

# Aplicación de datos sísmicos con procesamiento multicomponente PP-PS para la reinterpretación del modelo de deformación de los campos Zaap y Maloob

*Gustavo Gutiérrez Vázquez*  
*Pemex*

*Reynaldo Castellanos Calvo*  
*Pemex*

*Pedro Ernesto Villaseñor Rojas*

Artículo recibido en marzo y aceptado en junio de 2020

## Resumen

Con el objetivo de incrementar la certidumbre en áreas de alta complejidad estructural del yacimiento Cretácico y zonas prospectivas del yacimiento Jurásico Superior Kimmeridgiano (JSK) de los campos Zaap y Maloob, localizados en la “Sonda de Campeche”. Se llevó a cabo una actualización de la interpretación estructural utilizando los nuevos datos sísmicos multicomponentes de ondas PP-PS (KMZ3D3C).

El diseño de adquisición tuvo por objetivos utilizar tecnologías de grabación de ondas PP-PS para el incremento de resolución y la definición en las zonas de alta complejidad estructural y el procesamiento sísmico con algoritmos de tecnología de vanguardia multicomponente de ondas PP-PS de migración en profundidad (*PSDM*) Kirchhoff y RTM 45Hz. La imagen sísmica en profundidad *PSDM* que se obtuvo recientemente en 2018 es superior en definición estructural y estratigráfica en relación con los datos PP adquiridos en 1999 y con su procesamiento sísmico (*PSTM*) del 2005. El reto en la interpretación sísmica de los nuevos datos sísmicos implicó el uso y alternancia de los volúmenes en profundidad: Kirchhoff y RTM 45Hz.

Se reinterpretaron los estilos estructurales de los campos Zaap y Maloob, redefiniendo estructuras extensionales Jurásicas, graben y medios graben, que evolucionaron a estructuras de “raft” tectónico y el consecuente desarrollo de “pliegues extensionales” (“turtle structure”), en presencia de diapiros y “rollers” de sal. La fase compresiva se caracteriza por pliegues de tipo “detachment” cuya geometría varía a lo largo del anticlinal, debido a factores reológicos, p.ej. facies de mudstone deformado en conjunto con la sal, reorientación local de la dirección del esfuerzo compresivo del Mioceno, así como inversión tectónica.

El control de la geometría de la estructura de “raft” tectónico es clave para identificar las condiciones estructurales iniciales de depósito de los yacimientos del JSK. La mejora de la imagen en las zonas profundas es de relevancia para la caracterización de los tipos de pliegue y el desarrollo de fracturas asociado en el yacimiento Cretácico, lo que permitirá una integración eficaz con datos de producción de pozos y con futuros resultados de la inversión sísmica azimutal y conjunta PP-PS.

**Palabras clave:** Datos PP-PS, migración en profundidad, propiedades reológicas, detachment, modelo de deformación, geometría de pliegue, datos dinámicos de pozo.

## Abstract

With the objective of increasing the certainty in areas of high structural complexity of the Cretaceous reservoir and prospective areas of the Upper Jurassic Kimmeridgian deposit (JSK) of the Zaap and Maloob fields, located in the “Sonda de Campeche”. An update of the structural interpretation was carried out using seismic data with cutting-edge multicomponent PP-PS wave technology (KMZ3D3C) for seismic acquisition and processing with depth migration algorithms: Kirchhoff and RTM 45Hz. The seismic image that was obtained recently (2018) is superior in structural and stratigraphic definition in relation to the seismic image obtained in 2005. The challenge in the seismic interpretation of the new seismic data involved the use and alternation of the volumes in depth: Kirchhoff and RTM 45Hz.

The structural styles of the Zaap and Maloob fields were reinterpreted, redefining Jurassic extensional structures, graben and half graben, which evolved into tectonic “raft” structures and the consequent development of “extensional folds” (“turtle structure”), in the presence of diapirs and “rollers” of salt. The compressive phase is characterized by “detachment” type folds whose geometry varies along the anticline, due to rheological factors, like mudstone facies deformed in conjunction with salt, local reorientation of the direction of the Miocene compressive stress, as well as tectonic inversion.

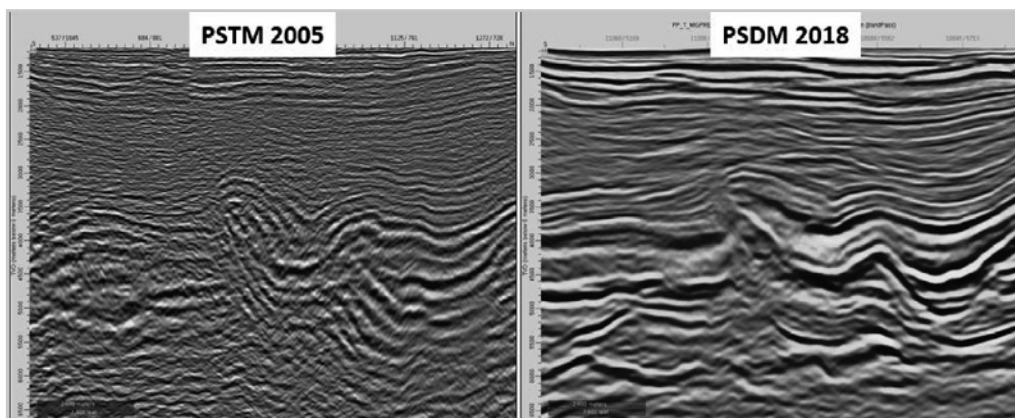
Controlling the geometry of the tectonic “raft” structure is key to identifying the initial structural conditions of deposit of the JSK reservoirs. The image enhancement in the deep zones is relevant for the characterization of fold types and associated fracture development in the Cretaceous reservoir, which will allow efficient integration with well production data and future azimuthal and PP-PS joint seismic inversion results.

**Keywords:** PP-PS data, depth migration, rheological properties, detachment, deformation model, fold geometry, dynamic well data.

## Introducción

El presente trabajo se desarrolla a partir de la adquisición y procesamiento de datos sísmicos con tecnología de vanguardia multicomponente de ondas PP-PS (KMZ3D3C) migrado a profundidad con ayuda de un modelo de velocidades ortorrómbico. Tal calidad del dato sísmico exigió de un análisis a detalle para la reinterpretación de los modelos de deformación del campo Zaap y Maloob. Esta nueva información permitió detectar los cambios principales y tener una comprensión mucho más completa de la deformación de las estructuras geológicas de los campos. La mejoría sustancial de la imagen sísmica PSDM 2018 en contraste con la imagen sísmica PSTM 2005, permitió identificar diferentes geometrías del pliegue a lo largo de las estructuras geológicas de los campos Zaap y Maloob, misma que obedece a las características litológicas y estructurales de las formaciones Jurásicas (Tithoniano, Kimmeridgiano y Oxfordiano) que predispusieron la configuración estructural actual a partir de los eventos geológicos de deformación documentados en la Región Marina Noreste. Estos resultados son comparados con el comportamiento dinámico de los pozos de los campos Zaap y Maloob, con el fin de relacionar las geometrías del pliegue con el desempeño en la producción de aceite y la permeabilidad obtenida a partir de pruebas de presión del yacimiento Cretácico.

Las tecnologías de procesado multicomponente aplicado, así como la migración en profundidad con un modelo de velocidades robusto permitió obtener una imagen de mayor detalle, **Figura 1**, con el que se tiene un entendimiento más completo del modelo de deformación de los campos, las causas y su efecto en comportamiento dinámico los pozos.



**Figura 1.** Sección sísmica campo Maloob que muestra la mejora significativa a nivel de imagen en la PSDM 2018 para la definición de estructuras geológicas en contraste con la sísmica PSTM 2005.

## Metodología

La metodología de este trabajo consistió en las etapas siguientes:

- Visualización e identificación de las estructuras principales en los volúmenes con algoritmos de migración Kirchhoff y RTM.
- Identificación de las características litológicas y estructurales de las formaciones Jurásicas, (JST, JSK, JSO)
- Generación de sismogramas sintéticos en 10 pozos e Interpretación de siete horizontes sísmicos asociados a la cima de calcarenitas del Eoceno Medio (CCE), Cretácico Superior (KS), Jurásico Superior Tithoniano (JST), Jurásico Superior Kimmeridgiano (JSK) y Sal.
- Redefinición de estructuras jurásicas y tipos de pliegues característicos para los campos Zaap y Maloob.
- Correlación de la interpretación estructural con atributos sísmicos
- Integración de geometrías de pliegue con la información geológica y datos dinámicos de pozo.

## Localización

La interpretación estructural de los campos Zaap y Maloob comprende parte del levantamiento sísmico KMZ3D4C, adquirida en aguas territoriales del Golfo de México en la Sonda de Campeche, **Figura 2**.



**Figura 2.** Mapa de localización del levantamiento sísmico KMZ3D4C.

## Antecedentes

Los estudios de interpretación sísmica realizados para el desarrollo de los campos Zaap y Maloob, han sido sustentados con la información sísmica de una adquisición OBC de 1999, con reprocesamiento pre apilado en tiempo en 2005. Sin embargo, la perforación de los pozos de desarrollo durante la vida productiva de los campos, ha llevado a la necesidad de reajustar la interpretación estructural con los datos geológicos descubiertos por pozos, en algunos casos muy particulares, eventos geológicos que no son representados claramente por la imagen sísmica.

La mayor parte de la producción de los campos Zaap y Maloob ha sido extraída del yacimiento Cretácico y en menor medida el yacimiento Jurásico. De la misma forma el ritmo de producción ha llevado progresivamente a explotar zonas con mayor complejidad estructural y/o estratigráfica, lo que requiere de un análisis y elementos técnicos de mayor peso como los resultados obtenidos del procesamiento sísmico PP-PS.

## Procesamiento sísmico PP-PS

El procesamiento en profundidad es la herramienta sísmica de imágenes preferida para los proyectos más desafiantes de la actualidad de exploración y producción de yacimientos. En áreas de alta complejidad estructural o modelos de velocidad sísmica complejos, muchas de las suposiciones que sustentan el procesamiento tradicional en el dominio del tiempo son inválidas y pueden producir resultados engañosos. Las secuencias altamente falladas o intrusiones salinas son ejemplos de situaciones comunes. En estos casos, únicamente se puede confiar en la aplicación cuidadosa del procesamiento sísmico en profundidad antes de apilar, para delinear con precisión la estructura geológica, para análisis de riesgo e incrementando la certidumbre durante la perforación de los pozos.

El procesamiento sísmico, utilizó tecnologías avanzadas de procesamiento en tiempo, algoritmos robustos de imagen en profundidad, interpretación geológica y datos de pozo, mismos que fueron honrados durante las actualizaciones de los modelos de velocidad. En la **Figura 3** se muestra el flujo general de procesamiento multicomponente.

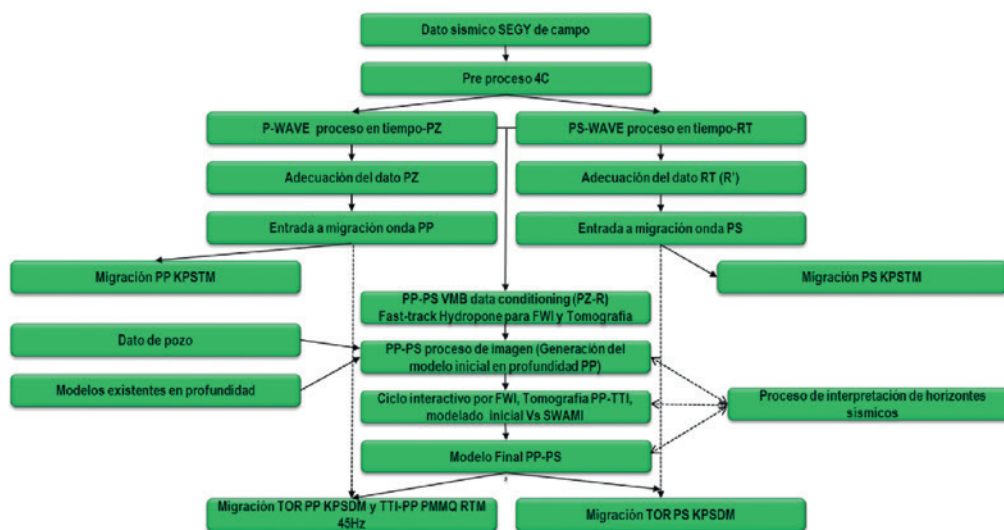


Figura 3. Flujo general de procesamiento PP-PS.

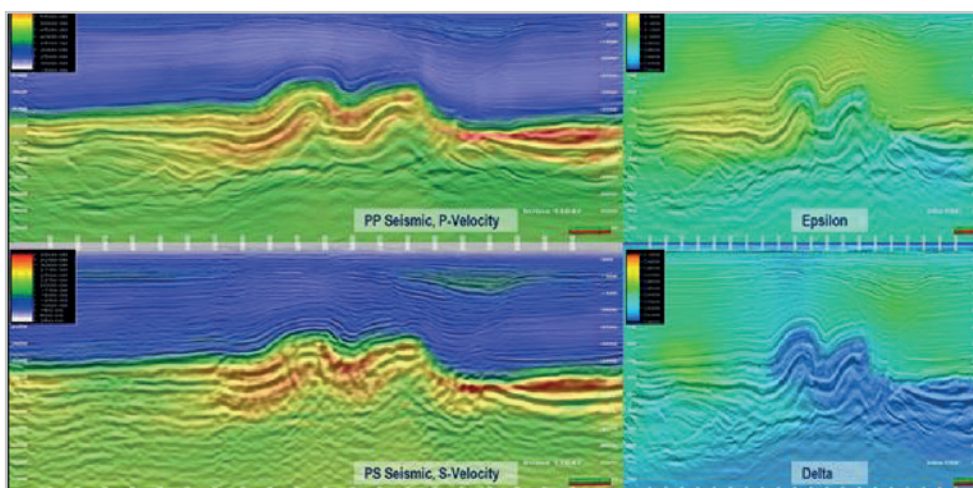
El componente crítico del procesamiento en profundidad es la determinación de los parámetros anisotrópicos, en cuyo cálculo, es importante incorporar tantas restricciones como sea posible, tales como correlación con pozos, tiempos de

viaje de VSP y registros, y por supuesto, el conocimiento geológico. Este enfoque amplio es fundamental para construir modelos e imágenes migradas de alta calidad, apegada al contexto geológico del área de estudio.

La anisotropía está presente debido a la naturaleza de los yacimientos y a medida que aumenta, su efecto llega a ser mas significativo. Omitir anisotropía en el procesado sísmico puede causar errores de velocidad que dependen de la estructura y ubicación, lo cual puede dar como resultado un mal posicionamiento de eventos sísmicos que pueden variar espacialmente, también puede ocasionar inestabilidad en el análisis de velocidad de migración e introducir efectos de anisotropía azimutal aparentes.

#### Modelo de velocidad PP-PS ortorrómbico.

El modelo de velocidad KMZ-IKEB ortorrómbico (TOR) contiene las propiedades siguientes: velocidad de onda p, velocidad de onda s, épsilon y delta. El objetivo de la construcción del modelo es producir un modelo PP-PS TOR geológicamente representativo del medio que genere una imagen en profundidad con eventos sísmicos nítidos, planos de fallas bien definidos, gathers CRP planos y una correcta profundidad de los marcadores de pozo. La **Figura 4** muestra los campos de velocidad y los parámetros de anisotropía utilizados y calculados para las tomografías conjuntas PP-PS.



**Figura 4.** Propiedades anisotrópicas del modelo de velocidades.

#### Migraciones Kirchhoff (PP y PS) y RTM (PP) TOR en profundidad

Luego de generado el modelo de velocidades final, se procedió con la migración final Kirchhoff pre apilado. La fortaleza de una migración en profundidad es que se pueden utilizar campos de velocidad, que son lateral y verticalmente variables. La migración en tiempo no puede producir una imagen correcta del subsuelo en un campo de velocidad variable. Por lo tanto, el propósito de la migración pre apilado en profundidad es la herramienta más actual para producir imágenes del subsuelo de zonas altamente complejas. El modelo de velocidades en común gracias a las tomografías conjuntas permitió asegurar que la onda convertida ajustara en profundidad con los resultados de la migración de onda PP. Los volúmenes migrados finales quedan por esa razón, listos para la interpretación multicomponente, registración de eventos e inversión conjunta PP-PS.

La migración RTM para el producto final se extendió en frecuencia hasta 45Hz y extraída en una malla de 25x25m. Esta RTM solamente se migró en onda PP. Los resultados de la RTM incluyeron imágenes originales, así como particiones de vectores de imagen. Cada partición de imagen vectorial (VIP) se interpoló a una cuadrícula de 12.5 m x 12.5 m. Se generó un ángulo de variante de profundidad para el proceso de apilamiento, con el fin de proporcionar un diseño de silenciamiento variable temporal y espacial, para reducir aun más la energía de refracción de baja frecuencia.

La diferencia entre los dos tipos de algoritmos visualmente muestra una característica estratigráfica en Kirchhoff, con más nitidez para interpretar horizontes, mientras que la RTM es útil para definir planos de falla y tiene una imagen mejor en zonas de alta complejidad estructural, como se observa en la **Figura 5**.



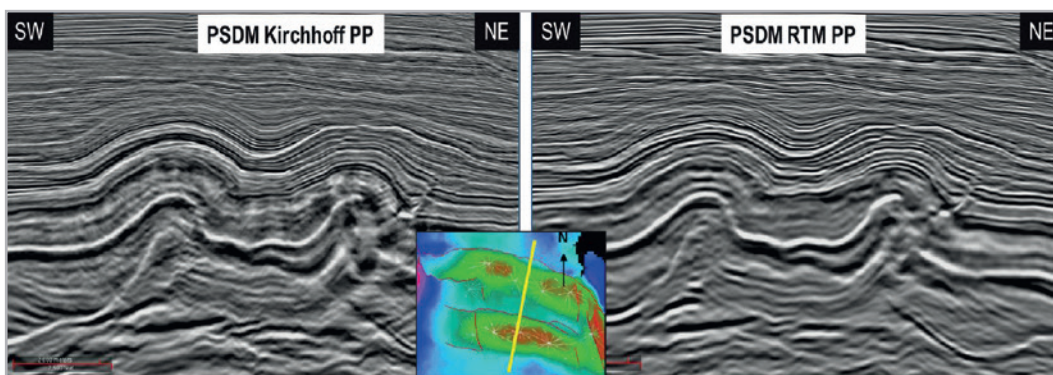


Figura 5. Sección sísmica con migración Kirchhoff (izq.) y migración RTM (der.) en los campos Zaap y Maloob.

## Marco geológico

### Estructuras Jurásicas

Previo al inicio de la interpretación de fallas y horizontes, se revisaron los volúmenes sísmicos con migración en profundidad, con el fin de identificar las estructuras geológicas principales. Las imágenes que muestran ambos volúmenes (Kirchhoff y RTM) presentan una gran claridad de los eventos sísmicos profundos, en comparación con la información proveniente del volumen sísmico PSTM.

En este caso fue posible identificar las estructuras Jurásicas con secciones Oeste-Este. Se redefinieron estructuras jurásicas, graben y medios graben, que evolucionaron a estructuras de raft tectónico y el desarrollo de pliegues extensionales consecuente, conocidos también como “turtle structure”; hay presencia de rollers de sal. La Figura 6 muestra la estructura de raft tectónico en la zona del campo Zaap.

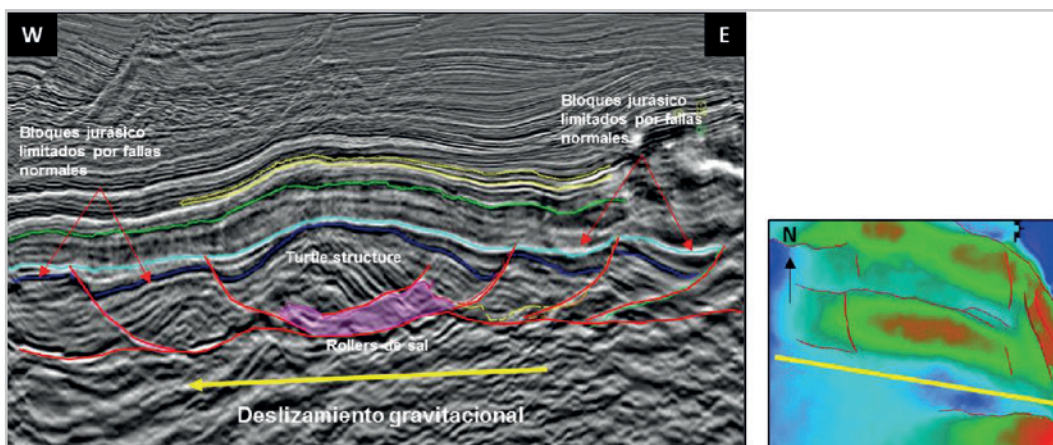


Figura 6. Pliegue extensional campo Zaap.

Con el conocimiento de las estructuras profundas del Jurásico, se puede comprender mucho mejor las condiciones sedimentarias en que se depositó el Jurásico Kimmeridgiense; en este sentido se interpretaron los horizontes sísmicos Jurásicos correspondientes a la cima de JST, JSK y la distribución de la sal.

Se calculó un atributo de clasificación de forma de onda en el horizonte sísmico interpolado del JSK, con el fin de encontrar patrones que obedecieran a las condiciones en que se depositaron los sedimentos de esta formación. Con un parámetro de ocho ondículas sin supervisar, se pueden observar en la Figura 7, las formas de ondículas en la zona

de los campos Zaap y Maloob. De manera cualitativa, los colores naranjas y rojos están ubicados en las zonas paleo ambientalmente más altas de Kimmeridgiano, delimitadas

por fallas normales. Los colores amarillos predominan en las zonas de los pozos productores del campo Zaap, los cuales se asocian a facies del banco oolítico.

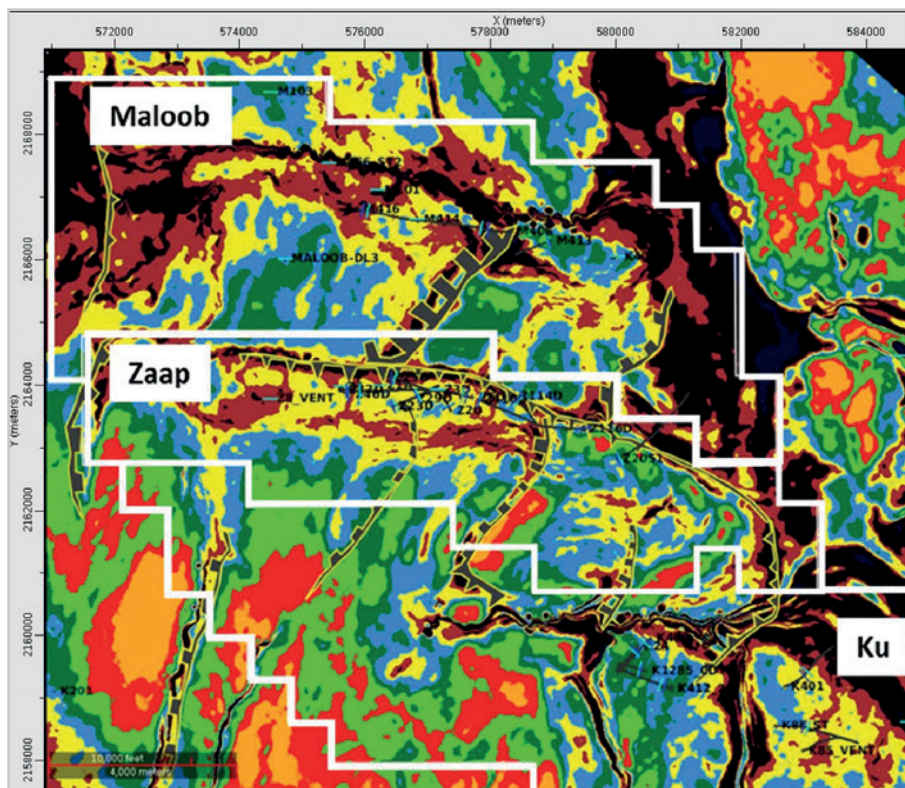


Figura 7. Atributo sísmico de clasificación de ondícula en JSK.

El ejercicio del atributo de forma de ondícula aplicado al horizonte interpolado de JSK, representa en cierta medida las variaciones laterales de este yacimiento con alta anisotropía. Estos resultados proporcionan indicios de las condiciones iniciales durante los depósitos del periodo Kimmeridgiano.

#### Unidades geológicas detachment y sub-detachment.

Con los estudios sedimentarios que se han realizado en el Jurásico, se han identificado diferentes litologías a lo largo de las unidades geológicas JST, JSK y JSO, con ayuda de los registros de los pozos, muestras de núcleo y canal. Ha sido muy importante la integración de estos estudios geológicos para comprender el efecto que tienen estas formaciones Jurásicas en la geometría de los pliegues de los campos Zaap y Maloob. Como lo documentó Behzad Derikvand

(2019), las propiedades dúctiles de las unidades geológicas subyacentes en la estructura condicionan las geometrías de pliegues desarrollados durante la deformación. Es así que la litología del Jurásico juega un papel importante para la definición final de las estructuras deformadas de los campos Zaap y Maloob.

La formación del Tithoniano está caracterizada por calizas arcillosas con textura de packstone y dolomías con texturas de wackstone y mudstone. Presenta escasas fracturas rellenas de arcilla. En la parte izquierda de la **Figura 8**, se observa la interpretación litológica a nivel de Tithoniano con presencia de cuerpos más arcillosos.

De acuerdo con el modelo sedimentario del JSK, se interpretaron las microfacies de los diferentes subambientes de depósito de rampa interna. Como se observa en la Figura 8, a pesar de que Zaap y Maloob

cuentan con una mayor distribución de bancos oolíticos, prebanco y postbanco, se considera que hay una mayor presencia de mudstone arcilloso (últimos dos colores de la

leyenda), por ambientes más restringidos. Esto representa un cuerpo potencialmente dúctil.

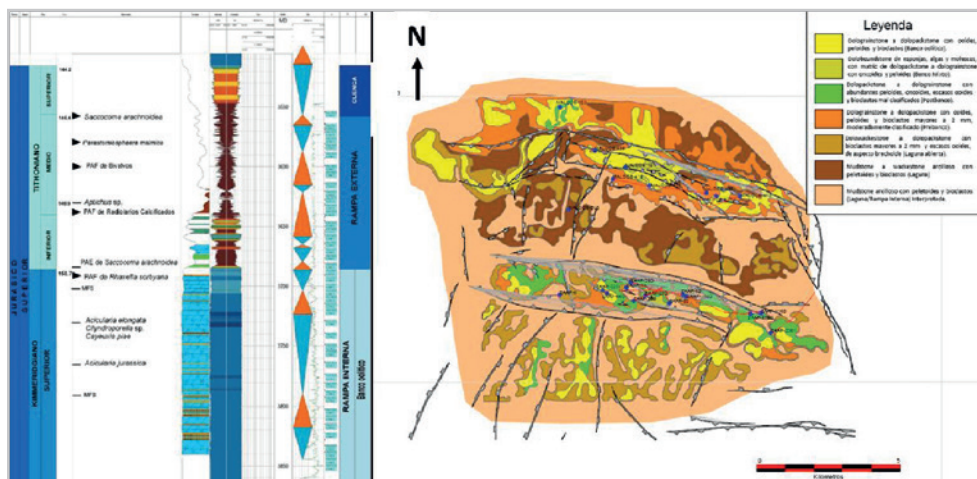


Figura 8. Interpretación litológica calibrada con registro de rayos gamma (izq.) y modelo sedimentario Zaap Maloob JSK (der). Aguilera (2017)

El Jurásico Oxfordiano, está constituido mayormente por terrígenos, por ejemplo, alternancia de calizas arenosas, areniscas calcáreas, mudstones, lutitas bentonítica y capas de anhidritas. El ambiente de depósito corresponde a un sabkha. El Calloviano se constituye por depósitos salinos, que se depositaron durante la apertura del Golfo de México.

De acuerdo con la **Tabla 1** que muestra la competencia de diferentes litologías de débil a fuerte, la lutita y mudstone poseen las mismas propiedades, actuando como unas capas dúctiles, aunado a la presencia de sal. En este sentido las formaciones Jurásicas de JSO, JST, y la sal poseen características para actuar como un horizonte detachment, mientras que el JSK sería definido como un sub-detachment, por la intercalación entre litologías frágiles y dúctiles. Estas características reológicas propiciaron las condiciones para el posterior desarrollo y tipos de geometrías presentes en las estructuras de los campos Zaap y Maloob.

De acuerdo con la naturaleza reológica de las formaciones del Jurásico, Davis (2013) describió que los pliegues detachment inician en unidades competentes subyacentes por unidades incompetentes, tales como lutita, mudstone y evaporitas.

<b>Strongest</b>	<b>Quartzite</b>	
	<b>Granite</b>	
	<b>Quartz-cemented sandstone</b>	
	<b>Basalt</b>	
	<b>Limestone</b>	
	<b>Calcite-cemented sandstone</b>	
	<b>Schist</b>	
	<b>Marble</b>	
	<b>Shale/Mudstone</b>	
	<b>Anhydrite</b>	
	<b>Weakest</b>	<b>Salt</b>

Tabla 1. Ranking general de litología de acuerdo con competencia, (Davis, 2013).

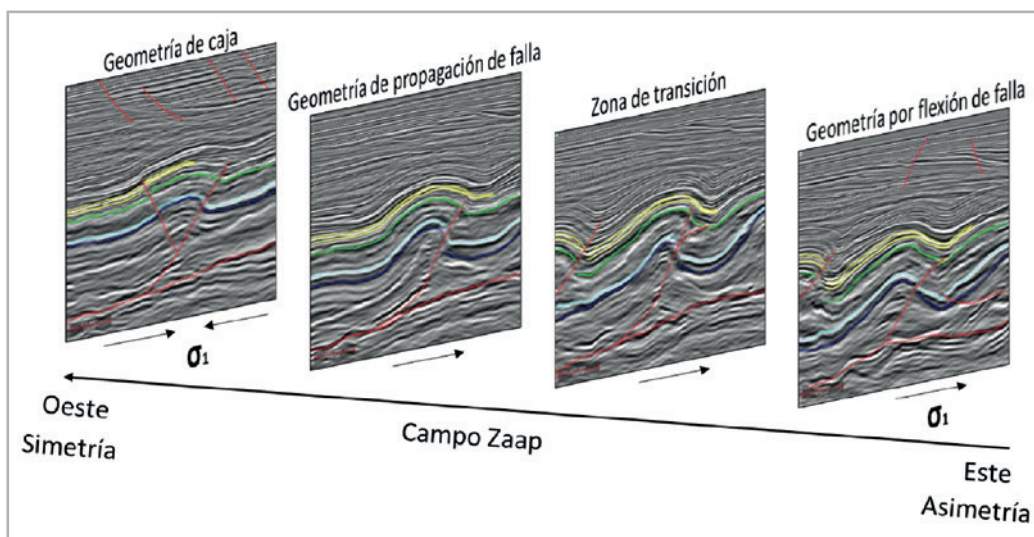


## Desarrollo

### Geometría de los pliegues de Zaap y Maloob

Lo anterior supone uno de los factores principales que definen el estilo estructural y los cambios de geometría que se presentan a lo largo de los campos Zaap y Maloob. De acuerdo con Shankar Mitra (2006), los campos Maloob y Zaap eran delimitados por una falla inversa en la zona norte, cuyo plano de falla no presentaba variaciones significativas. En cambio, ahora con la calidad de los datos sísmicos procesados en profundidad, fue posible identificar cambios en el plano de la falla inversa que controla la geometría del pliegue a lo largo de la estructura,

incluso hacia el oeste de los dos campos se identificó una estructura delimitada por dos fallas inversas (norte y sur). En la **Figura 9** se muestran las interpretaciones sísmicas del campo Zaap y los tipos de geometría del pliegue. El campo Zaap se define como pliegues detachment fallados. En las imágenes se muestra un aumento en la simetría del pliegue de Este a Oeste. La zona Oeste se caracteriza por plegarse bajo dos esfuerzos sigma 1 Norte-Sur, lo que resulta en la generación de la geometría de caja, delimitada por dos fallas inversas, una ubicada en el flanco norte y la otra en el flanco sur. Conforme se desplaza el pliegue al Oeste, se desarrollan geometrías de propagación de falla hasta una geometría por flexión de falla finalmente.



**Figura 9.** Cambios en la geometría del pliegue detachment en el campo Zaap.

Los cambios de la geometría del pliegue en el campo Maloob, **Figura 10**, muestra diferencias con los encontrados en el campo Zaap. Primeramente, la estructura característica del Oeste de Maloob muestra una dirección de esfuerzo contra regional al esfuerzo principal del evento compresivo del Mioceno, lo que genera una falla inversa contra regional,

que tiene efecto en la formación del pliegue detachment con geometría de caja ubicado también al Oeste del campo Zaap. Hacia el Este del campo se preserva la dirección principal de sigma 1, formando geometría por flexión de falla y de propagación de falla.

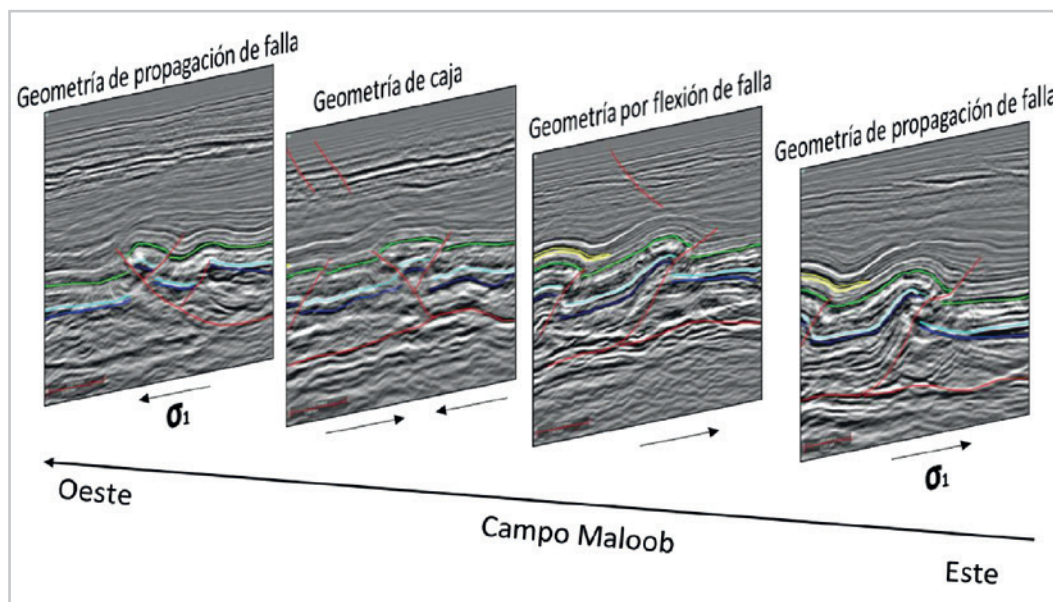


Figura 10. Cambios en la geometría del pliegue detachment en el campo Maloob.

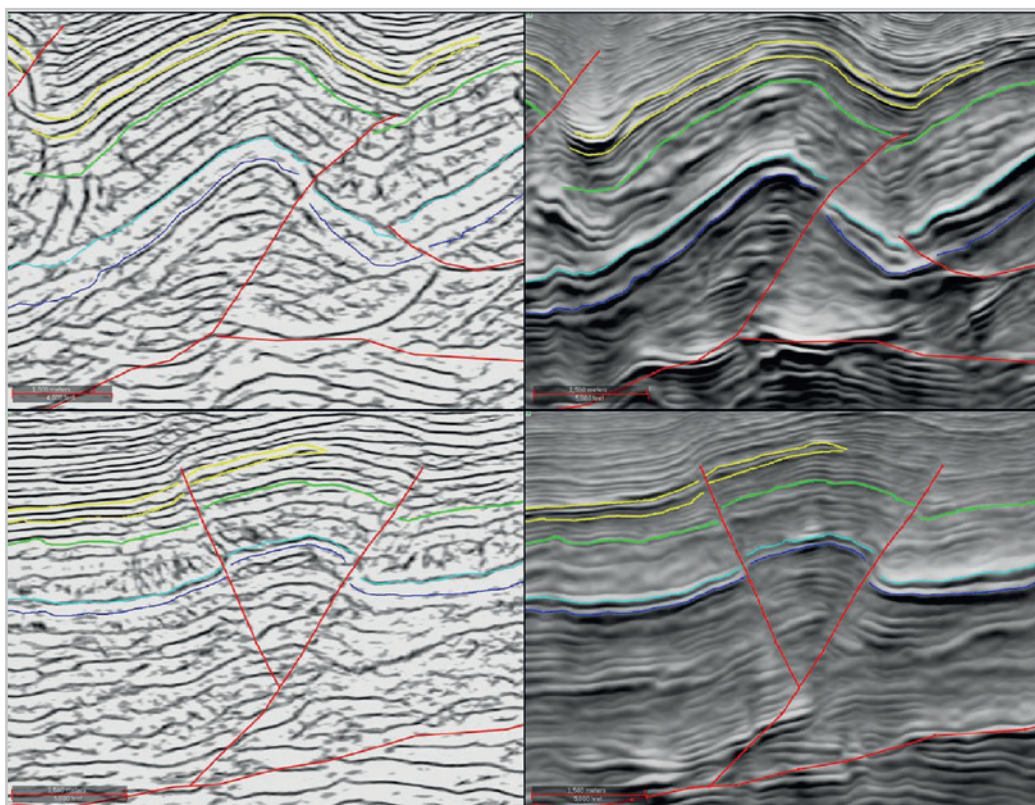
### Correlación con atributos sísmicos

Se generaron distintos atributos sísmicos, para validar la interpretación de fallas y correlacionar con los tipos de geometrías identificados para los pliegues detachment de Zaap y Maloob. En la **Figura 11** se muestran unos ejemplos de una buena correlación entre los límites del campo delimitados por fallas inversas y la respuesta de los atributos de discontinuidad, que representan la continuidad de las capas y cambios en los valores asociados a las fallas interpretadas, principalmente en los flancos frontales de los anticlinales.

En el atributo de rotación de fase  $-90^\circ$  a partir de un atributo de RMS, fue generado del volumen sísmico Kirchhoff migrado en profundidad, se destaca el

carácter estratigráfico y estructural de la sección sísmica que responde positivamente con los planos de falla interpretados en color rojo. En el atributo sísmico de discontinuidad, se generó de un volumen sísmico RTM migrado en profundidad, donde se observa la irrupción de las capas y los cambios de nivel por el desplazamiento entre bloques interpretados con las cimas geológicas del campo.

Debido a que se propone un pliegue detachment fallado, los horizontes jurásicos actúan como el medio dúctil o semidúctil, por lo que es difícil observar el plano de falla a lo largo del paquete Jurásico. Mientras que en el Cretácico es posible observar las discontinuidades del paso de falla representadas por la interrupción en la continuidad de las capas.



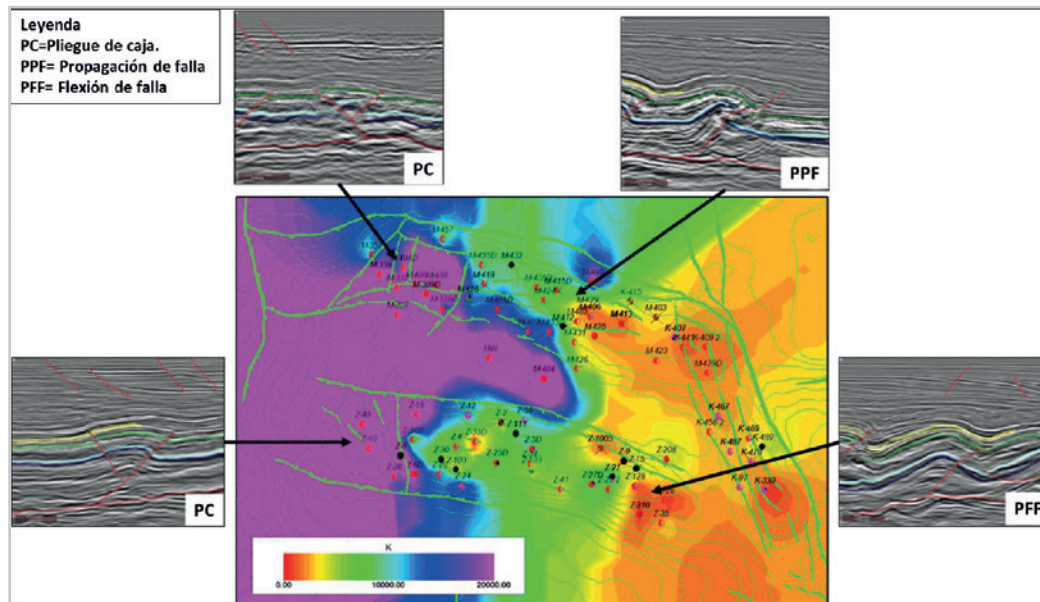
**Figura 11.** Atributos sísmicos de discontinuidad y rotación de fase para el campo Zaap.

### Integración con datos de producción

A partir de la interpretación de los tipos de pliegue identificados en los campos Zaap y Maloob, se correlacionó con información de tendencias de isopermeabilidades obtenidas de pruebas de presión en Cretácico Superior y datos de producción de pozos, para conocer el efecto posible de la geometría de la estructura con el dato dinámico de los pozos como se observa en la **Figura 12**. Debido a que los intervalos del Cretácico superior presentan en algunos pozos lecturas afectadas (PHIT, ILD, DT, entre otros) por derrumbes debido a la presencia de vugulos y fracturas, se eligió relacionar la permeabilidad obtenida

de las pruebas de presión con las geometrías de pliegue identificadas que nos dan valores del comportamiento de todo el medio, en este caso Cretácico Superior. La geometría de pliegue de caja (PC) presenta valores más altos relativamente de permeabilidad a los presentes en los demás tipos de pliegue, a causa del desarrollo de un mayor fracturamiento y conexiones con vugulos. Los pozos de las plataformas que se ubican en este tipo de estructuras presentan permeabilidades mayores a 10,000 md. Por el contrario, las zonas Este de ambos campos presentan valores de permeabilidades mas bajas del orden de 2,000 a 5,000 md, donde el desarrollo del sistema de fracturas no fue tan favorable en comparación con la zona Oeste.

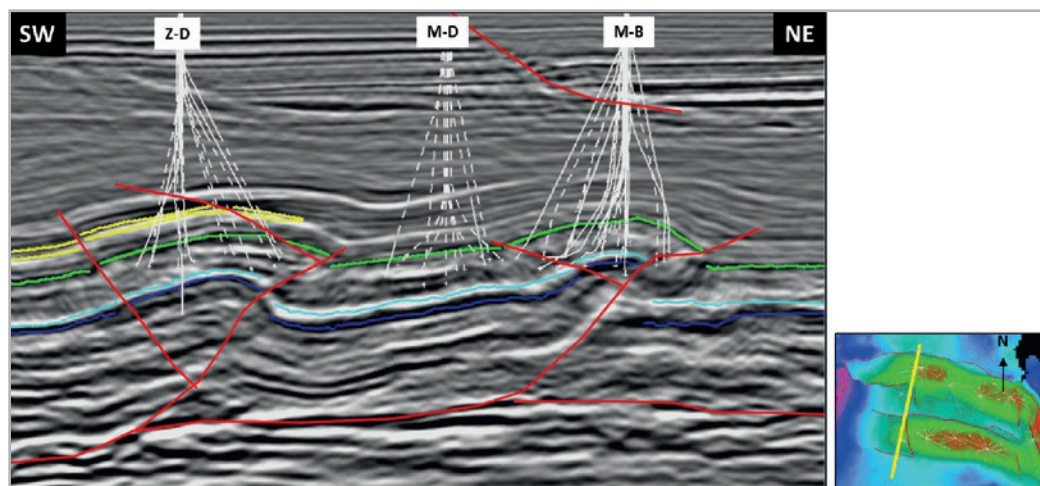




**Figura 12.** Correlación entre el mapa de tendencias de isopermeabilidades (md) en Cretácico Superior con los tipos de geometrías de pliegue de los campos Zaap y Maloob.

Con respecto a la producción de los pozos, en la **Figura 13** se muestra la ubicación de los pozos de tres plataformas que concentran las mayores producciones de aceite en promedio de 8,000 a 14,000 barriles diarios por pozo, a nivel de Cretácico Superior. Las plataformas Z-D y M-B se ubican en una zona caracterizada por un pliegue detachment con geometría de caja; las fallas inversas que la delimitan generan

condiciones más favorables para la producción. Mientras que la plataforma M-D se ubica en el sinclinal; sin embargo, esta zona se caracteriza por presentar acortamiento causado por la dirección del esfuerzo compresivo principal del Mioceno y el esfuerzo contra regional, lo que propició las condiciones para mantener una producción alta y permeabilidades por arriba de 10 md.



**Figura 13.** Pozos de las plataformas Z-D, M-D y M-B con mayor producción.



Con este modelo de deformación reinterpretado a partir de datos sísmicos migrados en profundidad es posible dar respuesta a las diferencias importantes en el comportamiento dinámico observado entre la parte oeste de los campos Zaap y Maloob en contraste con la parte central y este, que siguen siendo zonas productoras de aceite, pero en menor medida.

## Conclusiones

El uso de una nueva imagen sísmica PSDM permitió redefinir las estructuras jurásicas extensionales y reconocer las condiciones iniciales de depósito para el yacimiento del Kimmeridgiano, debido a que soluciona con mayor detalle la zona profunda de los campos. Se definieron las estructuras del campo Zaap y Maloob como pliegues detachment fallados, con variaciones en el tipo de geometría, entre los que se identificaron geometría de caja, por propagación de falla y por flexión de falla. Un punto importante para poder definir la geometría de los pliegues fue la calidad de la imagen que muestra en los flancos frontales, que se mejoró en gran medida por las etapas del procesamiento multicomponente, enfocado a representar la anisotropía del medio a través de la construcción de modelos de velocidades PP-PS ortorrómbicos. Del mismo modo las migraciones en profundidad con algoritmos Kirchhoff y RTM resuelven las zonas con alta complejidad estructural.

Con la identificación de los tipos de pliegue, se proponen los factores principales que controlan la geometría del pliegue en los campos Zaap y Maloob:

- Las propiedades dúctiles que conforman todo el paquete Jurásico (JST, JSK, JSO, Sal), actúan como horizontes detachment y sub-detachment que definen el estilo de pliegue de los campos
- La configuración de las estructuras Jurásicas extensionales determina la orientación de los bloques y la anisotropía de las facies del Jurásico Kimmeridgiano.
- Las variaciones de espesores en el periodo Cretácico están condicionadas por la configuración inicial del Jurásico.
- La dirección del vector principal de esfuerzo compresivo y el redireccionamiento local del esfuerzo durante los eventos compresivos del Mioceno.

El conocimiento y la comprensión de las variaciones en la geometría de las estructuras de los campos Zaap y Maloob, será de gran utilidad para interpretar y validar los resultados de las inversiones sísmicas azimutales PP en el yacimiento Cretácico. Así mismo la redefinición de las estructuras Jurásicas ayudará a tener un conocimiento mayor de las condiciones iniciales de depósito, para integrarlo con los resultados de las inversiones sísmicas conjuntas PP-PS en Jurásico Kimmeridgiano.

## Referencias

- Aguilera Franco, Noemí y Prado Peña, Marco Antonio. 2017. Catálogo de Campos Zaap y Maloob JSK. México: PEP.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J. y Kluth, C. 2012. *Structural Geology of Rocks and Regions*, third edition. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Derikvand, B., Alavi, S. A., Fard, I. A. et al. 2019. Changing in Fold Geometry from Faulted Detachment Fold to Fault-bend Fold, a Case Study: The Zeloï Anticline in the Dezful Embayment, Southwest of Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **173** (February): 381-401. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.033>.
- Mitra, S., Durán González, J. A., García Hernández, J. et al. 2006. Structural Geometry and Evolution of the Ku, Zaap and Maloob Structures, Campeche Bay, Mexico. *AAPG Bulletin* **90** (10): 1565-1584. <https://doi.org/10.1306/04240605101>.
- WesternGeco. 2018. Informe Final de Procesamiento Multicomponente PSTM y PSDM en el Subvolumen IKEB-APC. Villahermosa, Tabasco: WesternGeco (agosto 2018).

## Semblanza de los autores

### Gustavo Gutiérrez Vázquez

Ingeniero Geofísico egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Ha participado en el desarrollo de proyectos de adquisición sísmica 2D como geofísico en COMESA y SINOPEC. En 2014 ingresó a Petróleos Mexicanos en el Activo de producción Ku Maloob Zaap en el área de Caracterización de Yacimientos en la especialidad de Geofísica. Actualmente se desempeña en la interpretación sísmica de los campos Ku Maloob Zaap, análisis sísmico y documentación en el proceso VCD para pozos en perforación y seguimiento geológico de pozos en intervención.

### Reynaldo Castellanos Calvo

Ingeniero Geofísico por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. En sus inicios profesionales, laboró en el Instituto Mexicano del Petróleo en la Gerencia de procesamiento de datos sísmicos marinos y terrestres 2D y 3D. Desde 1999 a la fecha ha laborado en Pemex, en las áreas de Exploración y Producción, recientemente realizó actividades de supervisión en el diseño, adquisición y procesamiento del proyecto sísmico multicomponente KMZ3D3C. En el Grupo Multidisciplinario de Especialistas Técnicos de Diseño de Proyectos. Suptcia. de Caracterización de Yacimientos Activo de Producción Ku-Maloob-Zaap (AS01-02), participó como líder del grupo de interpretación sísmica. Actualmente está adscrito a la Subdirección Técnica de Exploración y Producción en la Gerencia de Planes de Explotación.

### Pedro Ernesto Villaseñor Rojas

Es Ingeniero Geólogo egresado en 1988 de la ESIA del IPN. Cursó la Maestría en Exploración de Recursos Naturales del Subsuelo, en la Facultad de Ingeniería de la UNAM de 1997-1999. Doctorado en Ciencias Geológicas en la Universidad de Cergy Pontoise-Instituto Francés del Petróleo en el año 2000-2003. Trabajó en el Instituto Mexicano del Petróleo de 1988 a 2017. Actualmente es profesional independiente.