

# Mapeo estructural del Cretácico en la Cuenca de Comalcalco usando gradiometría de gravedad de tensor completo

*Ing. Oscar Vázquez García  
MI. Víctor Manuel Chávez Valois  
Dr. Jorge Barrios Rivera  
Pemex*

Información del artículo: Recibido enero de 2012-aceptado marzo de 2013

## Resumen

Se realizó una interpretación cualitativa en la Cuenca de Comalcalco, Tabasco, sureste de México, sobre un área de aproximadamente 5000 km<sup>2</sup>, empleando datos de gradiente de gravedad aéreo adquiridos en 2010, a fin de correlacionar la respuesta gravimétrica con los altos estructurales y los cuerpos de sal interpretados con sísmica 3D.

El gradiente de gravedad mide la variación espacial del campo de gravedad en tres direcciones perpendiculares, obteniendo como resultado un tensor, de cinco componentes independientes. La interpretación cualitativa conjunta del tensor permitió delinear cuerpos de sal y además establecer una correlación con el mapa estructural en profundidad del Cretácico Superior (KS).

La evaluación de los mapas y atributos residuales de gravedad con el mapa del KS, reveló que el límite norte del Alto de Jalpa y los bloques elevados del sistema de fallas laterales E-W muestran anomalías positivas de gravedad.

El análisis indicó una elevada correlación entre altos de gravedad y altos estructurales que corresponden con campos productores, y fue posible diferenciar entre bajos de gravedad generados por bajos estructurales y anticlinales nucleados por sal.

Se detectaron tendencias de anomalías positivas con dirección NW-SE, en cuyos extremos se ubican campos productores, mientras que la anomalía central se encontraba en una zona sin sísmica 3D. La integración con sísmica de reciente adquisición en la porción central corroboran la interpretación de un alto estructural.

La correlación establecida es una evidencia de las ventajas del gradiente de gravedad para la detección de estructuras nucleadas por sal en áreas conocidas y para la evaluación del potencial en áreas poco exploradas.

**Palabras clave:** Comalcalco, gradiente, gravedad, tensor, filtro, anomalía, Cretácico, límite, sal.

## Structural mapping via full tensor gravity over Comalcalco Basin

### Abstract

A qualitative interpretation over Comalcalco Basin, on southeast México, was performed, within a 5,000 km<sup>2</sup> area, using full tensor gravity data acquired in 2010, in order to correlate gravity response of structural uplifts and 3D seismic interpreted salt bodies.

Full tensor gradient measures spatial rate of change of perpendicular components of gravity vector, generating a 5 independent component tensor. Qualitative assessment from the whole tensor allowed delineation of salt bodies and established a correlation with Upper Cretaceous (UK) depth structural map.

Appraisal of gravity residuals and transformations and UK map as well, showed that major structural limits, such as “Jalpa High” northernmost limit and E-W strike slip uplifted blocks were associated with positive gravity anomalies.

Results indicated a strong positive correlation among gravity and structural highs, which in turn correspond to producing fields. Successfully, it was possible to differentiate between negative gravity anomalies generated by structural lows and salt-cored anticlines.

A NW-SE positive gravity trend was detected, with producing fields over the extremes and a central anomaly over an area with no 3D seismic coverage. Integration of recently acquired seismic confirmed our structural high interpretation.

Indicated correlation is an evidence of the advantages of gravity gradient data that may be used as a salt-cored anticline indicator over known areas and for potential evaluation on frontier areas.

**Key words:** Comalcalco, gradient, gravity, tension, filter, anomaly, Cretaceous, limit, salt.

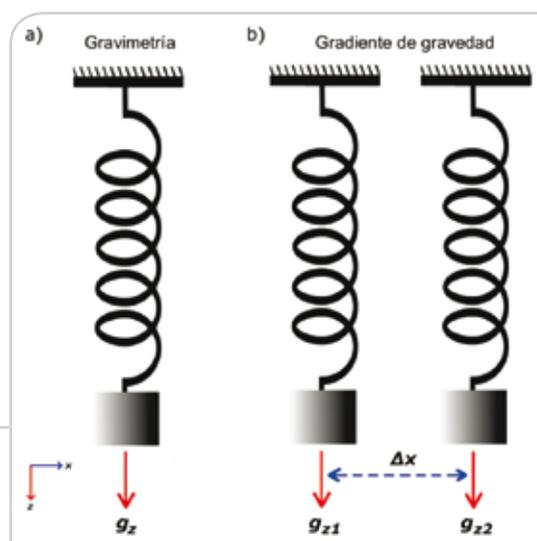
## Introducción

A diferencia de los estudios de gravedad convencionales, en donde únicamente se mide la componente vertical, el método de gradiente de gravedad completo (FTG, por sus siglas en inglés), mide la variación espacial de cada componente del vector de gravedad en tres direcciones

perpendiculares, así cada medición representa una razón de cambio espacial; la **Figura 1** muestra un esquema simplificado de estas diferencias. La unidad de medición para el gradiente de gravedad es el Eötvö (1 Eö = 0.1 mGal/km). Matemáticamente es posible representar el gradiente de gravedad como un tensor de esfuerzos de nueve componentes:

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (1)}$$

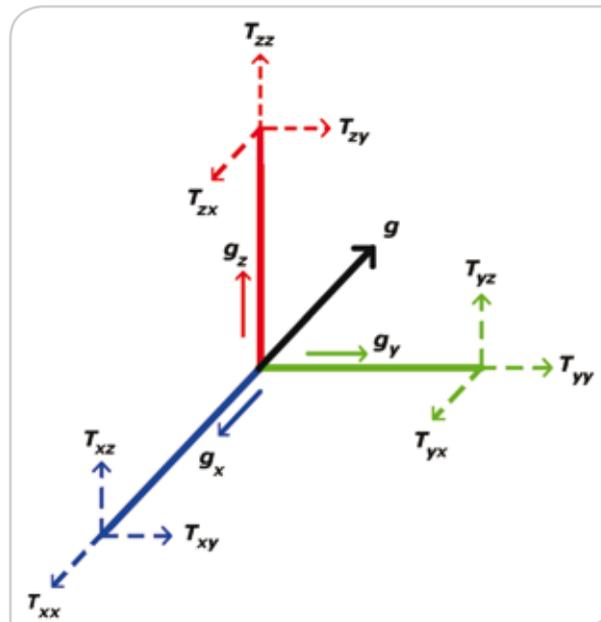
La ecuación 1 está representada gráficamente en la **Figura 2**. El tensor de gravedad ( $T_{ij}$ ) satisface la ecuación de Laplace, es decir, la suma de la diagonal principal es igual a cero; adicionalmente el tensor es simétrico respecto a esta última. Por lo anterior, sólo existen cinco componentes independientes en el tensor de gravedad:  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{zz}$ ,  $T_{xy}$  y  $T_{yz}$ . Blakely (1996) detalla más acerca de las propiedades matemáticas y físicas del gradiente.



**Figura 1.** Esquema de medición simplificado de la gravimetría convencional contra el gradiente de gravedad. (a) La gravimetría mide la componente vertical del campo de gravedad ( $g_z$ ). (b) El gradiente mide la razón de cambio espacial de cada componente del vector de gravedad: componente  $g_{zx}$  mostrada, también denominada como  $T_{zx}$ , la cual representa el cambio de  $g_z$  en la dirección  $x$ .

Los gradientes representan derivadas direccionales, por lo cual el contenido espectral aumenta hacia longitudes de onda corta (Saad, 2006), no obstante, la amplitud de la señal es inversamente proporcional al cubo de la distancia, a diferencia de la gravedad convencional, cuya señal es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

De manera similar a los estudios convencionales de gravimetría, el trabajo de interpretación cualitativa de datos de FTG consiste, de forma general, en el análisis de mapas en donde las anomalías regionales (eventos profundos o longitudes de onda larga), se separan de aquellas residuales (eventos someros o longitudes de onda corta).



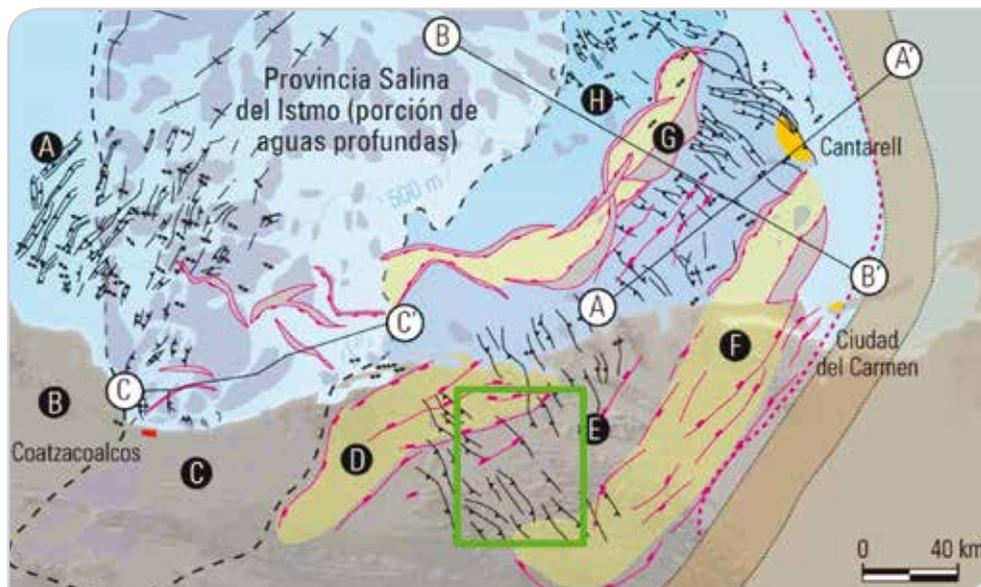
**Figura 2.** Representación gráfica del vector de gravedad ( $g$ ), sus proyecciones ortogonales ( $g_i$ ) y cada una de las componentes del tensor de gravedad ( $T_{ij}$ ).

Adicionalmente, los componentes del tensor son susceptibles al cálculo de algoritmos matemáticos, los cuales permiten identificar atributos geológicos importantes tales como: contactos litológicos, variaciones de densidad generadas por cambios mineralógicos en la estratigrafía, patrones estructurales y formas de cuerpos intrusivos.

Este análisis incluyó la técnica descrita por Pederson & Rasmussen (1990), que hace uso de dos combinaciones que emplean todas las componentes del tensor.

## Marco geológico

La Cuenca de Comalcalco se encuentra ubicada en el Estado de Tabasco y forma parte de la Provincia del Sureste en México, en donde las rocas mesozoicas han producido en los niveles estratigráficos del Jurásico Superior Kimmeridgiano, Jurásico Superior Tithoniano, Cretácico Inferior, Cretácico Medio y Cretácico Superior en un lapso de casi 40 años, representando la principal producción en el área. La profundidad del nivel Mesozoico oscila entre 500 y 7,000 m, mientras que su producción está asociada a facies depositadas en ambientes de plataforma interna, rampa, talúd y cuenca (Mata et. al. 2006). La **Figura 3** muestra el marco estructural regional de las Cuencas del Sureste.



**Figura 3.** Marco estructural de las Cuencas del Sureste: A, Cinturón Plegado de Catemaco; B, Cuenca de Veracruz; C, Cuenca Salina del Istmo; D, Cuenca de Comalcalco; E, Pilar Reforma Akal; F, Cuenca de Macuspana; G, Cuenca de Le-Akach; H, Cinturón Plegado Chuktah-Tamil. Área de estudio en el polígono verde. Modificada de WEC 2009.

Padilla y Sánchez (2007) y el estudio de WEC (2009), describen brevemente los eventos tectónicos presentes en las Cuencas del Sureste. El área de estudio ha experimentado una deformación compresiva, equivalente a la Orogenia Laramide que produjo plegamientos suaves en las rocas jurásicas y cretácicas en la Sierra de Chiapas, desde finales del Cretácico hasta el Oligoceno.

Durante el Mioceno se produjo la deformación chiapaneca, la cual causó deformación por desplazamiento lateral izquierdo y reactivó el cinturón de pliegues y fallas de la Sierra de Chiapas. En la Provincia del Sureste, este evento se manifestó principalmente por una compresión con tendencia hacia el noreste que creó pliegues de orientación noroeste-sureste en rocas mesozoicas y del Paleógeno del Pilar Reforma-Akal.

En la porción oeste del área de estudio, las rocas mesozoicas y paleógenas presentan pliegues y cabalgaduras con dirección noreste-suroeste y vergencia hacia el noroeste, mientras que en el Terciario se presentan fallas lístricas con inclinación al noroeste y fallas lístricas contra-regionales con inclinación al sureste, mientras que en la porción sur está caracterizada por pliegues y cabalgaduras de edad mioceno-pleocénica y orientación noroeste-sureste que afectan rocas mesozoicas y del Paleógeno, generalmente con una ligera curvatura cóncava hacia el suroeste, con

niveles de despegue en horizontes arcillosos y evaporíticos del Oxfordiano y Calloviano y tendencia hacia el noreste.

### Datos de gradiente de gravedad

Los datos de FTG se adquirieron en 2010, sobre una malla con separación de líneas principales en dirección N-S de 500 m y líneas de amarre en dirección E-W cada 4000 m.

El procesamiento de los datos de FTG, consistió de forma general, en una micro-nivelación de los datos de aire libre, en una reducción de ruido que empleó el tensor completo y en la corrección por terreno.

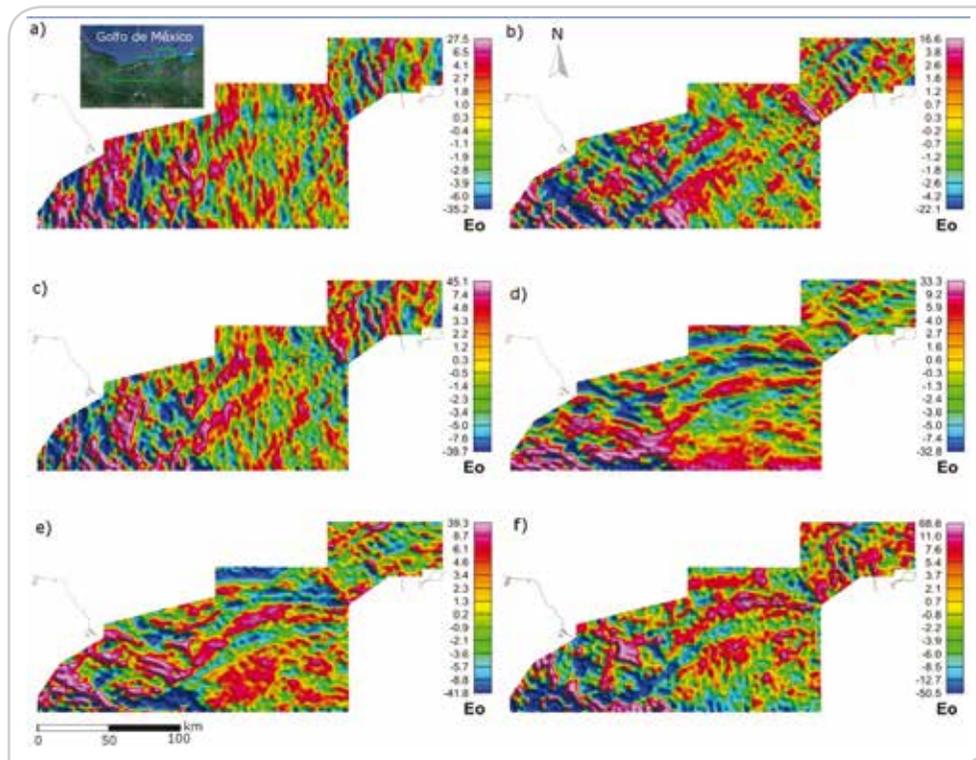
En el área del levantamiento “Sal Somera”, la densidad de  $1.9 \text{ g/cm}^3$  fue óptima para la eliminación de efecto del terreno, (Selman, 2010).

Los resultados para los seis componentes del tensor de gravedad se muestran en la **Figura 4**. La componente vertical  $T_{zz}$  posee mayor relación directa con la geología del subsuelo, ya que mapea directamente límites de anomalías.  $T_{yz}$  y  $T_{xz}$  delimitan los ejes centrales de las anomalías, mientras que  $T_{xx}$  y  $T_{yy}$  delimitan los límites norte-sur y este-oeste respectivamente. Finalmente  $T_{xy}$  mapea el centro de masa de la anomalía.

## Mapeo estructural

En 2010, Chávez et al., generaron un mapa estructural de la cima del Cretácico Superior (KS), en las Cuencas de Sureste, calculado a partir de marcadores de pozo e

interpretaciones sísmicas. Este mapa se empleó como una forma de restricción para determinar la posible causa de bajos de gravedad, que pueden ser generados por bajos estructurales o cuerpos presentes de sal.



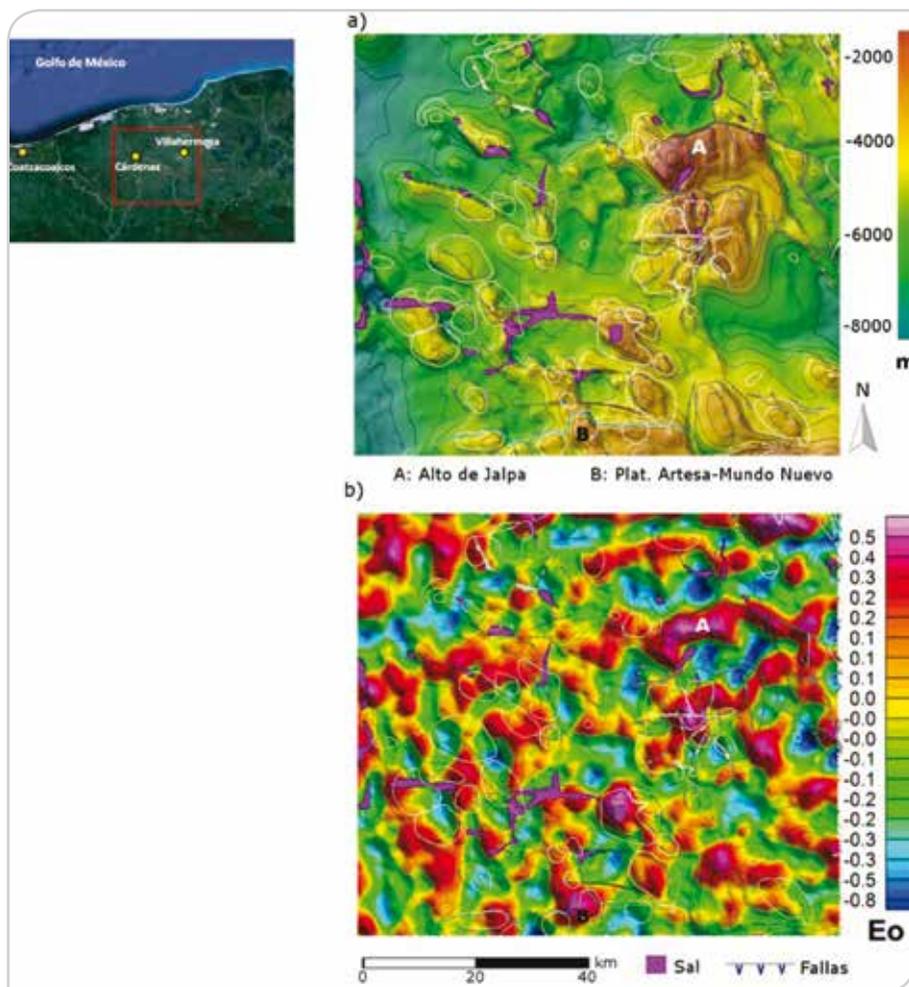
**Figura 4.** Datos registrados del levantamiento “Sal Somera”: componentes del tensor nivelados, corregidos por terreno con densidad de  $1.9 \text{ g/cm}^3$ , y reducidos en ruido; longitudes de onda menores a 5 km removidas. Mapa regional de la ubicación del estudio en la esquina superior izquierda. (a)  $T_{xx}$ . (b)  $T_{xy}$ . (c)  $T_{xz}$ . (d)  $T_{yy}$ . (e)  $T_{yz}$ . (f)  $T_{zz}$ .

La **Figura 5a** muestra el mapa en profundidad del KS, en una porción de la Cuenca de Comalcalco, donde es clara la estrecha relación entre pliegues y fallas inversas, fenómeno típico de los cinturones de pliegues y cabalgaduras (Chavez et al., 2010).

En el área se encuentran estructuras características tales como la Plataforma Artesa-Mundo Nuevo al sur y el Alto de Jalpa al este, descrito por Chávez et al. (2008), como

un dúplex con bloques imbricados convergencia general al noreste.

La profundidad del KS varía desde 1,800 m, en el Alto de Jalpa, hasta más de 7,000 m en la Cuenca de Macuspana. A través de un análisis espectral, se determinó que un filtro pasa bandas de 8 a 16 km de longitud de onda fue óptimo para los objetivos de interés.



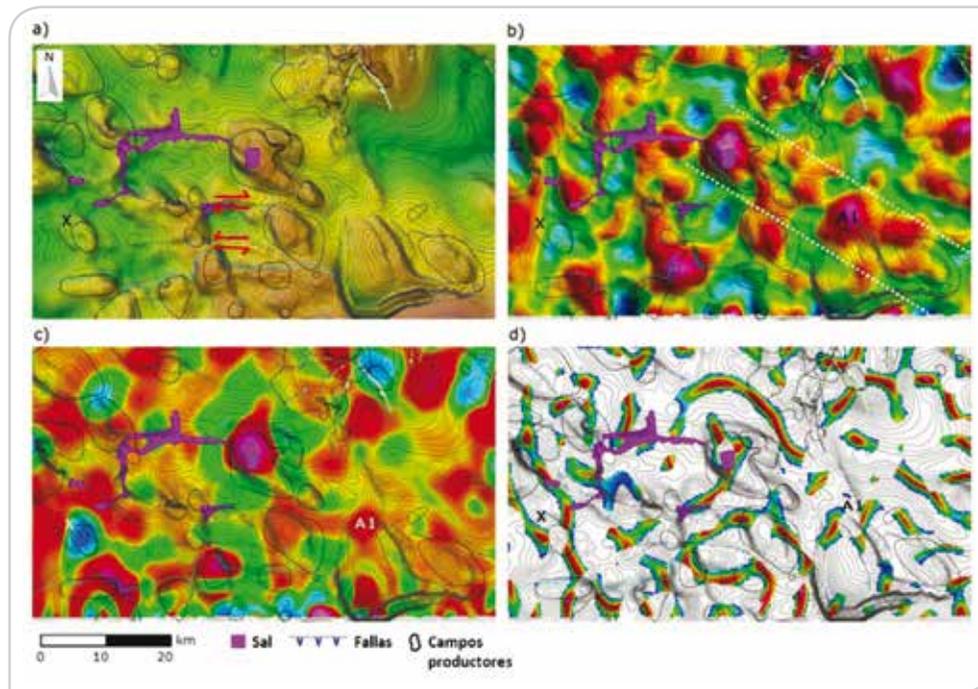
**Figura 5.** Área de estudio. (a) Mapa en profundidad del Cretácico Superior mostrando el límite norte del Alto del Jalpa y el borde norte de la Plataforma Artesa-Mundo Nuevo. (b) Componente  $T_{zz}$  con filtro pasa bandas de 8 a 16 km. Intervalo de curvas de nivel del KS de 500 m superpuesto. Campos productores en polígonos blancos.

Los mapas de invariantes horizontales y rotacionales se generaron aplicando el filtro precedente sobre cada una de las componentes del tensor, posteriormente se realizó el cálculo indicado por las ecuaciones descritas en Pederson & Rasmussen (1990). La **Figura 5b** muestra la componente  $T_{zz}$  con el filtro aplicado en superposición con las líneas de contorno del KS. Se observa una alta correlación entre altos estructurales y altos de gravedad, y a su vez con campos productores. El mapa filtrado de  $T_{zz}$  indica la terminación abrupta de dos anomalías positivas en la porción norte y sur del Alto de Jalpa, las cuales están asociadas a los límites del bloque alóctono.

En la parte sur del área de estudio existe un sistema de fallas laterales E-W, cuyos bloques elevados asociados

muestran una serie de anomalías positivas en dirección N-S, **Figura 6a**.

Al oeste del sistema de fallas se ubica el Campo "X" en un alto estructural, no obstante su expresión de gravedad es negativa, **Figura 6b**. El rotacional indica una anomalía negativa de menor tamaño, **Figura 6c**, mientras que el mapa de alineamientos muestra los límites en dirección E-W de la anomalía, **Figura 6d**. Pensamos que el mínimo de gravedad, es generado por un cuerpo de sal que está nucleando el alto estructural. La **Figura 7** muestra la interpretación sísmica actual en el área, indicando la posible presencia de sal por debajo de la estructura.

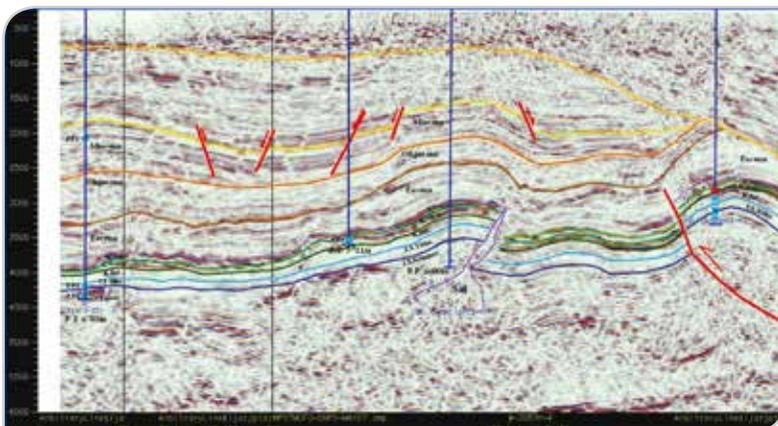


**Figura 6.** (a) Mapa estructural indicando altos con dirección NW-SE y la presencia del sistema de fallas laterales indicado por flechas rojas. (b) Componente  $T_{zz}$  filtrada, mostrando las anomalías asociadas al carácter estructural. Serie de anomalías positivas NW-SE delimitada por líneas blancas con anomalía de interés A1 en el centro. El Campo “X” está asociado a un bajo de gravedad. (c) Rotacional identificando un posible cuerpo de sal de menor dimensión por debajo del Campo “X”. (d) Mapa de alineamientos mostrando límites y contactos geológicos indicados por las bandas de color, en donde se delimita el cuerpo de sal por debajo del Campo “X”; los alineamientos indican congruencia con la tendencia estructural regional NW-SE presente. Todos los mapas muestran las curvas estructurales del KS con intervalo de 500 m.

## Conclusiones

El análisis indica una elevada correlación entre altos de gravedad y altos estructurales que corresponden con

campos productores, mientras que fue posible diferenciar entre bajos de gravedad generados por bajos estructurales y anticlinales nucleados por sal.



**Figura 7.** Interpretación sísmica estructural del área de estudio. Línea sísmica PSDM orientada E-W. Campo X en la porción oeste. Nótese la deformación a nivel Mesozoico y la presencia de cuerpos de sal autóctonos.

La correlación establecida, es un indicador para la evaluación del potencial en áreas poco exploradas.

Se recomiendan estudios más detallados que incluyan modelos directos e inversos 3D con datos potenciales, sísmicos y de pozo.

## Agradecimientos

Deseo expresar mi gratitud al Activo de Exploración Cuencas del Sureste Terrestre de Pemex Exploración y Producción por permitir mostrar datos y mapas, así como a los ingenieros Antonio Tamez Ponce, Ernesto Barrios Coronado y, en particular, a Jaime Patiño Ruiz, por su revisión y valiosos comentarios.

## Referencias

Blakely, J.R. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: University Press.

Capítulo 2: Provincias Petroleras de México. 2009. WEC México.

Chávez-Valois, V.M., Marín-Toledo, A., Castellanos-Calvo, R., Hernández-Salazar, L., Oláez-Ahedo, N.A., Hernández-Padilla, M. y Prieto-Ubaldo, C. 2008. Estudio de Plays Fracturados Mesozoico de Chiapas-Tabasco. Reporte Interno, PEMEX Exploración y Producción, Activo Regional de Exploración Sur, Villahermosa, Tabasco.

Chávez-Valois, V.M., Moreno-Solís, A., Hernández-Padilla, M. y Ramírez-Bárceñas, M. 2010. Estudio de Plays Tectónica Salina Etapa II: (Mapas Estructurales). Reporte Interno, PEMEX Exploración y Producción, Activo de Exploración Sur, Villahermosa, Tabasco.

Mata-Jurado, M., Varela-Santamaría, M., Alejandro-Sánchez, E.L., Monroy-Audelo, M.E., Luna-Sánchez, J., Hernández-Padilla, M. y Ríos-Rojas, R. 2006. Estudio de Plays en la Cuenca Mesozoica del Sureste de México. Reporte Interno, PEMEX Exploración y Producción, Activo Regional de Exploración Sur, Villahermosa, Tabasco.

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 LIX* (1): 19-42. [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5901/\(3\)Padilla.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/5901/(3)Padilla.pdf). (descargado 10 de enero de 2013).

Pedersen, L. y Rasmussen, R. 1990. The Gradient Tensor of Potential Field Anomalies: Some Implications on Data Collection and Data Processing of Maps. *Geophysics* **55** (12): 1558-1566. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1442807>.

Saad, A.H. 2006. Understanding Gravity Gradients—A Tutorial. *The Leading Edge* **25** (8): 942-949. <http://dx.doi.org/10.1190/1.2335167>.

Selman, D. 2010. Processing and Acquisition of Air-FTG® Data, Sal Somera Project, México. Final Report, PEMEX Exploración y Producción, Activo de Exploración Sur, Villahermosa, Tabasco.

## Semblanza de los autores

### Ing. Oscar Vázquez García

Ingeniero Geofísico egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México en 2007.

Trabajó en FUSION México, en donde sus principales actividades consistieron en el acondicionamiento de datos sísmicos para análisis de AVO, descomposición espectral e inversión de reflectividades. En 2009 comenzó a trabajar para Pemex Exploración y Producción en el Activo de Exploración Sur, en la Coordinación de Operación Geofísica, en donde desempeñó actividades de diseño y supervisión de estudios sísmológicos 3D. De principios de 2011 a la fecha trabajó en la Coordinación de Modelado Geológico Regional del mismo Activo, realizando actividades de interpretación de datos potenciales, en particular de gradiente de gravedad aéreo, integrando información geológica, de pozo y sísmica. Actualmente sus intereses son los procesos numéricos de interpretación de datos potenciales enfocados a la determinación de la base de la sal para la identificación y soporte de prospectos subsalinos. Es miembro activo de la AMGE.

**MI. Víctor Manuel Chávez Valois**

Ingeniero Geólogo egresado de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del IPN, y ostenta el título de Maestro en Ingeniería, con Mención Honorífica por la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

En 1983 ingresó a Petróleos Mexicanos donde ha trabajado en estudios de Mecánica de suelos, Integración e Interpretación Geológica-Geofísica, Análisis Estructural, Generación de Prospectos y Caracterización de Plays Petroleros. Ha desarrollado una especialidad en Geología Estructural. Actualmente labora en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco, México, como Coordinador de Modelado Geológico Regional del Activo de Exploración Cuencas del Sureste Terrestre. Ha publicado trabajos en boletines y revistas relacionadas con la industria petrolera presentando sesiones póster e impartido conferencias en congresos nacionales e internacionales en el seno de las asociaciones SGM, AIPM, CIGM y de la AAPG.

**Dr. Jorge Barrios Rivera**

Egresó como Ingeniero Geofísico del Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Tamaulipas. Obtuvo el Grado de Maestría en Ingeniería en Exploración de Recursos Energéticos del Subsuelo por parte de la UNAM y posee el título de Doctorado en Ciencias Geológicas por The University of Texas at Austin, con el tema "Stratigraphic Analysis of Reflectivity Data: Application to Gas Reservoirs in the Burgos Basin, México".