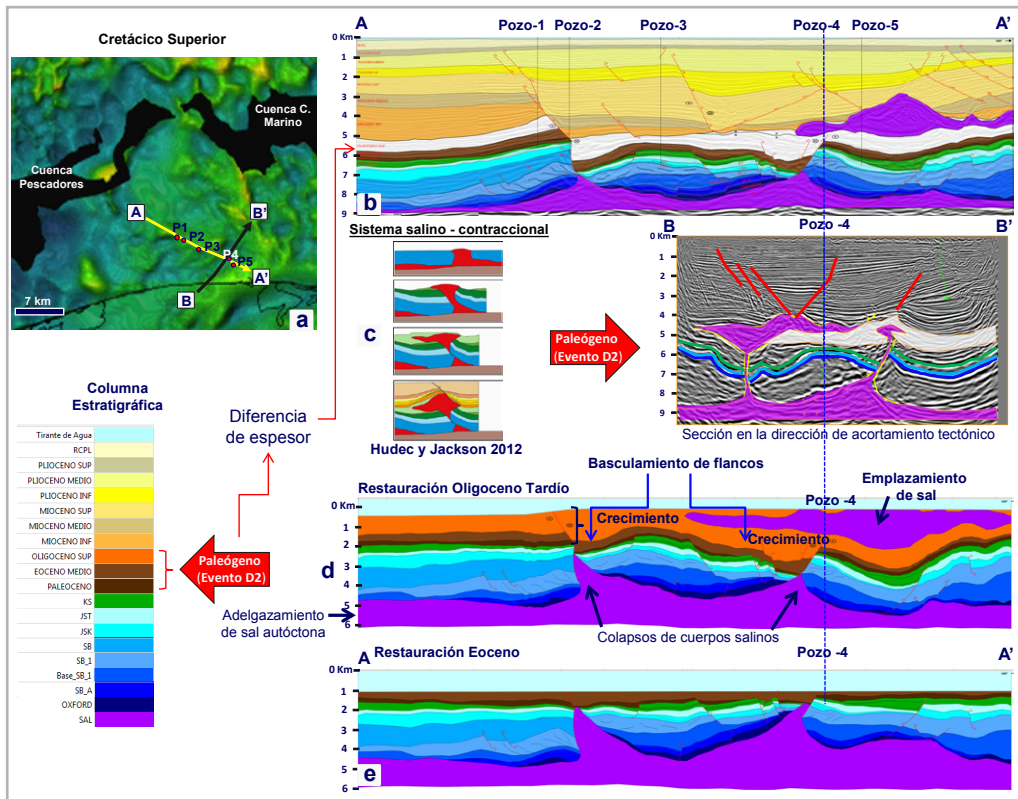


Figura 8. Evolución de la sección restaurada, del Eoceno al Oligoceno tardío, edad del evento de deformación regional (D2).

### Efectos del evento de acortamiento regional durante del Neógeno (D3)

Después del emplazamiento de sal alóctona y del depósito del Mioceno medio, se registra un segundo pulso de acortamiento durante el Mioceno superior, que de acuerdo con las relaciones estratigráficas observadas en línea interpretada y a los estudios regionales, esta deformación se le denomina: evento Chiapaneco **D3** (Cruz-Mercado et al., 2011; Sánchez-Rivera et al., 2011).

Los efectos del evento D3, en la dirección de línea interpretada, se ven reflejados principalmente por el

crecimiento en el espesor de la secuencia del Mioceno medio asociado a fallas normales. También en la evacuación de sal alóctona y formación de soldaduras horizontales (en el Oligoceno), así como en el colapso progresivo de los diapiros asociados a la movilidad de sal autóctona. Las fallas normales que cortan el Mesozoico relacionadas a los colapsos, se conectan con las nuevas fallas normales que cortan el Cenozoico y forman a su vez una zona de acomodo lateral, **Figura 9**. a) mapa de localización y dirección de la línea restaurada; b) Sección actual interpretada; c) Restauración del Mioceno Tardío y d) Estadio previo a la deformación).

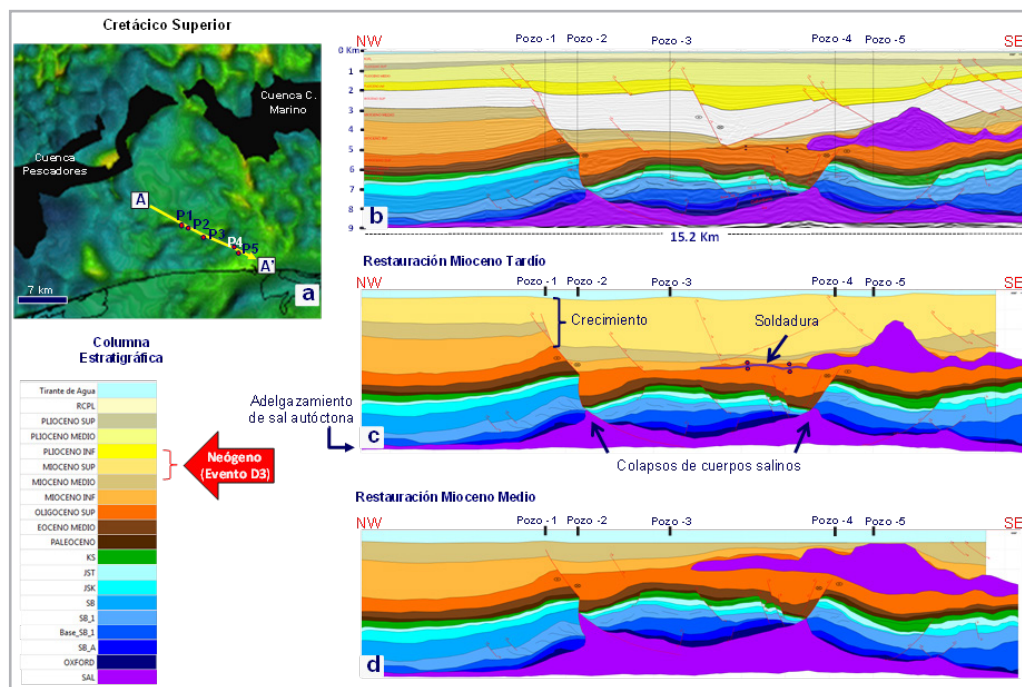


Figura 9. Evolución de la línea restaurada del Mioceno Medio al Mioceno tardío, edad del evento de deformación regional (D3).

Posteriormente, durante todo el Cuaternario, se observan expansiones de los espesores depositados (principalmente en el Plioceno medio) asociados a fallas normales con despegue en el Oligoceno y generadas por la influencia y efecto del evento regional de extensión D4, cuyo rango de edad oscila entre el Plioceno inferior hasta la actualidad, Figura 9.b-c.

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se sustenta la hipótesis planteada en varios estudios regionales previos: los procesos de tectónica salina controlaron la sedimentación e influyeron localmente en la determinación de los ambientes de depósito; de esta manera se demuestra que la actividad temprana de sal durante el Mesozoico (proceso de *down building*) influye directamente en el depósito, condicionando la presencia, ausencia, acuñaamientos y erosiones de las secuencias sin-sedimentarias.

De acuerdo al análisis y resultados de este trabajo, al integrar las observaciones estructurales y estratigráficas, sale a relucir que es posible tener un potencial económico por lo menos referente a la calidad de roca almacén en

secuencias del Kimmeridgiano inferior en esta porción del Cinturón Plegado Akal, ya que algunos pozos llegaron a cortar secuencias de alta energía (bancos oolíticos) y otros muy cercanos se quedaron “cortos” muy probablemente de haber profundizado más hubieran cortado esas mismas secuencias y espesores.

## Agradecimientos

A Pemex Exploración, y específicamente al grupo de estudios regionales por dejar ser parte del grupo de trabajo y afrontar un nuevo reto técnico.

A Rolando Peterson, por su apoyo técnico, moral y enseñanza impartida durante todo el tiempo que llevo en la institución, así como el tiempo que duró el estudio.

A Luis Lauro Villanueva González y Verónica Alicia Muñoz Bocanegra, por su colaboración en el estudio estratigráfico y análisis de facies, complemento para este trabajo.

A mis compañeros de estudios regionales de todas las disciplinas, ya que cada uno aporta la parte que le corresponde para que el entendimiento de la cuenca cada vez prospere más.

## Referencias

- Brun, J. P. y Fort, X. 2011. *Salt Tectonics at Passive Margins: Geology Versus Models. Marine and Petroleum Geology* **28** (6): 1123-1145.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.03.004>.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos. 2015. Golfo de México, Cuencas del Sureste: Aguas Someras.
- Cruz-Mercado, M. A., Flores-Zamora, J. C., León-Ramírez, R. et al. 2011. Salt Provinces in the Mexican Portion of the Gulf of Mexico—Structural Characterization an Evolutionary Model. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions* **6**: 93-104.
- Escalera Alcocer, J. A. y Hernández Romano, U. 2009. Provincias Petroleras de México. WEC México.
- Flügel, E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*, second edition. Heidelberg, Alemania: Springer.
- Hudec, M. R. y Jackson, M. P. A. 2012. *The Salt Mine: A Digital Atlas of Salt Tectonics*. Austin, Texas, EUA: Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geoscience, University of Texas at Austin.
- Portillo Pineda, R., Peterson Rodríguez, R. y Corral Arzola, D. 2017. Rampa Estructurada, Influencia en el Ambiente Sedimentario Durante el Jurásico Superior, Porción Pilar de Akal. Congreso Mexicano del Petróleo, Puebla, Pue., México, junio 7-10.
- Sánchez Rivera, R., Cruz Mercado, M. A., Reyes Tovar, E. et al. 2011. Tectonic Evolution of the South Gulf Salt Province in the Gulf of México. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions* **61**: 421-427.
- Wright, V. P. y Burchette, T. P. 1998. Carbonate Ramps: An Introduction. En *Carbonate Ramps*, eds. V. P. Wright, T. P. Burchette, 1-5. London: Geological Society, Special Publications, No. 149.

## Semblanza de los autores

### Rodrigo Portillo Pineda

Maestro en Ciencias, Geología Estructural y Tectónica por el Centro de Geociencias de la UNAM. Geólogo egresado de la ESIA del Instituto Politécnico Nacional.

Actualmente se desempeña como analista e intérprete estructural en Pemex Exploración y Producción en estudios de cuencas y nuevos prospectos.

### Luis Lauro Villanueva González

Maestro en Ciencias en Geología egresado de Alemania Federal, estratígrafo y sedimentólogo, desde del 2004 labora en Pemex Exploración y Producción.

### Verónica Alicia Muñoz Bocanegra

Ingeniera Geóloga egresada de ESIA Ticomán IPN, con 16 años de experiencia en Pemex.

### Rolando Heberto Peterson Rodríguez

Ingeniero Geólogo por la Universidad Autónoma de Nuevo León y Maestro en Ciencias por la misma.

Intérprete y especialista en Geología Estructural en Pemex desde el año 2002. Actualmente líder de proyectos de estudios regionales.