

Versión preliminar del artículo
Draft versión of the paper

**Análisis de atributos sísmicos para delimitar las facies oolíticas de la
Formación San Andrés del Jurásico Superior (Kimmeridgiano), en el sur de la
Cuenca Tampico-Misantla, México**

por / *by*

**Joel Rosales Rodríguez, Dainiel Valdés Suárez y
Jose Manuel Grajales Nishimura**

ACEPTADO EN / *ACCEPTED IN*
Revista Mexicana de Ciencias Geológicas

Análisis de atributos sísmicos para delimitar las facies oolíticas de la Formación San Andrés del Jurásico Superior (Kimmeridgiano), en el sur de la Cuenca Tampico-Misantla, México

Joel Rosales Rodríguez^{1,2}, Dainiel Valdés Suárez³, Jose Manuel Grajales Nishimura⁴

¹ Gerencia de Geología Predictiva, Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152 (Edificio 20, Cubículo 126), Colonia San Bartolo Atepehuacan, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México, C.P. 07730, México.

² Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional, México.

³ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

⁴ Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

* *jrrodri@imp.mx*

RESUMEN

En sistemas carbonatados, la heterogeneidad de las rocas influye de manera negativa en la calidad de la imagen sísmica, lo cual hace compleja la interpretación de la continuidad de sus facies sedimentarias. El uso de atributos sísmicos se ha convertido en una herramienta crucial para resaltar rasgos geométricos asociados con el ambiente de depósito, estratigrafía interna, continuidad o discontinuidad estratigráfica, así como cambios litológicos de los sistemas carbonatados.

Las litofacies de la Formación San Andrés se delimitaron a partir de atributos sísmicos aplicados en el volumen sísmico. Los atributos sísmicos de Isofrecuencia, Frecuencia Instantánea, GLCM, *Envelope*, *Local Flatness* y Descomposición Espectral mostraron una mayor eficiencia en la delimitación de las litofacies de la Formación San Andrés. En el campo San Andrés predominan las litofacies de grainstone oolítico, las litofacies de packstone-grainstone oolítico se definen en la porción oriental del campo Remolino y sur del campo San Andrés. En el occidente del campo Remolino se definen principalmente las litofacies de grainstone.

Las litofacies de grainstone oolítico están controladas por la geometría del alto de basamento, ubicándose principalmente en sus flancos NE y SW, en el campo San Andrés y noroeste del campo Hallazgo.

Palabras claves: atributos sísmicos, litofacies, grainstone oolítico, basamento.

ABSTRACT

In carbonate systems, the heterogeneity of the rocks negatively influences the quality of the seismic image, which makes the interpretation of the continuity of their sedimentary facies complex. The use of seismic attributes has become a crucial tool to highlight geometric features associated with the deposition environment, internal stratigraphy, stratigraphic and structural continuity, or discontinuity, as well as lithological changes of carbonate systems.

Lithofacies of San Andrés Formation were delimited from seismic attributes applied to seismic volume. The seismic attributes of Isofrequency, Instantaneous Frequency, GLCM, Envelope, Local Flatness and Spectral Decomposition showed a higher efficiency in lithofacies delimitation of San Andrés Formation. In San Andreas field, oolitic grainstone lithofacies predominate, oolitic packstone-grainstone lithofacies are defined in the east of Remolino field and south of San Andrés field. In the west of the Remolino field, the grainstone lithofacies are mainly defined.

Oolitic grainstone lithofacies are controlled by basement height geometry, located mainly on their NE and SW flanks, in the San Andrés field and northwest of the Hallazgo field.

Key words: seismic attributes, lithofacies, oolitic grainstone, basement

INTRODUCCIÓN

En el subsuelo de la Cuenca Tampico Misantla las facies carbonatadas del Jurásico Superior Kimmeridgiano toman importancia a partir de los resultados de producción de hidrocarburos obtenidos con la perforación de los pozos San Andrés-1, San Andrés-2 y San Andrés-3, que permitió el posterior descubrimiento y desarrollo de los campos petroleros Remolino, Hallazgo, Gran Morelos, Guadalupe y Riachuelo, cuya producción de hidrocarburos es significativa en la historia petrolera de México (Carrillo-Martínez, 1980; PEMEX, 2011 Guzmán-Arellano, 2012).

A partir de muestras de núcleo y de canal de los pozos perforados en los campos San Andrés, Hallazgo y Gran Morelos, en el sur de la Cuenca Tampico-Misantla, Carrillo-Martínez (1960) define como calizas San Andrés o Formación San Andrés, a las secuencias carbonatadas del Kimmeridgiano, diferenciadas en tres facies sedimentarias: i) facie cretosa (calizas cretosas); ii) facie calcarenítica (calcarenitas con oolitas de tamaño fino a medio, en matriz calcárea) y iii) facie oolítica (oolitas de tamaño fino a medio, en matriz calcárea). En el campo Tamaulipas-Constituciones, ubicado en el norte de la cuenca, Aguilera-Hernández (1972), Stabler (1972) y Pierdant-Cuevas (1983) definen como formación San Andrés a las facies carbonatadas de grainstone oolítico, grainstone litoclástico y grainstone de bioclastos, con ocasionales boundstone de corales y algas hacia la base de la formación.

La Formación San Andrés se reporta en el subsuelo de la Cuenca Tampico Misantla, principalmente en el sur y norte de la Faja de Oro, así como en afloramientos ubicados al sur y sureste de la cuenca (Figura 1).

En el sur de la Cuenca Tampico-Misantla, en los campos Remolino, San Andrés, Hallazgo es donde Carrillo-Martínez (1960) diferencia tres de la Formación San Andrés, sin embargo, Silva-Mendoza (2004) únicamente reporta dos facies: grainstone biógeno y grainstone oolítico (Figura 2a). La Formación San Andrés también se reporta en los campos, Riachuelo, Gran Morelos y Paso de Oro, ubicados en el sur de la cuenca.

En el norte de la Cuenca Tampico-Misantla, la Formación San Andrés se reporta en los campos terrestres Rancho Nuevo, Pontón, Los Cues y Tamaulipas-Constituciones, así como en los campos marinos de aguas someras Arenque y Corvina. En el campo Los Cues, Sánchez-Rosas (1972) reporta areniscas de cuarzo en la base de la Formación San Andrés, sobreyacida por facies lagunares y facies de grainstone oolítico en la cima de la formación (Figura 2b). Stabler (1972) define las facies de boundstone de corales y grainstone oolítico para la formación San Andrés en el campo Tamaulipas-

Constituciones; en tanto que, Silva-Mendoza (2004) define tres facies para el campo Tamaulipas (packstone-grainstone de bioclastos, packstone-grainstone de oolitas, grainstone oolítico) y dos facies en el campo Constituciones (wackestone-packstone de peletoides y oolitas, areniscas arcósicas), considerando un cambio lateral de estas facies de la Formación San Andrés (Figura 2c).

En aguas someras de la Cuenca Tampico-Misantla, los trabajos iniciales del campo Arenque reportan tres facies para la Formación San Andrés, calizas de grano fino, terrígenos y oolitas (Sanchez-Trejo, 1983; Pérez-Rodríguez, 1991). Horbury et al. (1996), a partir de un análisis petrográfico detallado en 34 pozos del campo Arenque, define cinco facies sedimentarias y dos superficies de erosión para la Formación San Andrés (Kimmeridgiano), en la base describe a las secuencias de conglomerado basal que descansa sobre el basamento ígneo, seguido por micritas brechadas y ambas limitadas por una superficie de erosión; en la parte media de la formación, describe una secuencia de conglomerados calcáreos y areniscas (miembro terrígeno) sobreyacida por facies de packstone y grainstone peloidal, ambas también limitadas por una superficie de erosión; y en la cima de la formación San Andrés define la facie de grainstone oolítico con bioclastos (Figura 3a). Posteriores trabajos en el Campo Arenque diferencian cinco a seis facies sedimentarias de la Formación San Andrés (Vera-Sánchez, 2003; Cano y Sanchez, 2013; Rodríguez-Dávila, 2015), en la parte inferior se describen sedimentos terrígenos y marinos descansando sobre el basamento, mientras que la parte superior es caracterizada por la presencia de grainstone de oolitas (Figura 3b).

Al suroeste y sur de la Cuenca Tampico-Misantla, en los estados de Puebla y Veracruz, se reportan afloramientos de la Formación San Andrés (Carrillo-Martínez, 1960; Hernández-Medina, 1996; Olivella-Ledesma, 1996). Olivella-Ledesma (1996) describe tres miembros de la Formación San Andrés en las localidades Texcatepe-Pie de la Cuesta, Río Chiflón y Cuauhtepic, en donde el miembro superior es caracterizado por grainstone y packstone de ooides, el miembro medio mudstone y packstone de bioclastos y ooides, mientras que el miembro inferior únicamente en la localidad del Río Chiflón se describe como grainstone/packstone y packstone/grainstone de ooides (Figura 4a). Por otro lado, al sur de la cuenca Tampico-Misantla, Hernández-Medina (1996) describe cinco secciones estratigráficas utilizando la clasificación de facies estándar de Wilson (Figura 4b), en las cuales predominan las litologías de las facie 6: packstone y packstone/grainstone de peloides y ooides (bancos de arenas carbonatadas), seguida de las facies 7: wackestone y packstone de pellets y bioclastos (plataforma interna) y facies 5: floatstone y blindstone (crecimiento orgánico y post-arrecife).

Tanto en afloramiento como en subsuelo, la heterogeneidad litológica de la Formación San Andrés es reflejada por la distribución espacial y temporal de las facies sedimentarias descritas, asociada a la paleotopografía, distribución espacial de los depocentros, cambios relativos del nivel del mar y ambientes de depósito desarrollados durante el Jurásico Superior Kimmeridgiano. Así, en algunas áreas se reportan hasta 8 facies sedimentarias de la Formación San Andrés, como se describe en el afloramiento Hueytamalco (Hernandez de la Fuente, 1996), o bien una sola facie sedimentaria, como se reporta en subsuelo en los pozos Hallazgo-80, San Andrés 194 y San Andrés-254, donde únicamente se identifican las facies oolíticas descansando sobre el basamento y sobreyacida por la Formación Pimienta (Galván-Castillo, 1999).

Con base en lo anterior, la correlación de las facies sedimentarias de la formación San Andrés en el subsuelo requiere el uso de métodos y datos geofísicos, con cobertura tridimensional, que permitan identificar y mapear la distribución de las facies sedimentarias, a partir de la correlación entre los datos geofísicos y propiedades físicas de secuencias carbonatadas, sin perder de vista ambas escalas de observación y sus resultados en el contexto paleogeográfico y estratigráfico regional/semiregional.

En sistemas carbonatados, como la Formación San Andrés, la heterogeneidad intrínseca de las rocas tiene influencia negativa en la calidad de la imagen sísmica, imprimiéndole poca resolución vertical, baja coherencia de reflectores, altas amplitudes en configuración de plataformas pero bajos contrastes de amplitudes en su interior, zonas con ausencia de reflexiones y bajas frecuencias, debido principalmente a sistemas de poros complejos, e inconsistencias laterales y verticales de sus propiedades físicas como resultado de su vulnerabilidad a los procesos diagenéticos (Palaz y Marfurt, 1997; Skirius et al., 199; Sarg y Schuelke, 2003; Chopra y Marfurt 2007; Valencia-Lozada, 2010; Rezvandehy et al., 2011; Roque-Chirinos, 2016). Por lo tanto, el uso de atributos sísmicos es imperativo para disminuir la incertidumbre de la interpretación geológica-geofísica de los datos sísmicos en el subsuelo.

Las investigaciones sobre física de rocas son la base cuantitativa en la correlación de los efectos de las propiedades físicas de las rocas sobre los datos sísmicos (Chopra y Marfurt, 2007). Los atributos sísmicos son una de las herramientas más empleadas en el proceso interpretativo de la imagen sísmica y son mediciones específicas de características geométricas, cinemáticas, dinámicas o estadísticas, obtenidas a partir de datos sísmicos de reflexión (Arenas-Márquez, 2012; Pérez-Aquiáhuatl, 2017). El uso de los atributos se centra en destacar aspectos no evidentes contenidos en el dato sísmico, con el

objetivo de resaltar cambios litológicos, definir geometrías sedimentarias de depósito o deformación, resaltar discontinuidades, identificar las secuencias estratigráficas, fallas, acuñamientos, así como cambios de facies, tanto en sistemas carbonatados como sistemas siliciclásticos (Miró-Pagés, 2015; Chopra y Martfurt, 2007). Una facie sísmica puede ser definida como una región en el volumen de datos sísmicos que tiene patrones de reflexión característicos (Barreto, 2004), definidos por la configuración, continuidad, amplitud y frecuencia.

La extracción de las propiedades geométricas o físicas de la información sísmica, para su interpretación como sismofacies o litofacies, es posible a partir de software de interpretación sísmica (ej. Petrel, PaleoScan, OpendTec, etc.), basados en algoritmos relacionados a las variables involucradas en la reflexión sísmica, o bien a partir de la aplicación de algoritmos a software desarrollados por universidades o centros de investigación.

En este trabajo se presenta un análisis de la distribución geométrica de las propiedades físicas extraídas del volumen sísmico que cubre los campos San Andrés, Hallazgo y Remolino mediante la aplicación de atributos sísmicos, con el objetivo de definir las litofacies de la Formación San Andrés en el subsuelo de los campos petroleros referidos, mismas que son calibradas con litofacies y electrofacies, definidas a partir de núcleos y registros geofísicos de pozos, respectivamente.

ATRIBUTOS SÍSMICOS E INTERPRETACIÓN SÍSMICA

De manera general, los atributos sísmicos se clasifican de acuerdo con su utilidad identificable. Chen y Sydney (1997) clasifican los atributos sísmicos en categorías dinámicas/cinemáticas y características geológicas del yacimiento; Taner et al, (1994) mencionan que los atributos sísmicos proporcionan información cualitativa de la geometría y parámetros físicos del subsuelo, por lo tanto, los divide en atributos geométricos (o configuración de reflexión) y atributos físicos (o de características de reflexión). Algunas clasificaciones se basan en el dominio en el cual se obtienen (tiempo, amplitud y frecuencia) (Guerrero et al., 2010). En este trabajo, se utilizó la clasificación de atributos geométricos y físicos propuesta por Taner et al. (1994), Taner (2001) y Miró-Pagés (2015), así como el software Petrel para extracción de los atributos sísmicos de base para mapear la distribución de las facies sísmicas de la Formación San Andrés.

Atributos geométricos

Estos atributos se desarrollaron para definir las características geométricas de estratigrafía de secuencias sedimentarias (Tamayo-Lopez et al., 2013). Son utilizados como soporte en la interpretación de la geometría estratigráfica (eventos de continuidad y discontinuidad estratigráfica) y estructural (fallas, geometría de deformación) de los datos sísmicos 3D. La mayor parte de los procesos utilizados por los atributos geométricos resaltan las características estructurales a partir del patrón de los reflectores sísmicos (ej. *Ant-Tracking*, desviación de la inclinación, Magnitud del Gradiente, buzamiento-azimut, varianza, etc.). De este grupo de atributos, los atributos de buzamiento-azimut y varianza, resultan más eficaces y se utilizan como apoyo en la interpretación de la geometría estratigráfica.

Buzamiento-azimut: identifica fallas y discontinuidades a partir de los cambios de inclinación y dirección de los reflectores sísmicos, por lo tanto, podría utilizarse para indicar cambios de facies sedimentarias.

Varianza: define variaciones laterales producidas por rasgos estructurales y estratigráficos (Chelotti et al., 2018), como resultado de un algoritmo para estimar la similitud entre trazas sísmicas sucesivas. Este atributo es efectivo en sísmica 3D, cuyo algoritmo es aplicado a una ventana móvil de dimensión fija y es una medida de la probabilidad de distribución de una variable muestreada al azar (Tabla 1).

Atributos físicos

Este grupo de atributos son utilizados para interpretar la litología y características del yacimiento, dado que, la amplitud es proporcional a los contrastes de impedancia acústica, las frecuencias están relacionadas con el espesor de los estratos y la absorción de la energía; mientras que, las velocidades sísmicas están directamente relacionadas con las propiedades físicas de las rocas (mineralogía, estructura y textura) (Echagarruga-Palomo, 2015).

Los atributos físicos más utilizados en el análisis de facies o características estratigráficas en sistemas carbonatados son:

Isofrecuencia: es un método de descomposición espectral que utiliza frecuencias definidas, que permite aislar frecuencias dependientes de los cambios en la señal sísmica y detectar cambios

litológicos. Resulta de un valor del coseno de la correlación cruzada para cada frecuencia seleccionada (Pérez-Hernández, 2016), en un rango que varía desde -1 a 1, significando estos valores una señal con buena correlación, cuando es cero indica una señal no correlacionada. Define el número de ciclos, que determinará la longitud de la ventana de correlación (Tabla 1). Resalta variaciones en litología y puede indicar trampas estratigráficas (Abdelfattah-Sarhan, 2017).

*T*Attenuation*: representa la pérdida diferencial de las altas frecuencias relativa a las bajas frecuencias. Es un atributo desarrollado para indicar las fracturas dentro del volumen sísmico, dado que las fracturas atenúan las altas frecuencias, por lo tanto, una comparación de las frecuencias por encima y por debajo de la capa fracturada captura el desplazamiento local hacia las bajas frecuencias (Fernández-Mederos, 2016). Físicamente, se tiene un algoritmo que calcula la magnitud espectral m (f , t) en dos frecuencias de referencia ($f_h > f_l$), en tiempos seleccionados para estar por encima y por debajo del punto de interés ($t_{inferior}$ y $t_{superior}$) (Tabla 1).

Chaos: consiste en analizar la variabilidad del dato sísmico en tres direcciones (σX , σY , σZ), para definir el radio de la ventana que se utilizará en el cálculo de la caoticidad de los datos sísmicos. Se grafica en una escala entre 0 y 1, donde las áreas con baja consistencia corresponden a regiones con patrones de señal caótica. Representa una medida de la carencia de organización en el método de estimación del buzamiento en trazas sísmicas consecutivas y describe cuán caótica es la señal sísmica (Fernández-Mederos, 2016). Es utilizado para reflejar fallas, fracturas, discontinuidades y diferenciar zonas con diferentes patrones de reflexión sísmica y es afectado por la migración del gas y sal alóctona (Abdelfattah-Sarhan, 2017).

Local Flatness: es un atributo estadístico con respuesta estratigráfica para diferenciar un medio de otro y aislar texturas. La principal variable estadística utilizada es la varianza, apoyándose en un filtro gaussiano de orientación cuyo tamaño controla el número de trazas horizontales y verticales a utilizar en la estimación del aplanamiento (Tabla 1). Este atributo representa la variación en la orientación del campo de ondas sísmicas, identificando la uniformidad de la señal. Puede resaltar las fallas y otras anomalías verticales, proporcionando información sobre el aplanamiento de la señal sísmica local (Abdelfattah-Sarhan, 2017).

Impedancia Acústica Relativa (IAR): es una suma de los valores de amplitud, calculados por integración de la traza sísmica, pasando el resultado a través de un filtro pasa alta, donde se filtran las amplitudes para reducir el ruido de baja frecuencia introducido. Asumiendo que el dato es de fase cero

y de amplio ancho de banda, la impedancia acústica relativa se obtiene integrando la parte real de la traza sísmica. Para k muestras se expresa matemáticamente con la ecuación del Tabla 1. Físicamente, la integración de la traza aporta un estimado del registro natural de impedancia acústica (Fernández-Mederos, 2016). Este atributo muestra el contraste acústico aparente, indicando los límites de las secuencias, superficies de disconformidad y discontinuidades, aunque también puede indicar porosidad o contenido de fluidos en el yacimiento (Abdelfattah-Sarhan, 2017).

Root Mean Square (RMS) Amplitude: este atributo responde a la reflectividad en un conjunto de datos sísmicos, resaltando los contrastes de impedancia acústica (Abdelfattah-Sarhan, 2017). Se calcula mediante la raíz de la suma del cuadrado de las amplitudes para muestras de trazas simples $T(i)$, sobre una ventana vertical con una longitud de n muestras. Para cada muestra en una traza de entrada (T, i) se obtiene la amplitud RMS (Tabla 1).

Sweetness: es la aplicación combinada de los atributos *Envelope* y Frecuencia Instantánea Es usado para identificar rasgos donde el conjunto de energía cambia en los datos sísmicos (Miró-Pagés *et al.*, 2014, Tabla 1).

Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM): es un método introducido por Haralick *et al.* (1973) y considerado como una de las estrategias originarias para el análisis textural de imágenes sísmicas (Vadakkeneveetil *et al.*, 2012). Las matrices de coocurrencia son útiles para el análisis textural, examinando imágenes en busca de características o patrones distintivos que reflejen variaciones litológicas.

Atributos Instantáneos

Además de estos atributos físicos, Pedro-Pompa (2015) sugiere tres atributos instantáneos basados en la amplitud, fase y frecuencia (Tabla 1), como apoyo en la interpretación estratigráfica y estructural de los datos sísmicos 3D.

Amplitud Instantánea: este atributo considera que altas amplitudes están provocadas por contrastes grandes de impedancia acústica, como variaciones litológicas por cambios en ambiente de depósito.

Fase Instantánea: este atributo enfatiza la continuidad de las reflexiones (estratificación) y resalta eventos débiles (canales y abanicos).

Frecuencia Instantánea: describe la frecuencia característica de los eventos y la variación de este parámetro en función del tiempo, reflejando continuidades estratigráficas y estructurales.

Li y Zheng (2008), bajo la premisa que la señal sísmica está compuesta por una suma de señales con diferentes frecuencias, sugiere el atributo de descomposición espectral para mostrar los datos sísmicos en sus componentes de frecuencias individuales. Este atributo se obtiene al aplicar la Transformada Rápida de Fourier (TRF), que descompone la señal en sus componentes espectrales para transformar las amplitudes sísmicas en función del espacio y el tiempo, en amplitudes espectrales en función de la frecuencia, el espacio y el tiempo (Tabla 1). El uso de este atributo ha demostrado eficiencia en diferenciar la litología, la presencia de fluidos y los cambios de facies (Wang y Dopkin, 2008, Welsh et al., 2008).

DATOS y METODOS

Para este trabajo se utilizó información sísmica 3D e información geológica y geofísica de 15 pozos proporcionados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) (Figura 5).

Los datos sísmicos son parte de un volumen sísmico 3D adquirido en 2011, migrado en tiempo después de la suma de las trazas y con una cobertura en el área de los campos Remolino, San Andrés y Hallazgo. Este volumen sísmico está compuesto por 1301 *inlines* y 1401 *crosslines*, ambas con una separación de 25 m. La resolución vertical del dato sísmico se calculó utilizando la longitud de onda (λ):

$$\text{Resolución vertical} = \lambda/4 \dots\dots\dots\text{Ec. 1}$$

donde, $\lambda = V_{\text{int}}/f$, y V_{int} es la velocidad interválica a la profundidad de interés (m/s), f es la frecuencia predominante a la profundidad considerada, estipulada mediante el atributo de Frecuencia Dominante en la posición del pozo (27 Hz). La velocidad de intervalo se calculó a partir de:

$$V_{\text{int}} = (z_2 - z_1) / (t_2 - t_1) \dots\dots\dots\text{Ec. 2}$$

donde, z_1 y z_2 son profundidad de cima y base del intervalo de interés, respectivamente; t_1 y t_2 son el tiempo asociado a la cima y la base del intervalo. Para ello se utilizó el registro VSP del pozo R102, y el análisis se centró en un intervalo reportado como Jurásico Superior Kimmeridgiano. Así la $V_{\text{int}}=3100$ m/s, por lo tanto, $\lambda=114.81$ m y la resolución vertical es de 28.70 m.

Los pozos fueron seleccionados con base a su profundidad estratigráfica (que atraviesan el Kimmeridgiano), la disponibilidad de núcleos de pozo y registros geofísicos de pozo, además de estar dentro del área con cobertura del dato sísmico (Figura 5). En cada uno de los pozos se analizaron y editaron los registros geofísicos para su calibración con la litología descrita, tanto de los núcleos de pozo como de la descripción litológica del intervalo del Jurásico Superior Kimmeridgiano disponible en el informe final de cada pozo. En este análisis y edición de los registros se consideró que el intervalo litológico del Kimmeridgiano es delimitado en su cima por la secuencia arcillosa de la Formación Pimienta (Jurásico Superior Tithoniano) y en su base por las rocas del basamento ígneo (granitos y granodioritas del Pérmico-Triásico) o las unidades terrígenas y marinas del Jurásico Medio (Figura 6), dependiente de la ubicación del pozo y la configuración paleogeográfica previo al Kimmeridgiano, depocentro o alto de basamento.

En los registros geofísicos calibrados con la litología de núcleos y columna geológica descrita, se identificaron los patrones generales de las curvas de los registros geofísicos y definieron las electrofacies y litofacies del Jurásico Superior Kimmeridgiano (Figura 7). Para la Formación San Andrés se definieron cinco litofacies: grainstone oolítico, packstone oolítico, wackestone-packstone oolítico dolomitizado, mudstone-wackestone dolomitizado y packstone; mientras que en la Formación Taman únicamente: mudstone arcilloso con intercalaciones de lutita (Tabla 2).

Para correlacionar las electrofacies y litofacies en el subsuelo del área de estudio, mediante la información sísmica 3D, los datos de pozos se convirtieron al dominio de tiempo utilizando la ley de velocidad disponible en el pozo R102 y la calibración de los registros DT y RHOB del pozo S254. Con esta calibración se obtuvo la relación tiempo-profundidad, que junto con la ondícula representativa del dato sísmico permitió generar el sismograma sintético y con ello el ajuste entre los datos de pozo con los reflectores sísmicos. A partir del ajuste pozo-sísmica en el dominio de tiempo, fueron interpretados cuatro horizontes: cima de la Formación Pimienta, cima y base de la Formación San Andrés (intervalo del Kimmeridgiano) y cima de basamento.

Como control geométrico de interpretación se utilizaron la cima de la Formación Pimienta y la cima del basamento. La Formación Pimienta representa una superficie de máxima inundación, por lo que sus características sísmicas tienen buena definición regional (amplitud contrastante y regionalmente continua, bien conservada); mientras que, el basamento se consideró por su influencia en la sedimentación y distribución de litofacies (geometría de depocentros), así como por sus

características sísmicas que permiten su identificación (reflexiones internas desordenadas y con mucha opacidad, en algunas áreas ausencia de reflexiones).

En la mayor parte del área de estudio, la cima de la Formación San Andrés (Kimmeridgiano) se comporta paralela a la cima de la Formación Pimienta. Las secuencias que se acuñan con el basamento corresponden en su mayoría a la Formación Tepexic, reportada en pozos con mayor profundidad estratigráfica ubicados en áreas marginales a los depocentros.

El intervalo del Kimmeridgiano, sísmicamente presenta cambios laterales y verticales, relacionados con la variabilidad litológica y la heterogeneidad intrínseca de las rocas carbonatadas. En algunas áreas se observa una imagen sísmica menos saturada de reflexiones, frecuencias más bajas y ocasionalmente más pobre de eventos. Esto puede ser provocado por su matriz carbonatada discontinua, que propicia un patrón menos estratificado y rítmico de reflexiones, apoyado por una mayor absorción de la energía elástica. Por lo tanto, se tomaron los patrones específicos de apilamiento en los estratos y delimito su distribución, se analizó la configuración y terminación de las reflexiones para definir la distribución de litofacies, y con ello definir la base del intervalo Kimmeridgiano.

MODELO DE LITOFACIES DEL JURÁSICO SUPERIOR KIMMERIDGIANO

Par dar continuidad a la litofacies del intervalo del Kimmeridgiano, se aplicaron los atributos sísmicos de Isofrecuencia, *Chaos*, Frecuencia Instantánea, GLCM, *Envelope*, Amplitud RMS, *Local Flatness* y Fase Instantánea, para resaltar geometría estratigráfica, sedimentaria y propiedades litológicas, a partir de la diferenciación de texturas sísmicas, variación en contraste de impedancias, zonas fracturadas en mayor o menor proporción, absorción de frecuencias, relacionados a cambios de facies. Por lo tanto, los resultados corresponden geoméricamente con la distribución de las anomalías de las amplitudes sísmicas, más no corresponden en magnitudes obtenidas (ej. altas amplitudes con altas frecuencias, o mayores valores caoticidad).

Los resultados de los atributos sísmicos se muestran en cuatro secciones sísmicas, dos en el Campo San Andrés-Remolino y dos en el campo Hallazgo, para definir la distribución de las facies de la Formación San Andrés.

Distribución de litofacies en los campos Remolino y San Andrés

Para estos campos, la distribución de las litofacies es obtenida con la aplicación de los atributos de Isofrecuencia, *Chaos*, Frecuencia Instantánea y GLCM en dos secciones sísmicas.

Sección 1

Esta sección se construyó con los pozos R103, R102, S265, S254 y S194 (Figura 8c). En los pozos seleccionados se definen cuatro litofacies para el intervalo del Kimmeridgiano: grainstone, packstone-grainstone oolítico, grainstone oolítico y mudstone arcilloso. En todos los pozos la Formación Pimienta sobreyace al Kimmeridgiano, y subyaciendo en el pozo R102 se reporta basamento metamórfico, mientras que en los pozos S265 y S254 se reporta basamento ígneo.

Para la correlación de las litofacies definidas para el Kimmeridgiano fueron aplicados los atributos Isofrecuencia y *Chaos*.

Con el tributo de Isofrecuencia (10 Hz), utilizado para definir cambios litológicos, espesores de estratos o cuerpos sedimentarios, se observa que, los valores más bajos de frecuencia corresponden a las facies de packstone-grainstone oolítico y las mayores frecuencias a las facies de grainstone oolítico (Figura 8a). Estas facies de oolíticas se ubican principalmente en el borde noroeste de la plataforma, con un ligero engrosamiento en la parte superior del talud. Lateralmente cambia a la litofacies de grainstone, al suroeste del área en los pozos R103 y R102. Pedro-Pompa (2015) y Tamayo-Castellanos (2015) comprobaron que los atributos de Isofrecuencia a 10 Hz arrojan resultados favorables en medios carbonatados. Pérez-Hernández (2016) resalta el uso del atributo de Isofrecuencia para delimitar facies carbonatadas.

Aplicando el atributo de *Chaos*, utilizado para definir continuidad o heterogeneidad litológica a partir de los patrones de reflexión sísmica, se identifican áreas de distintos patrones de reflexión sísmica, con una distribución similar a las litofacies identificadas con el atributo de Isofrecuencia (Figura 8b). La facies de grainstone presenta los mayores valores de *Chaos* (>0.5), lo que refleja una baja consistencia en la uniformidad de la señal. Geológicamente, este comportamiento puede responder a rocas con mayor grado de fracturamiento, como se evidencia en los pozos REM-102, REM-103, REM-1 y REM-2. La facies de grainstone oolítico, presenta valores cercanos a cero, que puede asociarse a litologías poco afectadas por fracturamiento, observándose además una buena continuidad

de los reflectores sísmicos para esta facies. La facies de packstone-grainstone oolítico presentó una mayor ocurrencia de eventos caóticos (valores medios entre 0.2 y 0.3), interpretándose como un mayor grado de fracturamiento en la secuencia. Las facies de *mudstone* arcilloso, en la base del Kimmeridgiano, se presentan bajos valores de caoticidad.

Con ambos atributos, en esta sección las facies oolíticas están delimitadas sobre bloque elevado del basamento y sobreyacen a las litofacies de mudstone arcilloso. Estas facies oolíticas se caracterizan en su base por grainstone oolítico y packstone-grainstone oolítico en la parte superior.

Sección 2

Esta sección construida con los pozos R2, R1, S265 y S255 (Figura 9c), en los que se identifican las litofacies de grainstone, packstone-grainstone oolítico, grainstone oolítico y mudstone arcilloso, en el intervalo del Kimmeridgiano. En el pozo S255 se reporta la Formación Chicontepec sobreyaciendo a la Formación San Andres, como resultado del proceso de formación y desarrollo del paleocañón Terciario Chicontepec (Carillo-Bravo, 1980). En el resto de los pozos la Formación Pimienta sobreyace al intervalo del Kimmeridgiano. Subyaciendo al intervalo del Kimmeridgiano, en los pozos S265 y S255 se reporta el basamento ígneo, mientras que en el pozo R1 se reportan los lechos rojos.

Para la correlación de las litofacies fueron aplicados los atributos Frecuencia Instantánea y GLCM.

Con el atributo de frecuencia instantánea, el intervalo del Kimmeridgiano es representado por frecuencias entre 5 y 35 Hz. Las menores frecuencias se observan en la litofacies de mudstone arcilloso de la base del intervalo, indicando una atenuación de las componentes ondulatorias de altas frecuencias debido a la litología. Las mayores frecuencias (entre 25 y 35 Hz) se observan en la litofacies de grainstone oolítico (Figura 9a). Las facies de packstone-grainstone oolítico presenta frecuencias entre 15 y 25 Hz, en la que se puede interpretar que el fracturamiento atenúa las altas frecuencias. Esto último es consistente con las fracturas que se reportan en los pozos S265, R2 y S254 para este intervalo de profundidad.

El atributo GLCM permitió diferenciar estratigráficamente las litofacies, a partir de la continuidad y discontinuidad de las texturas sísmicas (Figura 9b), indicada con base en la escala de colores utilizada en este atributo, donde el color rojo representa los reflectores de máxima continuidad

y el color azul las zonas más caóticas. Para el intervalo del Kimmeridgiano, la mejor continuidad se observó en las facies de grainstone oolítico, mientras que, las mayores discontinuidades corresponden a las facies grainstone. Los valores obtenidos en la facies de packstone-grainstone oolítico (0.4 y 0.75) se justifican por la presencia de las fracturas reportadas en los pozos.

En esta sección, en el bloque más elevado del basamento se identifican las litofacies de mudstone sobreyacidas por la litofacies de packstone-grainstone oolítico. Las litofacies de grainstone oolítico están distribuidas en el flanco noroeste del alto de basamento, con una estratificación semejante a la de la sección anterior.

Harilal et al. (2008), Valencia (2010), Pedro-Pompa (2015) y Pérez-Hernández (2016) destacan que el atributo de Frecuencia Instantánea ofrece una buena respuesta en medios carbonatados, como se observó en la distribución de litofacies en esta sección. Por su parte, Tamayo-Castellanos (2015) demostró la validez del atributo GLCM para resaltar discontinuidades, como se observó en el campo Remolino y San Andrés.

Distribución de litofacies en el campo Hallazgo

La distribución de las litofacies en este campo es obtenida con la aplicación de los atributos *Envelope*, Amplitud RMS, *Local Flatness* y Fase Instantánea sobre las secciones 3 y 4.

Sección 3

Esta sección se ubica al sur del área de estudio y se construyó a lo largo de los pozos H31, H80, H101 y MG3 (Figura 10c). En estos pozos, se reporta a la Formación Pimienta sobreyaciendo al intervalo del Kimmeridgiano; mientras que subyaciendo se reportan lechos rojos en el pozo H31 y basamento ígneo en los pozos H80 y H101. A partir de la correlación litológica de los pozos se describen únicamente tres litofacies: packstone-grainstone (cretosa), packstone-grainstone oolítico y grainstone oolítico, y su correlación en la sección es aplicando los atributos *Envelope* y Amplitud RMS.

Con los resultados del atributo *Envelope* se observa que la litofacies de packstone-grainstone oolítico se define por alta reflectividad, atribuida a la presencia de cementante en las fracturas que se reporta en los pozos S265, R2, H101 y S254, imprimiendo un elevado contraste de amplitud. Las facies de grainstone oolítico y packstone-grainstone cretosa presentan valores bajos de reflectividad, esta

última con mayores cambios internos de reflectividad (Figura 10a). La delimitación de litofacies del Kimmeridgiano es correspondiente a las variaciones observadas con el atributo de Amplitud RMS, donde las litofacies packstone-grainstone oolítico presenta los mayores valores de amplitud (3.50) y la litofacies packstone-grainstone cretosa presenta una mayor continuidad lateral (Figura 10b).

En esta sección, las litofacies de grainstone oolítico descansan sobre el basamento, resaltando la ausencia de la litofacies de mudstone arcilloso en la base de las facies oolíticas. A nivel del basamento no es clara la diferencia entre las Amplitudes RMS del basamento con las amplitudes RMS de las secuencias sedimentarias en los depocentros, sin embargo, su distribución es soportada por la morfología sísmica y columnas geológicas cortadas los pozos H31, HS1, SM3 y HS101.

En esta sección también se resalta que, los resultados de los atributos sísmicos Envelope y amplitud RMS muestran valores semejantes entre los sedimentos de la Formación San Andres y los sedimentos de la base de las secuencias sedimentarias que le sobreyacen; sin embargo, por la correlación sísmica de la columna cortada por los pozos H31, H80, H110 y MG3 no se incluyen en las secuencias de la Formación San Andres.

Sección 4

La sección se construyó a lo largo de los pozos SMR3, HS101, HS1 y H80, en el sur del área de estudio (Figura 11c). En todos los pozos sobreyaciendo al Intervalo del Kimmeridgiano se reporta la Formación Pimienta; mientras que, subyaciendo en los pozos SMR3, HS101 y HS1 se reportan sedimentos terrígenos y basamento ígneo en el pozo H80. En esta sección se definen cuatro litofacies: packstone-grainstone cretosa, packstone-grainstone oolítico, grainstone oolítico y grainstone dolomitizado, que son correlacionadas aplicando los atributos *Local Flatness* y Fase Instantánea.

El atributo *Local Flatness* se presenta con una escala de valores entre 0 y 1, donde los valores cercanos a 1 representan una menor uniformidad. Con base a esta uniformidad, se pueden diferenciar las litofacies de packstone-grainstone oolítico de la facies de grainstone oolítico (Figura 11a), éstas últimas con una amplia distribución y una mayor uniformidad. Las litofacies packstone-grainstone cretosa presenta la menor uniformidad (>0.6), lo que permitió su delimitación al sureste del campo Hallazgo. Las litofacies de grainstone dolomitizado se delimitan a la base del intervalo entre los pozos HS-101 y HS1, con una uniformidad semejante a la de la litofacies de packstone-grainstone oolítico.

El atributo de Fase Instantánea se utilizó para resaltar la continuidad lateral del dato sísmico, buscando que los eventos débiles aparezcan con la misma relevancia de los eventos más pronunciados, con una escala de variaciones de fases entre -150 y 150 grados. La litofacies de grainstone oolítico se expresa con reflectores de buena continuidad e interrumpida en las proximidades del pozo HS-101 (Figura 11b), que representa el cambio de litofacies a packstone-grainstone oolítico ligeramente fracturado, de acuerdo con la descripción de los núcleos de pozo. La litofacies de packstone-grainstone cretosa se caracteriza por valores caóticos en cuanto a la continuidad, y la litofacies grainstone dolomitizado es poco clara su delimitación con este atributo.

En esta sección, con el atributo *Local Flatness* también se observa que las litofacies de grainstone oolítico descansan sobre el alto del basamento, con ausencia de las litofacies de mudstone arcilloso en la parte inferior y de packstone-grainstone oolítico en la parte superior.

Modelo de distribución de litofacies de la Formación San Andrés

Para el desarrollo del modelo de distribución de litofacies de la Formación San Andrés en los campos Remolino, San Andrés y Hallazgo, en el volumen sísmico se aplicaron los atributos sísmicos de Isofrecuencia, *Chaos*, Frecuencia Instantánea, *Grey Level Co-occurrence Matrix* (GLCM), *T*Attenuation*, *Envelope*, Amplitud RMS, Varianza, *Local Flatness*, Fase Instantánea, Impedancia Acústica Relativa (IAR) y Descomposición Espectral. El modelo de distribución de litofacies se define a partir de la integración y análisis de los resultados obtenidos, seleccionando únicamente los resultados de los atributos que presentan una mayor eficiencia en la delimitación de las facies de la Formación San Andrés (Tabla 3). Los atributos sísmicos de Isofrecuencia, Frecuencia Instantánea, GLCM, *Envelope*, *Local Flatness* y Descomposición Espectral, son los que mostraron mayor eficiencia en la delimitación de litofacies de la Formación San Andrés.

Para este modelo de litofacies también se seleccionó un corte en tiempo a 2100 ms, que es representativo de la mayor distribución de las litofacies oolíticas de la Formación San Andrés. Sobre este corte en tiempo, se interpretaron los polígonos de las facies identificadas con cada atributo sísmico. Finalmente, la distribución de las facies se define a partir de la sobreposición de los polígonos de las facies identificadas.

Sobre el corte en tiempo de 2100 ms, en los campos Remolino y San Andrés se interpreta que las litofacies grainstone oolítico son predominantes y que la litofacies de packstone-grainstone oolítico se

ubican en sus bordes oriental y occidental. En el oeste del campo se identificaron las litofacies de grainstone, mientras que en el suroeste las litofacies de mudstone (Figura 12a). Las áreas de basamento somero están en los pozos R103, R102, S255, S265 y S254, que están orientadas casi E-W en el sur del campo (Figura 12b), semejante al cambio lateral de litofacies identificadas a 2100 ms.

En el campo Hallazgo, a la profundidad de 2100 ms las litofacies predominantes son de grainstone oolítico, que cambian a grainstone al oeste del campo y a mudstone en el sureste del campo (Figura 12a). La menor profundidad del basamento es en los pozos H80 y H101, con una orientación preferencial NWW-SEE (Figura 12b).

En general, el basamento en el área de estudio se representa por un bloque elevado y orientado NW-SE, del campo Hallazgo al campo San Andrés, en los pozos de este último se registran las mayores profundidades.

El modelo de distribución de litofacies interpretado a 2100 ms sirvió de base para la extracción de litofacies oolíticas del Kimmeridgiano en el área de estudio. Estas litofacies fueron extraídas como un geocuerpo del intervalo del Kimmeridgiano, a partir de la combinación entre atributo *Envelope* (con filtros de 10, 20 y 30 Hz) y los atributos de mayor eficiencia en la diferenciación de litofacies. Con este modelo 3D se observa que, en el campo San Andrés predominan las litofacies de grainstone oolítico, las litofacies de packstone-grainstone oolítico predominan en la porción oriental del campo Remolino y sur del campo San Andrés, y las litofacies de grainstone se definen en la porción occidental del campo Remolino (Figura 13).

En el sur del área, en el campo Hallazgo las litofacies predominantes son de grainstone oolítico, con una distribución NWW-SEE. En los flancos este y sur del campo se definen las litofacies de packstone-grainstone oolítico. Sin embargo, en el noroeste del campo Hallazgo no se cuenta con pozos perforados o pozos con alcance estratigráfico del Kimmeridgiano que corrobore la distribución de las litofacies de grainstone oolítico.

De acuerdo con la geometría del basamento, las facies de grainstone oolítico se ubican principalmente en los flancos NE y SW del alto de basamento, con orientación semejante a la profundidad del basamento.

El modelo de litofacies es congruente con los cambios litológicos descritos por trabajos previos, tanto en la variación lateral como vertical de facies. La identificación de facies en los pozos analizados y su distribución en el subsuelo de los campos Hallazgo y San Andrés-Remolino, corresponde con las

facies mencionadas por Carillo-Martínez (1960) y Silva-Mendoza (2004), observando que, la presencia o ausencia de facies es asociada por la paleogeografía controlada por la geometría del basamento.

La localización y distribución de las facies del Kimmeridgiano reduce la incertidumbre del modelo sedimentológico y estratigráfico, lo cual favorece las fases de exploración petrolera en el área. Por lo tanto, desde el punto de vista geología petrolera, la distribución de las litofacies de grainstone oolítico al noroeste del campo Hallazgo podría representar interés exploratorio, dado que son las unidades litológicas con mejor característica de roca almacén para el intervalo del Jurásico Superior Kimmeridgiano (Escalera-Alcocer, 2010; Nieto-Serrano, 2010; Hernández-Medina, 2014; CNH, 2018).

Finalmente, la distribución de facies de la Formación San Andrés obtenidas puede apoyar la toma de decisiones en proyectos de uso o almacenamiento de CO₂ en campos petroleros maduros, como es el caso del campo San Andrés, por un lado, en la cuantificación volumétrica del almacenamiento o bien en el desarrollo de la estrategia de inyección. Sin embargo, es importante integrar los datos petrofísicos del yacimiento, rasgos diagenéticos, morfología sísmica detallada que permita robustecer el modelo de depósito y distribución de las facies carbonatadas, como es el caso de la Formación San Andrés, y con ello evaluar sus características como roca almacén.

CONCLUSIONES

Para el intervalo del Jurásico Superior Kimmeridgiano se identifican seis litofacies, cinco para la Formación San Andrés y una para la Formación Pimienta.

Las facies oolíticas se identifican en la parte media y superior de la Formación San Andrés, subyaciendo se presentan las facies arcillosas (Formación Taman), facies terrígenas o el basamento ígneo.

Los atributos sísmicos que evidenciaron una mayor eficiencia en la identificación y diferenciación de las facies carbonatadas fueron: Isofrecuencia (10 Hz), Frecuencia Instantánea, *GLCM*, *Envelope*, *Local Flatness* y la Descomposición Espectral en frecuencias. La heterogeneidad y espesor de las facies de la Formación San Andrés son algunos de los factores que no permitieron eficiencia de todos los atributos sísmicos utilizados (ej. atributos de varianza e impedancia acústica relativa).

La confiabilidad y eficiencia de los resultados de los atributos sísmicos se definió con base en la litología de los pozos, correlación de las electrofacies y geometría de los modelos sedimentarios de los sistemas carbonatados.

En el campo San Andrés las facies oolíticas están delimitadas sobre el bloque elevado del basamento, y están sobreyacidas por las litofacies de mudstone arcilloso.

En el campo Remolino y San Andrés sobre el basamento se observa una estratificación para el intervalo Kimmeridgiano caracterizada en su base por las litofacies de mudstone arcilloso, grainstone oolítico en su parte media y packstone-grainstone oolítico en la cima.

En el campo Hallazgo, las litofacies de grainstone oolítico descansan sobre el basamento, resaltando la ausencia de las litofacies de mudstone arcilloso en la base de las facies oolíticas.

Las áreas con menores profundidades de basamento están relacionadas con la distribución de las litofacies de grainstone oolítico.

REFERENCIAS

- Abdelfattah-Sarhan, M., 2017, The efficiency of seismic attributes to differentiate between massive and non-massive carbonate successions for hydrocarbon exploration activity: *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6, 311-325.
- Aguilera-Hernández, E., 1972, Ambientes de depósito de las formaciones del Jurásico Superior en la región Tampico-Tuxpan, en *II Simposio sobre la estratigrafía y la nomenclatura del Jurásico Superior de la cuenca Tampico-Misantla*: México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 24, 129-163.
- Arenas-Márquez, S. V., 2012, Análisis de Descomposición Espectral e integración de atributos sísmicos. Identificación de cuerpos gasíferos, Área de Roblete, Venezuela: Editorial Academia Española, 168 p.
- Barreto, B. J. C., 2004, Reconocimiento de litofacies aplicando atributos sísmicos y métodos de clasificación guiada en las parcelas 362-7/362-8/362-9/362-10 del campo Jobo, área mayor de Temblador, estado Monagas: Venezuela, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado, 111 pp.
- Cano-Neria, I., Sanchez-Torres, G. A., 2013. Metodología de las estrategias de explotación del Proyecto Arenque, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Ingeniería, 135 pp.
- Carrillo-Bravo, J., 1980, Paleocañones Terciarios de la Planicie Costera del Golfo de México: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, XXXII (1), 27-55.

- Carrillo-Martínez, P., 1960, Estudio geológico de los campos petroleros de San Andrés, Hallazgo y Gran Morelos. Edo. de Veracruz: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Documento Técnico, XII (1), 1-73.
- Carrillo-Martínez, P., 1980, Distribución e importancia económica de los bancos oolíticos del Kimmeridgiano Inferior en el distrito de Poza Rica: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, XXXII (2), 3-13.
- Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M., Ledesma-Vallvè, M., Costantino, D., Guerra, G., 2018, Procesos sísmicos especiales: Argentina, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Cátedra de Geofísica Aplicada, Compilación, 22 p.
- Chen, Q., Sydney, S., 1997, Seismic attributes technology for reservoir forecasting and monitoring: Society of Exploration Geophysicists, The Leading Edge, 16, 445-456.
- Chopra, S., Marfurt, K. J., 2007, Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization: Society of Exploration Geophysicists, 11, 73-97.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH), 2018, Atlas Geológico Cuenca Tampico-Misantla: México, 44 p.
- Echagarruga-Palomo, Y. M., 2015, Uso de atributos sísmicos geométricos y registros de imágenes eléctricas para determinar la presencia de fallas y fracturas en el yacimiento Varadero Oeste, Cuba: La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis de Ingeniería (inédita), 66 pp.
- Escalera-Alcocer, J. A., 2010, Estrategia, logros y desafíos de la exploración petrolera en México: Academia de Ingeniería, Trabajo de Ingreso, 67 p.
- Fernández-Mederos, J. C., 2016, Búsqueda directa de hidrocarburos en el yacimiento Seboruco: La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis de Ingeniería (inédita), 65 pp.
- Galván-Castillo, M. A., 1999, Zonificación de unidades de flujo del yacimiento San Andrés del Jurásico Kimmeridgiano, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 119 pp.
- Guerrero, J. G., Vargas, C. A., Montes, L. A., 2010, Reservoir characterization by multiattribute analysis: The Orito field case: Earth Sciences Research Journal, 14, 173-180.
- Guzmán-Arellano, I., 2012, Evaluación petrolera y método de explotación de la región Tampico-Misantla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Ingeniería, 192 p.
- Haralick, R., Shanmugam, K., Dinstein, I., 1973, Textural Features for Image Classification: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 6, 610-621.
- Harilal, S., Biswal, S.K., Sood, A., Rangachari, V., 2008, Identification of reservoir facies within a carbonate and mixed carbonate-siliciclastic sequence: Application of seismic stratigraphy, seismic attributes, and 3D visualization, en IV International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics: Kolkata, India, 937-944.
- Hernandez de la Fuente, R. A., 1996, Sedimentología y diagénesis del Kimmeridgiano en la región de Jonotla, Puebla y Tlacolula Veracruz: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis Maestría, 150 pp.

- Hernández-Medina, S., 2014, Modelado geológico-geoquímico del sistema petrolero Tampico-Misantla: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Informe de Trabajo Profesional, 49 pp.
- Horbury, A., Celestino, J. L., Oxtoby, N., Soto, A., Johnson, S., 1996. Diagénesis y evolución de la porosidad en el Campo Petrolífero Arenque, Costa Afuera de Tampico, Tamaulipas, México: Boletín de la Asociación Mexicana Geólogos Petroleros, XLV (2), 58-80.
- Li, Y., Zheng, X., 2008, Spectral decomposition using Wigner-Ville distribution with applications to carbonate reservoir characterization: The Leading Edge, 27, 1050-1057.
- Miró-Pagés, G., 2015, Interpretación de datos sísmicos de reflexión: La Habana, Cuba, Universidad Tecnológica de La Habana, Facultad de Ingeniería Civil, Conferencia, 56 pp.
- Nieto-Serrano, J. A., 2010, Análisis estratigráfico de la secuencia sedimentaria del grupo Chicontepepec: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Ingeniería, 206 pp.
- Olivella-Ledesma, M., 1996, Estudio sedimentológico de la formación San Andrés, en una porción de la Sierra Madre Oriental; comprendida entre el Rio Vinazco y Tlautilotepec, Pue: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis Maestría, 127 pp.
- Palaz, I., Marfurt, K.J., 1997, Carbonate Seismology, Society of Exploration Geophysicist, 452 p.
- Pedro-Pompa, D., 2015, Uso de atributos sísmicos físicos y registros geofísicos de pozo para el análisis de fluidos en cortes carbonatados en el yacimiento Varadero Oeste, Cuba: La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis de Ingeniería (inédita), 75 pp.
- Pérez-Aquihuatl, H. Y., 2017, Identificación y distribución de la roca almacén mediante análisis de atributos sísmicos de la parte occidental de la Faja de Oro en la formación Tamabra: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 90 pp.
- Pérez-Hernández, Y., 2016, Calibración geológica de fronteras sísmicas en secciones 2D terrestres del sector Maniabón-La Farola, Las Tunas, utilizando datos geólogos-geofísicos correspondientes al pozo Picanes 1x: La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis de Ingeniería (inédita), 86 pp.
- Pérez-Rodríguez, A. E., 1991, Análisis e interpretación de datos geológicos de subsuelo en la industria petrolera un caso práctico aplicado al campo Arenque, Tamaulipas, México: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Ingeniería, 185 pp.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX), 2011, Bloque San Andrés, Activo integral Poza Rica-Altamira: México, Resumen Ejecutivo, 19 p.
- Pierdant-Cuevas, J., 1983, Historia del pozo Constituciones No. 525-A del D.N.Z.N.: México Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Ingeniería, 120 pp.
- Rezvandehy, M., Aghababaei, H., Tabatabaee-Raissi, S.H., 2011, Integrating seismic attributes in the accurate modeling of geological structures and determining the storage of the gas reservoir in Gorgan Plain (North of Iran): Journal of Applied Geophysics, 73, 187-195.
- Rodríguez-Dávila, J. E., 2015, Caracterización geológica de las rocas generadoras y almacenadoras del campo Arenque, ubicado en la zona marina norte de la cuenca Tampico-Misantla: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Ingeniería, 96 pp.

- Roque-Chirinos, E., 2016, Caracterización sísmica de fracturas en reservorios carbonatados-cuenca Ucayali Sur, área de Camisea-Perú: Arequipa, Perú, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas. Escuela Profesional de Ingeniería Geofísica, Tesis de Ingeniería, 112 pp.
- Sánchez, D., Santana, T., Brinkworth, W., 2018, Geomorfología sísmica mediante Descomposición Espectral para el Entendimiento del Modelo Geológico del Grupo Cuyo en la Cuenca Neuquina, Argentina, en X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Instituto Argentino del Petróleo y el Gas: Argentina, 1343, 511-524.
- Sánchez-Rosas, G. J., 1972, Estudio estratigráfico del área los Cues-Salinas, sureste de Tamaulipas y norte de Veracruz, en II Simposio sobre la estratigrafía y la nomenclatura del Jurásico Superior de la cuenca Tampico-Misantla: México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, XXIV (1-3), 65-92.
- Sanchez-Trejo, A., 1983, Estudio geológico petrolero de las formaciones Mesozoicas del Campo Arenque, área Marina de Tampico: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Ingeniería, 120 pp.
- Sarg, J. F., Schuelke, J. S., 2003, Integrated seismic analysis of carbonate reservoirs: From the framework to the volume attributes: Society of Exploration Geophysicists, 22, 640-645.
- Schlumberger, 2015. Recommended Seismic Volume Attributes, Petrel 2015. Poster. <https://www.software.slb.com/-/media/software-media-items/software/documents/external/product-sheets/>
- Silva-Mendoza, S., 2004, Geología del Campo Tamaulipas-Constituciones: México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Tesis de Ingeniería, 92 pp.
- Skirius, C., Nissen, S., Norman, H., Marfurt, K., Hadley, S., Ternes, D., Miches, K., Reglar, I., D'Amigo, D., Deliencourt, F., Romero, T., D'Angelo, R., Brown, B., 1999, 3D seismic attributes applied to carbonates: Society of Exploration Geophysicists, The Leading Edge, 18, 384-393.
- Stabler, C. L., 1972. Secuencia de una trampa estratigráfica en el Jurásico superior: Campo Tamaulipas-Constituciones. Segundo Simposio sobre la estratigrafía y nomenclatura del jurásico superior de la Cuenca Tampico-Misantla: Boletín de la Asociación Mexicana Geólogos Petroleros, XXIV (1-3), 165-197.
- Tamayo-Castellanos, Y., 2015, Evaluación de las litofacies en el yacimiento Varadero Oeste mediante atributos sísmicos estratigráficos para determinar su continuidad: La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis de Maestría (inédita), 80 pp.
- Tamayo-López, Y., Veiga-Bravo, C., Domínguez-Gómez, A.H., 2013, Evaluación preliminar de la aplicabilidad de los atributos sísmicos geométricos en el yacimiento de Puerto Escondido, en VII Congreso Cubano de Geofísica: La Habana, Cuba, 1-9.
- Taner, T. M., 2001, Seismic Attributes: CSEG Recorder, Houston, U.S.A., 26, 49-56.
- Tarner, M. T., Schuelke J. S., O'Doherty, R., Baysal E., 1994. Sesmic attributes revisited: SEG SL 2.5, 1104-1106.

- Vadakkenvettil, B. S., Balakrishnan, K., Unnikrishnan, A., 2012, Grey Level Co-occurrence Matrices: Generalization and some new features: International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology, 2, 151-157.
- Valencia-Lozada, L. E., 2010, Calibración de atributos sísmicos para la identificación litológica de carbonatos en el caribe colombiano: Bucaramanga, Colombia, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Físico-Química, Tesis de Ingeniería, 123 pp.
- Vera-Sánchez, R., 2003. Interpretación estratigráfica-estructural e identificación de nuevos prospectos en la formación Jurásica San Andrés, en el área marina de Tampico: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, 154 pp.
- Wang, J., Dopkin, D., 2008, Visualization, Analysis, and Interpretation of Seismic Attributes for Characterizing a Carbonate Reservoir: en VII International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, Houston, Texas.
- Welsh, A., Brouwer, C., Wever, A., Flierman, W., 2008, Spectral Decomposition of Seismic Reflection Data to Detect Gas Related Frequency Anomalies: European Association of Geoscientists & Engineers, en 70th EAGE Conference & Exhibition, Rome, 1-5.

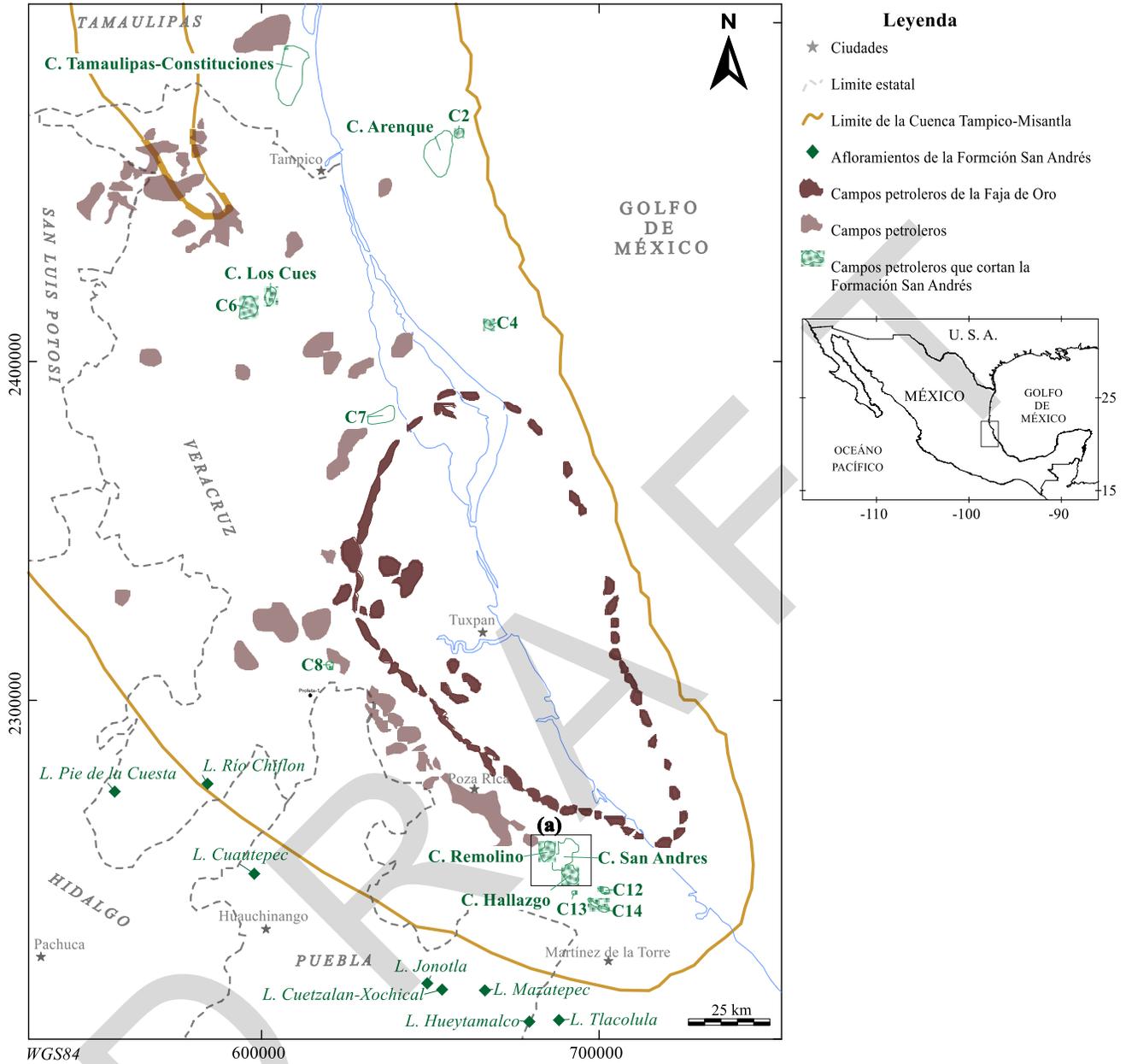


Figura 1. Ubicación de los campos petroleros que cortan la Formación San Andrés en la Cuenca Tampico-Misantla y afloramientos de la Formación San Andrés en el sur y sureste de la cuenca (Datum WGS84, zona UTM 14 para el mapa de ubicación de campos petroleros y coordenadas geográficas en el mapa de la República Mexicana). Campos petroleros Corvina (C2), Pontón (C6), Rancho Nuevo (C7), Guadalupe (C8), Gran Morelos (C12), Riachuelo (C13), Paso de Oro (C14) y Pozo Sabalo (C4). (a) indica la localización de la Figura 5.

a) Campo San Andrés-Hallazgo-Remolino		b) Campo Los Cues	
Carrillo-Martínez, 1960		Silva-Mendoza, 2004	
Formación Pimienta		Formación Pimienta	
Facies San Andrés	<ul style="list-style-type: none"> ○ Calizas cretosas ○ Calcareenitas ○ Oolitas 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grainstone biógeno ○ Grainstone oolítico 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grainstone oolítico y pseudoolitas ○ Lagunar ○ Areniscas de cuarzo
Jurásico Medio / Basamento		Basamento	
c) Campo Tamaulipas-Constituciones			
Stabler, 1972		Silva-Mendoza, 2004	
Formación Pimienta		Formación Pimienta	
Facies San Andrés	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grainstone oolítico y bioclastos ○ Boundstone de corales y algas calcáreas 	Campo Tamaulipas Packstone-grainstone de bioclastos	Campo Constituciones Grainstone oolítico Wackestone-packstone de pelotoides y oolitas Areniscas arcólicas
		Jurásico Medio / Basamento	

Figura 2. Facies sedimentarias de la Formación San Andrés en el subsuelo de los campos petroleros terrestres San Andrés-Hallazgo-Remolino, Los Cues y Tamaulipas-Constituciones, Cuenca Tampico-Misantla.

a) Campo Arenque		b) Campo Arenque	
Sanchez-Trejo, 1983		Pérez-Rodríguez, 1991	
Formación Pimienta		Formación Pimienta	
Facies San Andrés	<ul style="list-style-type: none"> ○ Caliza oolítica ○ Clásticos terrígenos ○ Caliza de grano fino 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grainstone de oolitas ○ Clásticos terrígenos ○ Carbonatos clásticos micríticos 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grainstone oolítico ○ Packstone y grainstone peloidal ○ Conglomerados y areniscas ○ Micritas brechadas ○ Conglomerado basal
		Jurásico Medio / Basamento	
Vera-Sánchez, 2003		Cano y Sanchez, 2013	
Formación Pimienta		Formación Pimienta	
Facies San Andrés	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ks4-grainstone oolítico ○ Ks3-oolitas con pocos bioclastos ○ Ks2-peletoides, bioclastos y oolitas ○ Ks1-terrígenos ○ Ki2-brechas calcáreas y peletoides ○ Kil: conglomerado basal 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grainstone oolítico ○ Grainstone de peletoides y oolitas de grano fino ○ Grainstone de equinodermos y de peletoides, packstone de bioclastos ○ Micritas laminares ○ Terrígenos ○ Carbonatos y clásticos de laguna profunda 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grainstone oolítico ○ Grainstone oolítico-peletoidal ○ Grainstone de equinodermos, grainstone de peletoides, packstone de bioclastos ○ Grainstone, packstone, dolomitas micritas y brechas. ○ Terrígenos
		Jurásico Medio / Basamento	

Figura 3. Facies sedimentarias de la Formación San Andrés en el subsuelo del campo petrolero marino Arenque, Cuenca Tampico-Misantla.

a) Afloramientos en el sureste de la Cuenca Tampico Misantla (Olivella-Ledesma, 1996)

<i>Texcatepec-Pie de la Cuesta</i>		<i>Río Chiflón</i>	<i>Cuautepéc</i>
Formación Pimienta			
Miembros de la Formación San Andrés	<ul style="list-style-type: none"> ○ Superior: grainstone de ooides micritizados, escaso cuarzo detrítico y bioclastos reabajados ○ Media: wackestone-packstone, packstone-wackestone de ooides micritizados, pellets, bioclastos, escasos intraclastos, escaso cuarzo detrítico ○ Base: packstone, wackestone, packstone-grainstone y grainstone-packstone de ooides micritizados, cuarzo detrítico, feldspato, bioclastos, peloides, escasos intraclastos y escasos pedernal detrítico y pellets 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Superior: packstone-grainstone, packstone-wackestone y wackestone-packstone de ooides micritizados, bioclastos, pellets, escasos intraclastos y escaso cuarzo detrítico ○ Media: mudstone-wackestone con presencia de bioclastos y escaso cuarzo detrítico ○ Base: grainstone-packstone y packstone-grainstone de ooides micritizados, escasos peloides, intraclastos, pellets, bioclastos, fragmentos de roca, cuarzo y pedernal 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Superior: wackestone-mudstone y packstone-grainstone de ooides micritizados, peloides, bioclastos e intraclastos ○ Media: mudstone-wackestone y wackestone-mudstone, con presencia de foraminíferos planctónicos, radiolarios y escasos peloides ○ Base: peloides micritizados, pellets y bioclastos

b) Afloramientos en el sur de la Cuenca Tampico Misantla (Hernandez de la Fuente, 1996)

<i>Jonotla</i>	<i>Cuetzalan-Xochical</i>	<i>Río Apulco (Mazatepec)</i>	<i>Hueytamalco</i>	<i>Tlacolula</i>	
Formación Pimienta					
Facies San Andrés	<p>7: Wackestone y packstone de pellets y bioclastos</p> <p>6: Packstone de peloides y bioclastos</p> <p>5: Bindstone de corales, rudstone de corales y peloides</p>	<p>3: Wackestone y packstone de bioclastos</p> <p>2: Wackestone, wackestone-packstone y packstone de peloides</p> <p>6: Packstone, packstone-grainstone de peloides y ooides</p> <p>2: Wackestone y packstone de peloides</p> <p>6: Packstone de peloides y bioclastos</p>	<p>3: Wackestone-packstone de bioclastos</p> <p>2: Wackestone, wackestone-packstone, packstone de bioclastos</p> <p>5: Floatstone de algas y corales</p> <p>6: Packstone, packstone-grainstone, grainstone y grainstone-packstone de ooides</p> <p>7: Wackestone y wackestone-packstone de pellets</p> <p>6: Wackestone-packstone y packstone-grainstone de peloides y ooides</p>	<p>3: Wackestone de bioclastos</p> <p>4: Packstone de bioclastos</p> <p>5: Floatstone de moluscos y algas</p> <p>6: Packstone de ooides</p> <p>5: Floatstone de moluscos y equinodermos</p> <p>2: Mudstone-wackestone de rhaxellas y placas de equinodermos</p> <p>7: Mudstone-wackestone y wackestone de moluscos y equinodermos</p> <p>5: Floatstone de moluscos y algas</p>	<p>4: Floatstone de moluscos, equinodermos, algas</p> <p>3: Packstone de ooides e intraclastos</p> <p>4: Packstone de litoclastos y bioclastos</p> <p>6: Packstone-wackestone de ooides</p> <p>7: Wackestone de rhaxellas</p> <p>6: Packstone de peloides y bioclastos</p> <p>7: Wackestone de espículas de esponjas, fragmentos de moluscos</p>

Los números indican la nomenclatura de clasificación de las facies estándar de Wilson (1975)

Figura 4. Facies sedimentarias de la Formación San Andrés en afloramientos del sur y sureste de la Cuenca Tampico-Misantla.

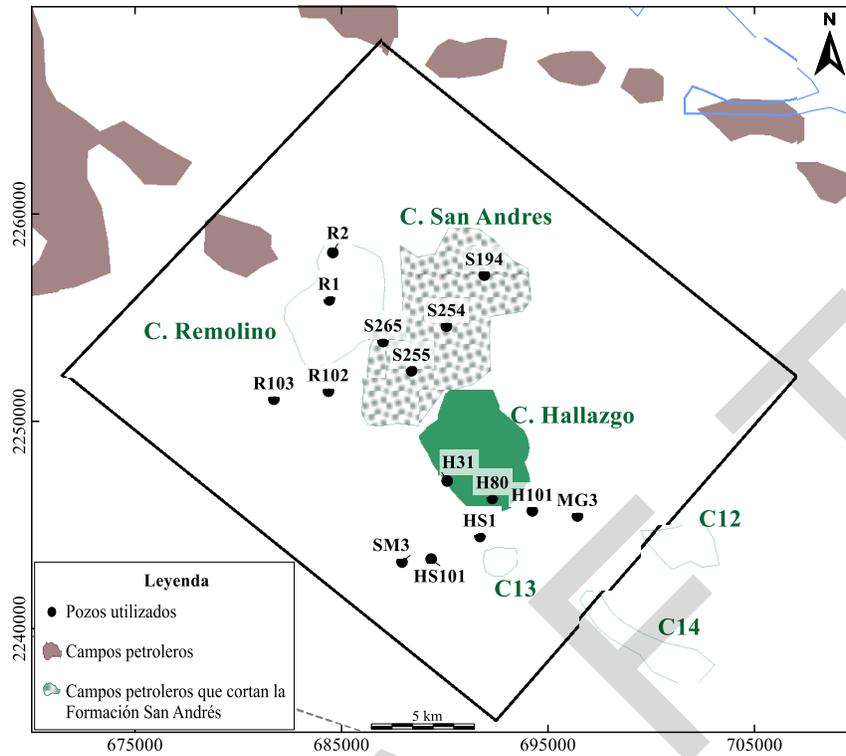


Figura 5. Localización del área de estudio, área de cobertura de datos sísmicos (polígono de línea en color negro), pozos utilizados y límite de los campos petroleros productores de hidrocarburos en las secuencias del Jurásico Superior Kimmeridgiano (Datum WGS84, zona UTM 14). C12: campo Gran Morelos, C13: campo Riachuelo, C14: campo Paso de Oro.

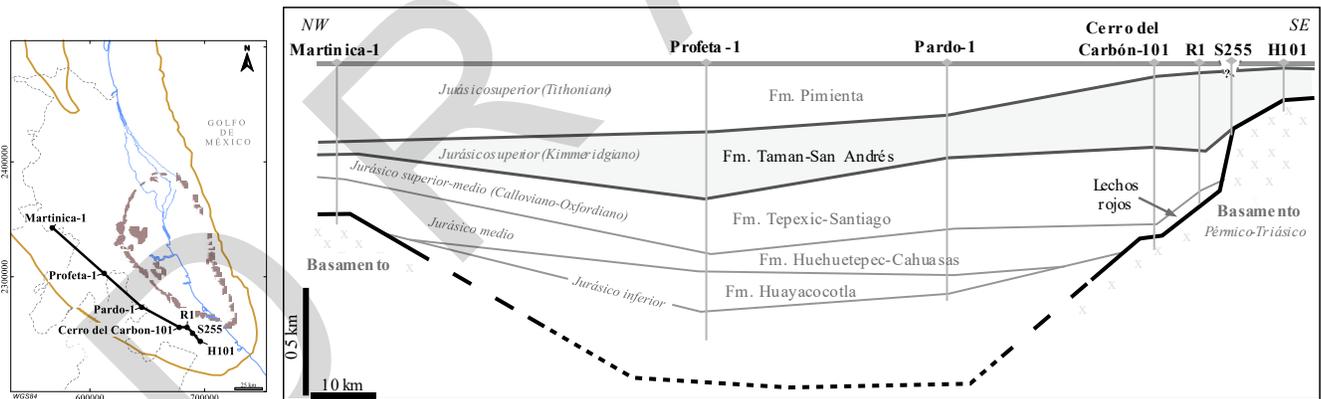


Figura 6. Relación estratigráfica del Jurásico Superior Kimmeridgiano en el sur de la Cuenca Tampico-Misantla (Modificada de CNH, 2018). El datum del mapa de localización es WGS84 en la zona UTM 14.

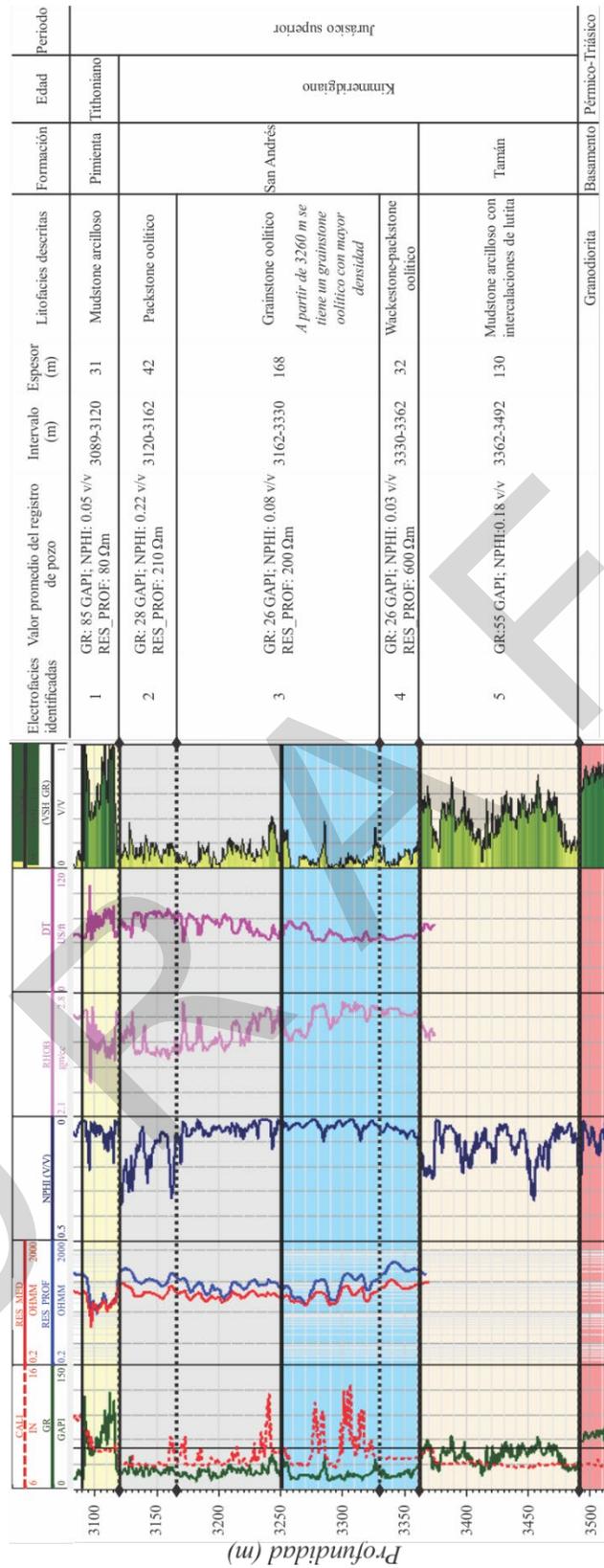


Figura 7. Litofacies del Jurásico Superior Kimmeridgiense definidas en el campo San Andrés (pozo S254).

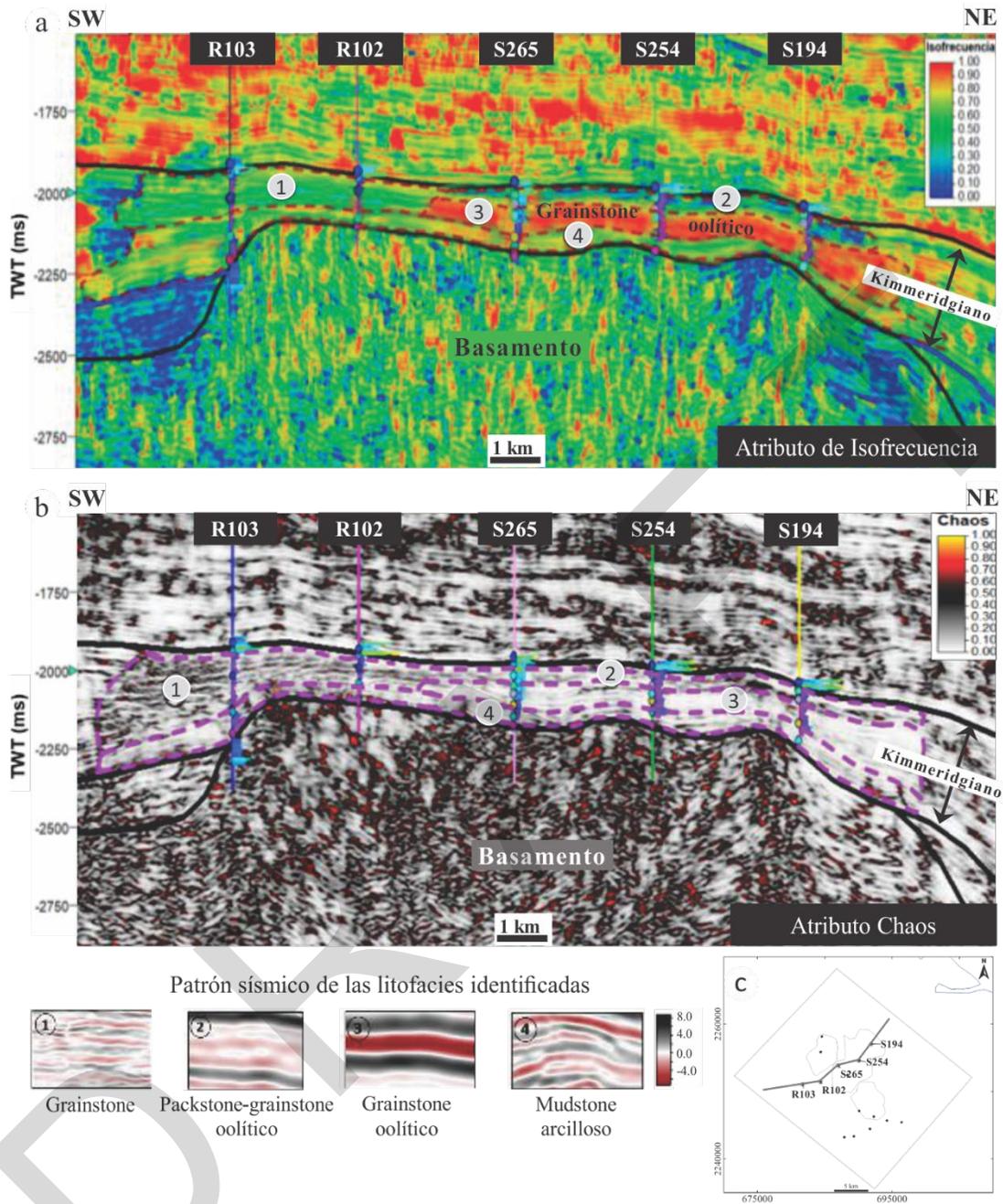


Figura 8. Distribución de litofacies del Kimmeridgiano en los campos Remolino y San Andrés interpretadas en la sección 1 (exageración vertical 3.5x), a partir de los atributos sísmicos de a) Isofrecuencia y b) Chaos; c) localización de la sección.

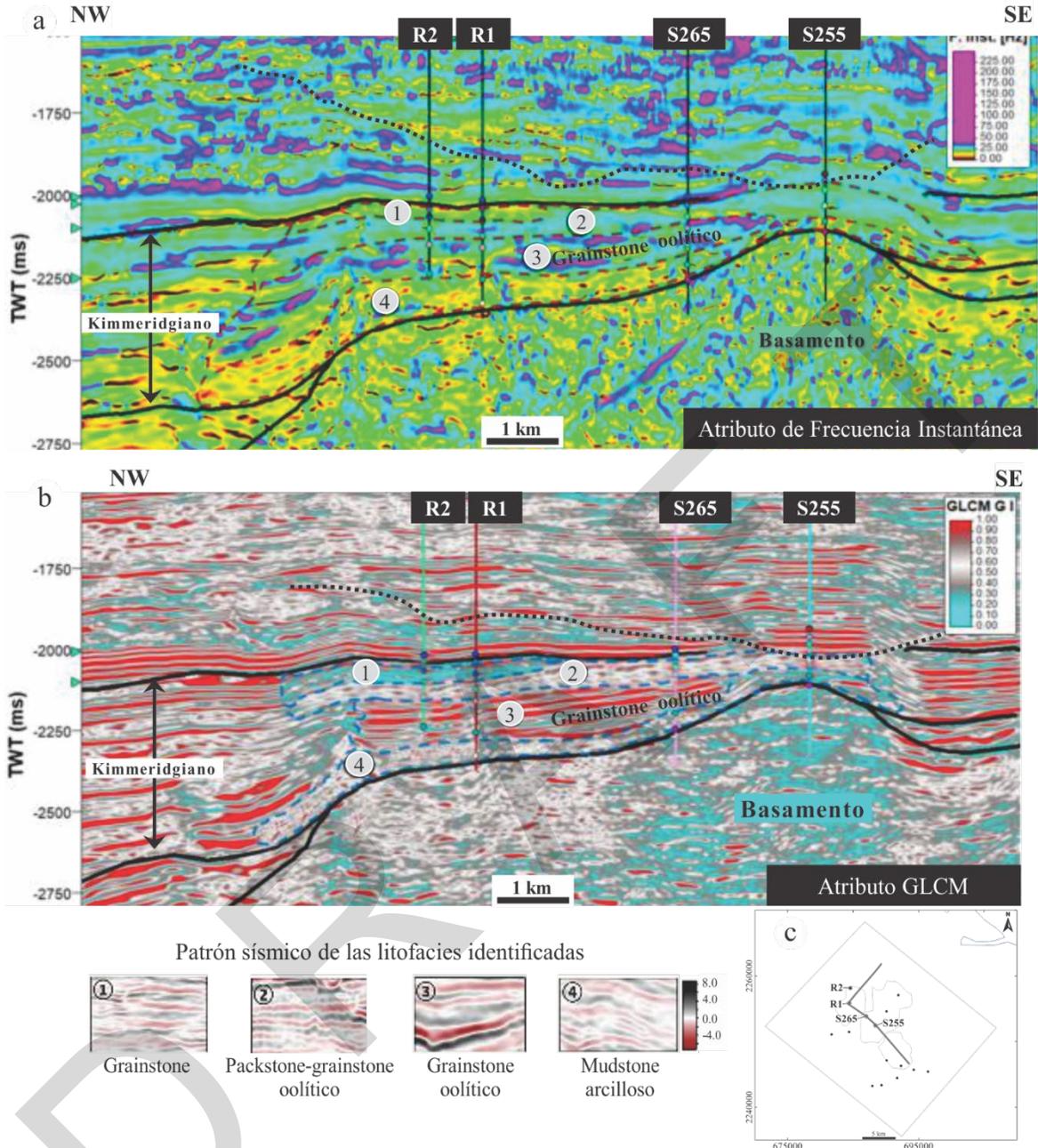


Figura 9. Distribución de litofacies del Kimmeridgiano en los campos Remolino y San Andrés, interpretadas en la sección 2 (exageración vertical 3.5x), a partir de los atributos sísmicos de a) Frecuencia instantánea y b) GLMC; c) localización de la sección.

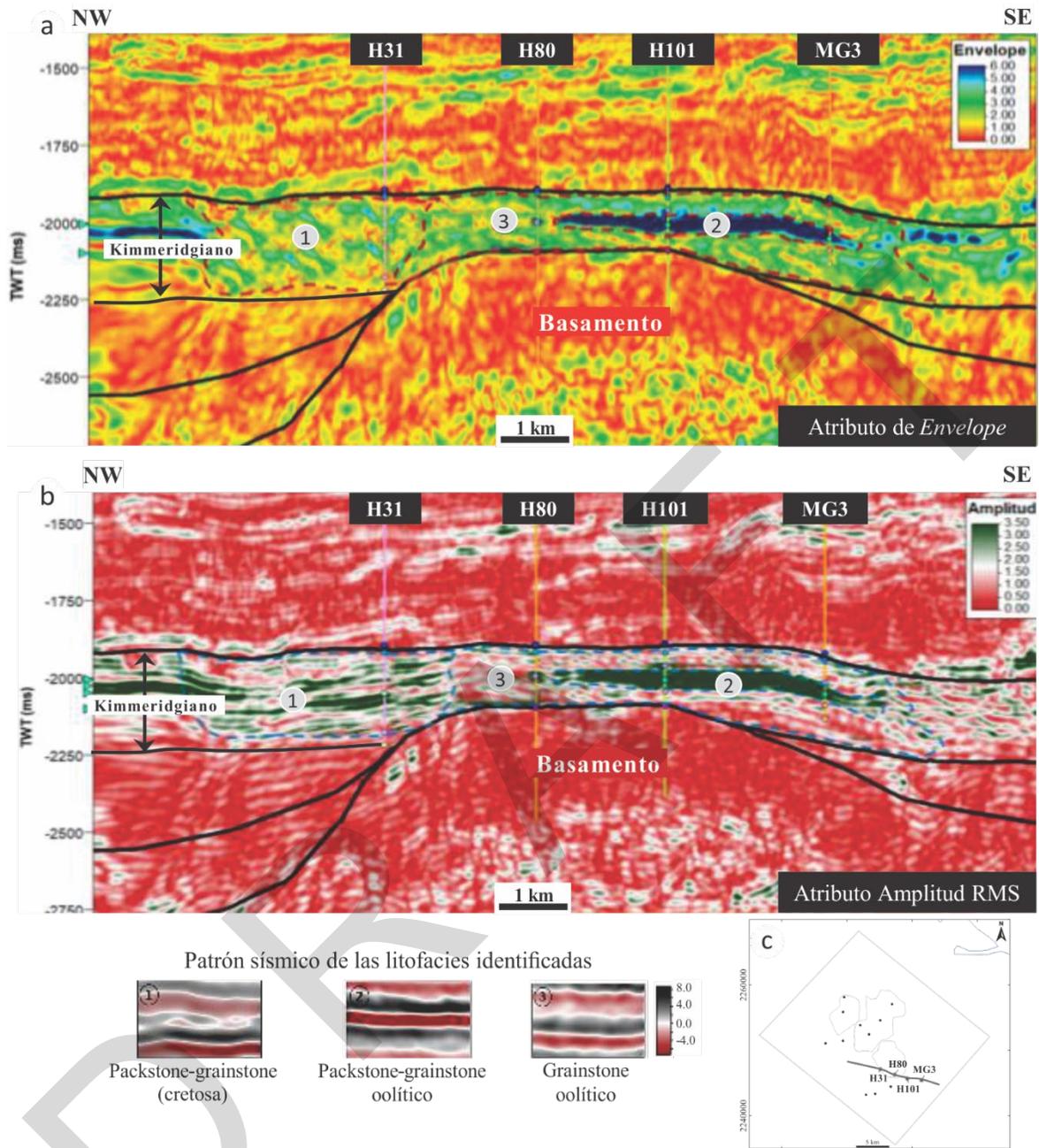


Figura 10. Distribución de litofacies del Kimmeridgiano en el campo Hallazgo, interpretadas en la sección 3 (exageración vertical 3.5x), a partir de los atributos sísmicos de a) *Envelope* y b) *Amplitud RMS*; c) localización de la sección.

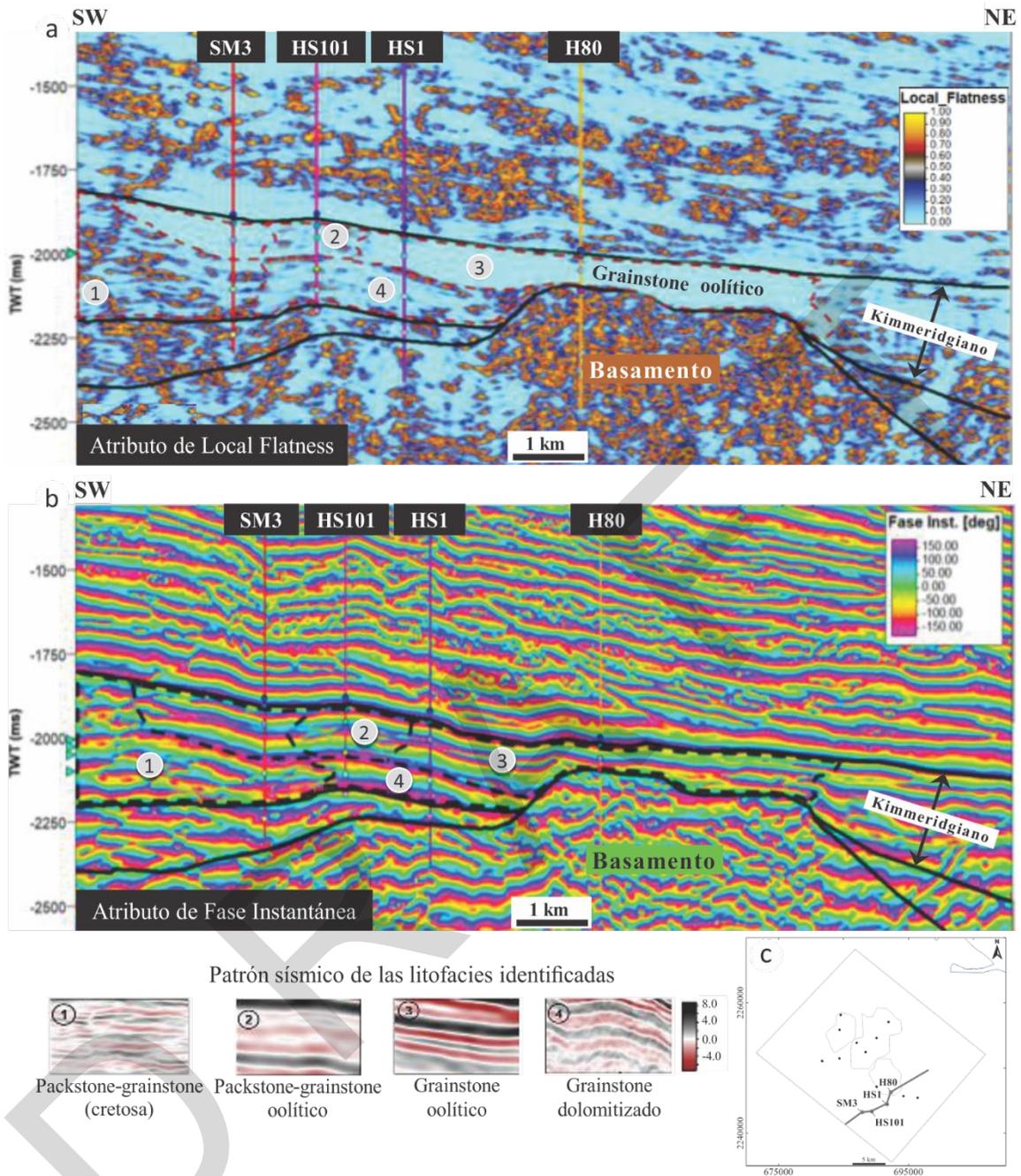


Figura 11. Distribución de litofacies del Kimmeridgiano en el campo Hallazgo., interpretadas en la sección 4 (exageración vertical 3.5x), a partir de los atributos sísmicos de a) *Local flatness* y b) Fase Instantánea; c) localización de la sección.

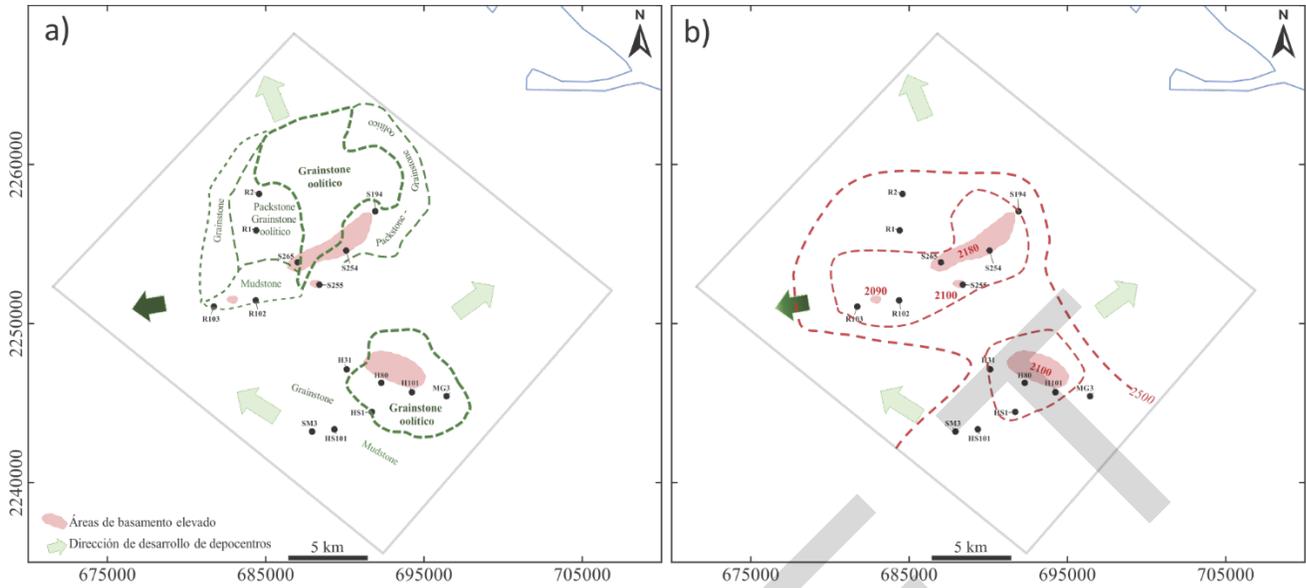


Figura 12. a) Distribución de litofacies en los campos Remolino, San Andrés y Hallazgo interpretadas a partir de un corte en profundidad a 2100 ms; b) profundidad del basamento y distribución de los depocentros pre-Kimmeridgiano. (Datum WGS84, zona UTM 14).

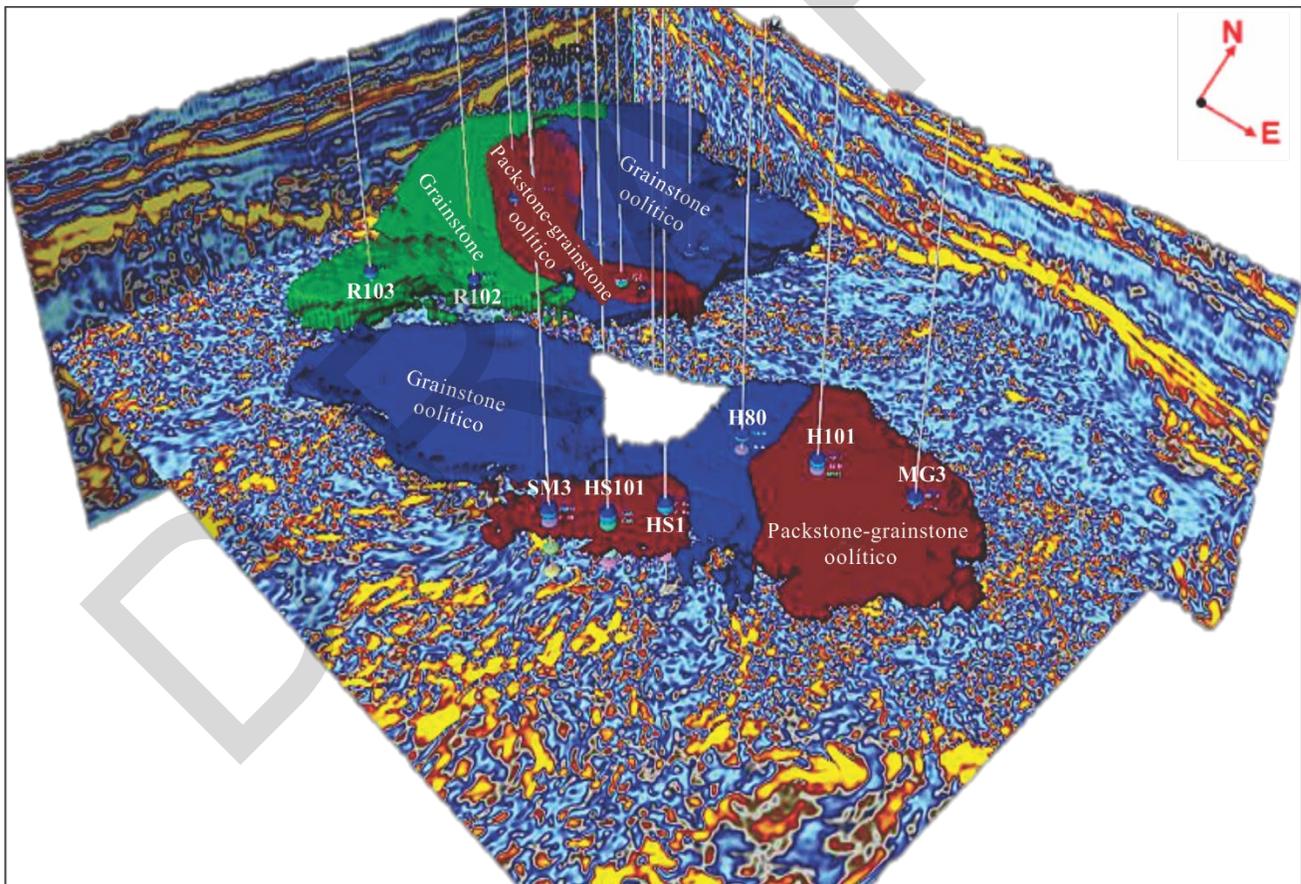


Figura 13. Modelo de distribución de litofacies de la Formación San Andrés, Jurásico Superior Kimmeridgiano, obtenido a partir de la extracción de atributos sísmicos en el área de estudio.

TABLAS

Tabla 1. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de los atributos sísmicos aplicados (Fernández-Mederos, 2016) y principal interpretación geológica de los resultados obtenidos en cada atributo sísmico (Taner, 1994; Schlumberger, 2015; Abdelfattah-Sarhan, 2017).

Atributo sísmico	Ecuación	Interpretación geológica	
Varianza	$\sigma^2(t, dmax) = \frac{1}{2} \sum_{k=t-N/2}^{t+N/2} (G_k - G_{prom}(k+d))^2$ <p><i>G</i>: medida de distribución para <i>N</i> muestras (2 trazas, una es <i>G_k</i>), centradas a un tiempo <i>t</i> y una ventana de búsqueda ±<i>d</i>.</p>	Discontinuidades estratigráficas y lineamientos estructurales (fallas), extensiones de sal, carst y colapsos, arrecifes, así como chimeneas de gas.	
Isofrecuencia	<p>Longitud = (1/<i>f</i>) * ciclos</p> <p><i>f</i>: frecuencia en hertz</p>	Identifica variaciones litológicas que pueden indicar trampas de hidrocarburos.	
T*Attenuation	$t^* = \frac{m(f_h, t_{superior}) - m(f_l, t_{superior})}{m(f_h, t_{inferior}) - m(f_l, t_{inferior})}$ <p><i>f_h</i>: frecuencia (Hz) por encima del punto de interés; <i>f_l</i> la frecuencia por debajo del punto de interés; <i>t</i>: tiempo (ms)</p>	Fracturas asociadas a la atenuación de las frecuencias.	
Local Flatness	$G(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$ <p><i>σ</i> es la varianza; <i>t</i>: tiempo (ms)</p>	Determina localmente reflectores planos (no necesariamente horizontales), resalta fallas y otras anomalías verticales, indicador estratigráfico de arrecifes, canales, colapsos.	
Impedancia Acústica Relativa (IAR)	$\ln [\rho v(k\Delta t)] = 2 \sum_{k=0}^k u(k\Delta t)$ <p><i>u(t)</i>: función serie de la traza sísmica procesada; <i>ρ</i>: densidad (kg/m3), <i>Δt</i>: intervalo de muestreo temporal (ms); <i>v</i>: velocidad (m/s), <i>k</i>: número de trazas;</p>	Indica límites de secuencias, superficies discordantes, también es relacionado con porosidad y presencia de hidrocarburos.	
RMS Amplitude	$RMS_{(k)}(T, i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=i-\frac{n}{2}}^{j=i+\frac{n}{2}} RMS_{(k-1)}(T, j)^2}$ <p><i>n</i>: número de muestras, <i>k</i>: número de iteraciones; <i>k-1</i>: salida de la iteración anterior, la cual se toma como entrada para la próxima iteración.</p>	Detecta variaciones de amplitud para identificar canales con cambios de densidad.	
Sweetness	$Sweetness = \frac{Envelope}{\sqrt{Frecuencia Instantánea}}$ $Envelope = \sqrt{f^2(t) + g^2(t)}$ <p><i>Envelope</i>: energía total instantánea de la señal analítica (traza compleja), independiente de la fase y muestra únicamente amplitudes positivas; <i>f(t)</i> y <i>g(t)</i> son la parte real e imaginaria de la traza sísmica compleja</p>	<i>Sweetness</i> : resalta sutiles características estratigráficas y estructurales, como canales arenosos en lutitas. <i>Envelope</i> : disconformidades, límites de secuencias y cambios litológicos no interpretados en el dato sísmico.	
Instantáneos	Amplitud	$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$	Amplitud: cambios en litología.
	Fase	$\phi(t) = \arctan \left \frac{y(t)}{x(t)} \right $	Fase: continuidad y geometría estratigráfica-estructural (fallas, discordancias angulares, <i>onlap</i> , límites de secuencia).
	Frecuencia	$F(t) = \frac{d(\phi(t))}{dt}$ <p><i>x(t)</i>, <i>y(t)</i> corresponden a la parte real e imaginaria de la traza sísmica, <i>φ</i> representa la fase</p>	Frecuencia: fracturamiento, espesores, cambios laterales y verticales, e indicador directo de hidrocarburos por anomalía de baja frecuencia.
Descomposición espectral	$X(k\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \left(\frac{2\pi nk}{N} \right) k}$ <p><i>x(n)</i>: señal de tiempo discreto; <i>N</i>: número de muestras; <i>ω</i>: dominio de la frecuencia.</p>	Resalta características estructurales (fallas) y estratigráficas (arrecifes, canales), morfología sísmica	

Tabla 2. Litofacies de la Formación San Andrés definidas en los campos San Andrés, Hallazgo y Remolino.

Litofacies		Descripción	Formación
Mudstone arcilloso	Facies oolíticas	Mudstone arcilloso, recristalizado, con textura microcristalina, estratificación delgada	Pimienta
Grainstone oolítico		Grainstone oolítico de color café con abundantes restos fósiles (equinodermos y algas), así como intraclastos calcáreos. En algunos pozos, ooides cementados en una matriz calcárea fina, compacto y con ooides mal conservados.	San Andrés
Packstone oolítico		Packstone con granulometría del tamaño de arena fina-media, con presencia de ooides, en ocasiones fracturado (algunas rellenas de calcita) y ooides cementados por una matriz calcárea fina.	
Wackestone-packstone oolítico		Wackestone-packstone oolítico de color café, bien conservado, compacto y parcialmente dolomitizado.	
Mudstone-wackestone		Mudstone-wackestone ligeramente fracturado y dolomitizado, textura microcristalina, aisladas fracturas, fósiles recristalizados y fragmentos angulares de cuarzo blanco traslúcido.	
Packstone		Packstone café claro, cretoso y fracturado. Packstone café oscuro, cretoso, fracturado, con abundantes fragmentos de pedernal y recristalizado en algunos intervalos, con restos de macro y microfauna (radiolarios).	
Grainstone		Grainstone de color café, fracturado en algunos pozos y en ocasiones con intraclastos y bioclastos.	
Mudstone arcilloso		Mudstone arcilloso de color café, textura microcristalina, escasamente fracturado, trazas de lutitas negras calcáreas, con materia orgánica en microporos y microfracturas.	Tamán

Tabla 3. Eficiencia de los atributos sísmicos aplicados para diferenciar las litofacies de la Formación San Andrés.

Atributo sísmico	Muy eficiente	Eficiente	Regular
Isofrecuencia	x		
Chaos		x	
Frecuencia Instantánea	x		
GLCM	x		
T*Attenuation		x	
Envelope	x		
Amplitud RMS		x	
Varianza			x
Local Flatness	x		
Fase Instantánea		x	
Impedancia Acústica Relativa			x
Descomposición Espectral	x		