

VARIACIONES DEPOSICIONALES DEL SISTEMA VACA MUERTA – QUINTUCO EN EL SECTOR CENTRAL DE LA CUENCA NEUQUINA: EJEMPLOS DEL ÁREA FORTÍN DE PIEDRA

Alejandro Bande¹, Horacio Acevedo¹, Paula Bagdo¹, Alfonso Mosquera, Ricardo Veiga¹

1: Tecpetrol, alejandro.bande@tecpetrol.com, horacio.acevedo@tecpetrol.com, paula.bagdo@tecpetrol.com, alfonso.mosquera@tecpetrol.com, ricardo.veiga@tecpetrol.com

Palabras clave: Vaca Muerta, Fortín de Piedra, No Convencional, Cuenca Neuquina

ABSTRACT

Vaca Muerta –Quintuco System depositional variations within the central sector of the Neuquén Basin: insights from the Fortín de Piedra block.

The Vaca Muerta Formation is worldwide acknowledged for its potential as unconventional reservoir. Many shale-gas and shale-oil exploration and development projects are distributed around the Neuquén Basin with different degree of activity. In the central sector of the basin the development projects are currently producing unconventional oil and gas.

In this context, we analyze the depositional characteristics of the Vaca Muerta Formation. The stratigraphic unit in this sector can be divided into three transgressive-regressive cycles. The oldest one has a broad aggradational geometry and contains the highest amount of total organic carbon. On top, an aggradational-progradational cycle develops with very good geochemical and geomechanical properties at its base. Finally a broad progradational cycle is described with lower interest as unconventional target.

Lateral heterogeneities within cycles of the Vaca Muerta Formation are controlled by the main depositional characteristics. It is vital to understand and predict these areal changes in order to develop an efficient development plan.

INTRODUCCIÓN

La Formación Vaca Muerta es mundialmente reconocida por su potencial como roca generadora y por los recursos no convencionales asociados a la misma. Su gran extensión areal, los altos valores de contenido orgánico total (COT) existentes y la existencia de infraestructura en superficie para su desarrollo hicieron que en los últimos años varias empresas hayan puesto su atención en el desarrollo no convencional de la unidad. En este contexto el sector central de la Cuenca Neuquina es donde se ubican los proyectos en desarrollo con mayor grado de avance (p.e. Loma Campana, El Orejano y Fortín de Piedra).

En ese contexto, se realizó un análisis de las características estratigráficas, deposicionales, geoquímicas y geomecánicas de la Fm. Vaca Muerta con foco en el bloque Fortín de Piedra. Para ello se interpretó la información sísmica 2D y 3D disponible y se analizaron los pozos

que atravesaron la unidad en el bloque. Complementariamente se realizó una inversión sísmica preapilado del volumen recientemente adquirido.

MARCO GEOLÓGICO

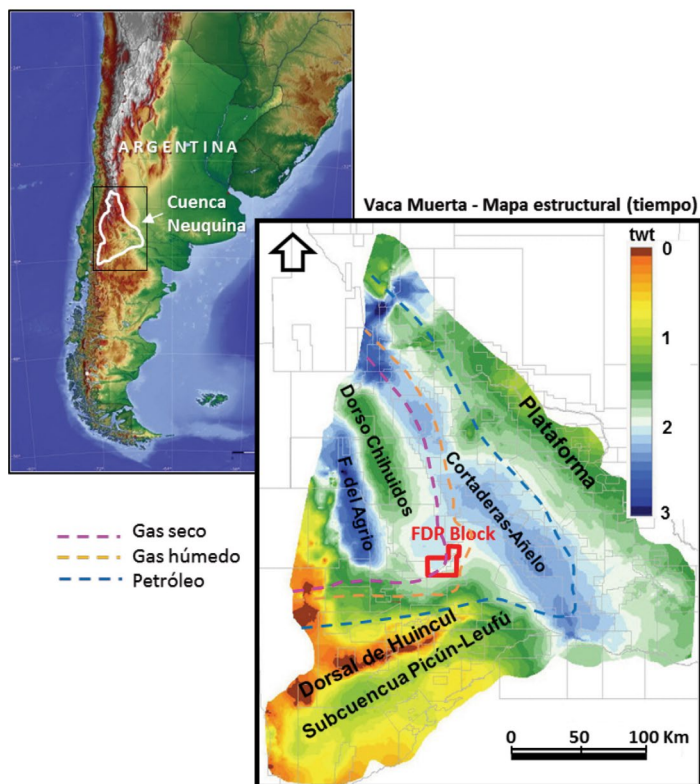


Figura 1. Ubicación del bloque Fortín de Piedra (polígono rojo) dentro del ámbito de la Cuenca Neuquina. Líneas punteadas representan los límites de la ventana de generación de hidrocarburos (modificado de Acevedo y Bande, 2018). Los valores TWT son en s.

y Mendoza.

Nueve secuencias deposicionales fueron definidas en el Gr. Mendoza inferior y correlacionadas con secuencias deposicionales de tercer orden (Mitchum y Uliana 1985). El ciclo sedimentario de somerización de segundo orden Tithoniano temprano – Valanginiano temprano define el sistema Quintuco – Vaca Muerta. Este es el resultado de un ciclo transgresivo – regresivo compuesto por lutitas negras, margas y calizas (Weaver 1931). Los depósitos de grano grueso de plataforma corresponden a la Formación Quintuco y son las facies de *topset* de las clinoformas que llenaron la cuenca. Por su parte la Formación Vaca Muerta representa los depósitos de talud y centro de cuenca y forman los sectores de *bottomset* y *foreset* de las clinoformas (Desjardins *et al.* 2016). El sistema Quintuco – Vaca Muerta está organizado en un arreglo de secuencias deposicionales que progradan hacia el Noroeste (Mitchum y Uliana 1985).

La Cuenca Neuquina es del tipo *back-arc* desarrollada durante tiempos Mesozoicos en el margen occidental de Sudamérica. La sedimentación comenzó durante el Triásico tardío – Jurásico temprano y fue controlada por el colapso termomecánico vinculados a los esfuerzos de apertura de la cuenca (Vergani *et al.* 1995). Durante el Jurásico temprano el paso a la etapa de subsidencia termal llevó a la formación de depocentros amplios vinculando los bajos topográficos y facilitando la incursión de ambiente marino somero (Legarreta y Gulisano 1989). Los depocentros fueron llenados por sedimentos clásticos marinos y continentales, carbonatos y evaporitas que son incluidos dentro de los Grupos Cuyo, Lotena

El bloque Fortín de Piedra está ubicado en la zona central de la cuenca en donde la ventana de generación de hidrocarburos corresponde a gas seco hacia el Oeste y gas húmedo y condensado hacia el Sur y el Este (Fig. 1).

VARIACIONES DEPOSICIONALES

En la zona central de la Cuenca Neuquina la Formación Vaca Muerta puede ser dividida en tres ciclos sedimentarios transgresivo-regresivos (Fig. 2).

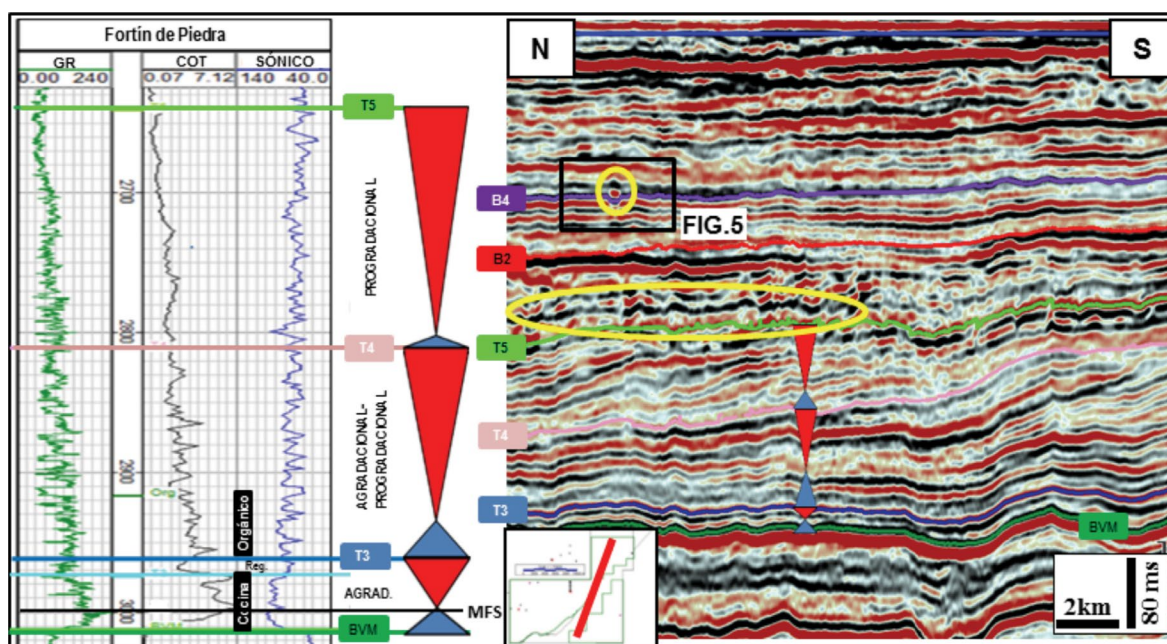


Figura 2. La Formación Vaca Muerta puede dividirse en tres ciclos transgresivo-regresivos dentro del bloque Fortín de Piedra. En la imagen se puede ver el análisis en el pozo y en una línea arbitraria. Línea roja en el mapa de ubicación indica posición de la sección arbitraria. Los círculos amarillos corresponden a los niveles donde se desarrollan los abultamientos carbonáticos dentro de la Fm. Quintuco. Cuadro negro indica la ubicación de la Figura 5.

El más antiguo (BVM-T3) de ellos muestra un claro arreglo agradacional. Litológicamente está compuesto por limolitas calcáreas depositadas en un ambiente euxínico con altos contenidos de molibdeno, titanio y cromo. Los contenidos de materia orgánica en este nivel son altos, con valores que fluctúan entre un 4 a 7 wt%. El tope de la sección transgresiva de este ciclo se correlaciona con una superficie de máxima inundación de segundo orden. La transgresión inicial del Tithoniano temprano cubrió y preservó la topografía existente en esta parte de la cuenca. El mapa de isoespesor en tiempo del primer ciclo claramente muestra la presencia de rasgos longitudinales de rumbo noreste – sudoeste (Fig. 3). Varios autores (p.e. Arregui 1993) describieron la presencia de depósitos eólicos correspondientes a la Fm. Tordillo, ubicada inmediatamente por debajo de la Fm. Vaca Muerta. La inundación inicial de Vaca Muerta fue rápida cubriendo y preservando

las paleodunas eólicas de la Fm. Tordillo. En base a datos paleo-dirección de vientos (Cevallos 2005) podemos interpretar que se trataban de dunas longitudinales. La parte superior del primer intervalo transgresivo-regresivo está definido por un intervalo de menor COT (<3 wt%) llamado informalmente “Regresivo” (Fig. 2). La sección basal del primer intervalo de la Fm. Vaca Muerta se lo denomina “La Cocina”. Extracciones rms (*root mean square*) del volumen sísmico de COT para “La Cocina” (Fig. 3) muestra una distribución con rumbo preferencial NE – SO similar a la disposición de las paleodunas de Tordillo. Es posible que la presencia de las paleodunas durante la transgresión basal de Vaca Muerta haya controlado la distribución de materia orgánica. Sin embargo, puede ser que el patrón NE – SO sea el resultado de un artefacto sísmico producto de la variación en espesor de “La Cocina”. De cualquier manera, el plan de desarrollo de “La Cocina” obtendrá datos de pozo en la zona basal de Vaca Muerta confirmando o no la variación de COT en ese nivel. Para detalles de la inversión sísmica y obtención de parámetros geomecánicos y geoquímicos ver Acevedo y Bande (2018).

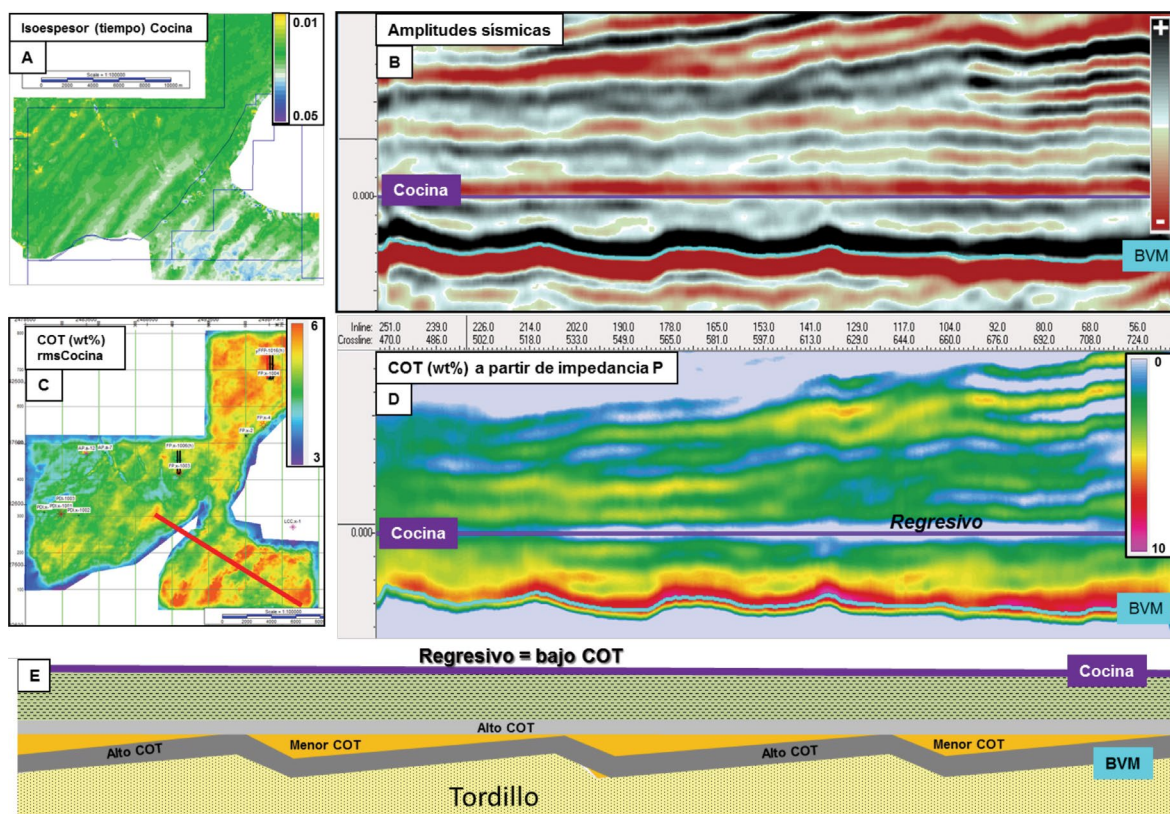


Figura 3. Resultados para “La Cocina”. (A) Mapa de isoespesor en tiempo mostrando el desarrollo de paleodunas en la Fm. Tordillo con dirección noreste-sudoeste. (B) Sísmica en amplitud donde se definen de manera incipiente las discontinuidades dentro de la zona de interdunas. (C) La influencia de las paleodunas es evidente en los valores promedio de rms para COT. La distribución de valores de COT es consistente con los cambios de espesores dentro de la zona de dunas. En rojo ubicación de las líneas B y D. (D) Distribución de COT dentro de “La Cocina” donde se observan las mayores valores en la zona basal y las discontinuidades en la zona de interdunas. (E) Representación esquemática de la distribución de COT dentro de “La Cocina”.

El segundo ciclo (T3–T4) presenta un arreglo agradacional-progradacional. Litológicamente está dominado por limolitas calcáreas bioclásticas y limolitas calcáreas en forma subordinada. Este cambio está asociado con una somerización relativa del sistema. Los valores de COT son menores que en el ciclo subyacente, pero de cualquier manera son buenos y fluctúan entre un 2.5 y un 3.7 wt%. Dentro de este ciclo los primeros 20 m corresponden a la sección transgresiva con altos valores de COT y buenas propiedades mecánicas. Como es de esperarse, la distribución areal en espesor de este intervalo es constante y se desarrolla en facies de *bottomset*. En forma suprayacente se desarrolla un claro intervalo progradante, el cual aumenta su espesor hacia el sudeste mostrando incipientes facies sísmicas de *foreset*. El intervalo transgresivo junto con la sección basal del intervalo progradante es denominado informalmente como “El Orgánico”. Extracciones rms de fragilidad y COT dentro de “El Orgánico” muestran cambios laterales que se corresponden con la geometría deposicional de las clinoformas. En el caso de la fragilidad por ejemplo los valores de rms decrecen desde el sudeste al noroeste.

El tercer ciclo (T4-T5) tiene un arreglo netamente progradacional. El intervalo agradante tiene un delgado espesor (<10m) y en consecuencia la mayor parte del ciclo está formado por facies sísmicas de *foreset*. El contenido de carbonato en esta sección es alto y los valores de COT son bajos (<2 wt%). Mapas de isoespesor en tiempo muestran el desarrollo de un sigmoide en forma completa con menores espesores hacia el sudeste (facies de *topset*) y hacia el noroeste (facies de *bottomset*). La Figura 4A permite interpretar un borde de plataforma con una orientación noreste-

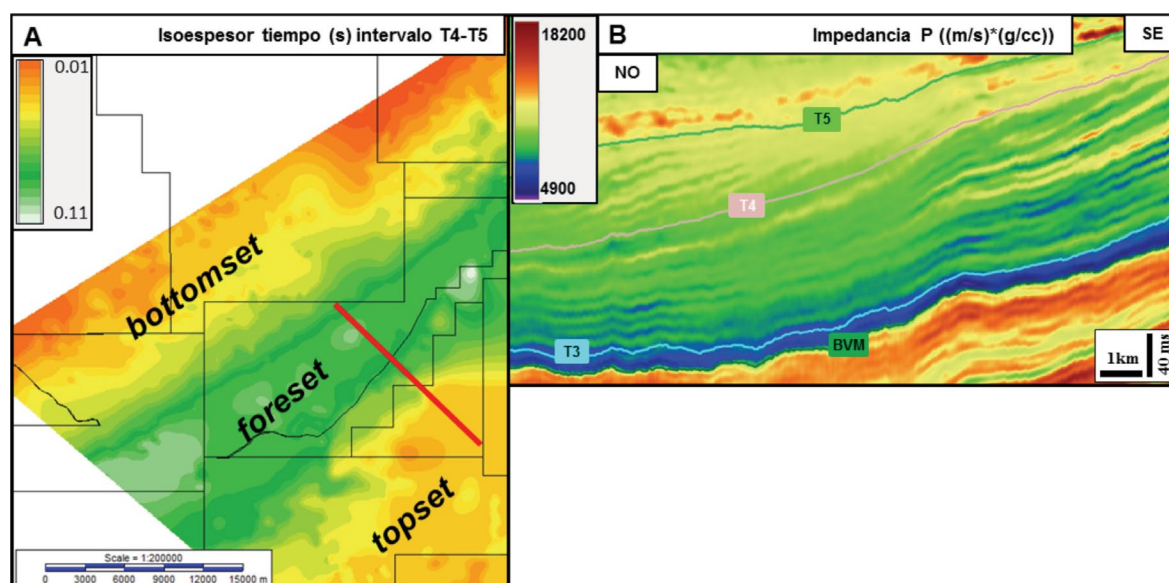


Figura 4. A. Mapa de isoespesor en tiempo (s) para el ciclo T4-T5 en donde se observan en planta los distintos sectores de una clinoformaprogradante. Hacia el sudeste se observa una zona de bajo espesor correspondiente a la zona de *topsets* de la Formación Quintuco. En la zona central aumenta el espesor (colores verdes) mostrando la zona de *foreset* y hacia el noroeste el espesor decrece nuevamente evidenciando la zona de *bottomsets* de la Formación Vaca Muerta. En rojo ubicación del corte B. B. Corte arbitrario sísmico mostrando las variaciones de Impedancia P en la Formación Vaca Muerta. Las secciones agradantes muestran bajos valores (colores azules) de Impedancia P mientras que los intervalos progradantes exhiben valores relativamente más altos (colores amarillos). Los valores más altos (colores rojos) corresponden a los niveles carbonaticos con *build-ups* de la Formación Quintuco.

sudoeste y una dirección de progradación hacia el noroeste. En este ciclo los valores de impedancia P son los mayores y se observan cambios en los valores de fragilidad, módulos de Young y Poisson que se corresponden con la arquitectura progradacional del ciclo (Fig. 4B).

Por encima de los niveles T5 y B4 se desarrollaron episodios de expansión del área de influencia marina en la cuenca que inundaron las plataformas existentes (e.g. Mitchum y Uliana 1985; Desjardins *et al.* 2016). En este contexto se observan en el bloque Fortín de Piedra geoformas convexas hacia arriba con forma circular en planta que muestran un resalto en amplitud, dentro de la Formación Quintuco (Fig. 5). Por encima del nivel T5 estas geoformas están alineadas, mientras que en el nivel B4 se presentan aisladas. El análisis de atributos geofísicos sobre estas últimas las clasifica como anomalías AVO de clase I y II. A su vez, presentan valores relativamente altos de impedancia acústica y bajos valores de VP/VS. Todo ello sugiere que el material que componen estas geoformas es más resistente y de menor compactación que el circundante, consistente con su forma convexa hacia arriba. Las geoformas ubicadas por arriba del nivel T5 han sido interpretadas como *build-ups* o *mud-mounds* calcáreos por varios autores (p.e. Pángaro *et al.* 2002; Massaferro *et al.* 2013) y están asociadas a sistemas transgresivos en donde los organismos intentan alcanzar la zona fótica dentro de un relativo aumento del nivel del mar. Las geoformas que se desarrollan suprayacentes al nivel B4 tendrían una génesis similar.

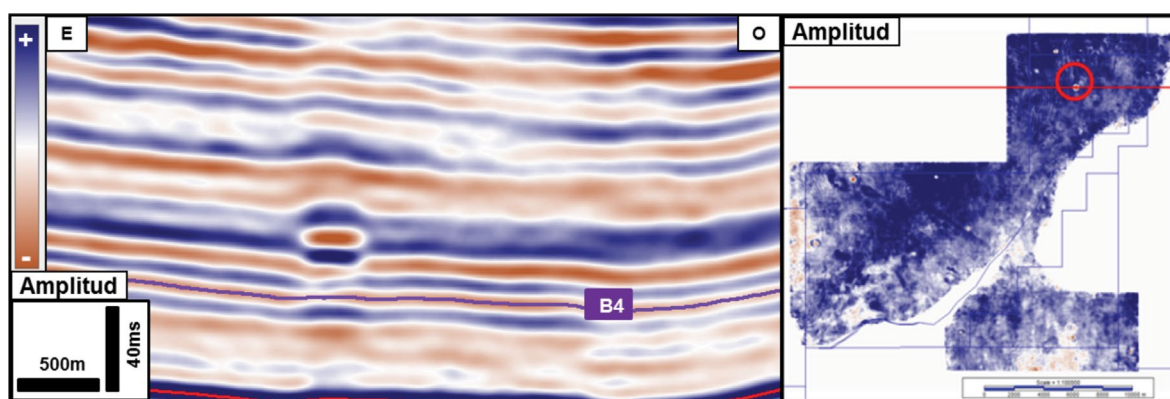


Figura 5. Imagen de los abultamientos carbonáticos que se observan en el intervalo transgresivo por encima del marker B4. (A) Corte sísmico E-O. (B) Extracción de amplitud 28 ms por encima del marker B4.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las variaciones en los sistemas deposicionales anteriormente descriptas tienen una clara influencia en el desarrollo de los recursos no convencionales de la Formación Vaca Muerta.

Para el caso de “La Cocina” la aparente homogeneidad del primer ciclo transgresivo-regresivo no es tal ya que las extracciones rms de COT y los mapas de espesores muestran importantes variaciones laterales para este nivel. Tener en cuenta y predecir estos cambios es de suma importancia a la hora de programar un exitoso desarrollo con pozos horizontales.

De la misma manera, para el intervalo “El Orgánico” dentro del segundo ciclo transgresivo-regresivo, la distribución de valores de fragilidad está controlada por los parámetros y la geometría deposicional. Estos cambios podrían tener influencia en el desarrollo de las fracturas hidráulicas en este nivel no teniendo la misma respuesta en toda el área.

Finalmente, los niveles con *build-ups* o *mud-mounds* carbonáticos dentro de la Fm. Quintuco pueden provocar problemas operativos (p.e. admisiones, influjos de gas) durante la perforación de estos intervalos siendo importante su mapeo y previsión.

AGRADECIMIENTOS

A Tecpetrol S.A. por autorizar la publicación de este trabajo, al grupo NOC de Tecpetrol y a Carolina Crovetto, Hernán Reijenstein y Manuel Fantín por los comentarios y correcciones realizados sobre el manuscrito durante el proceso de arbitraje.

REFERENCIAS CITADAS

- Acevedo, H y A. Bande, 2018, “Characterization of lower Vaca Muerta at Fortín de Piedra in Neuquén Basin, Argentina”, *The Leading Edge*, 37(4), 255–260, doi.org/10.1190/tle37040255.1
- Arregui, C., 1993, “Análisis estratigráfico-paleoambiental de la Formación Tordillo en el subsuelo de la Cuenca Neuquina”, 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 1, 165–169.
- Cevallos, M. F., 2005, “Análisis estratigráfico de alta frecuencia del límite Kimmeridgiano – Tithoniano en el subsuelo de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina” *Petrotecnia*, 34–55.
- Desjardins, P., M. Fantín, F. González Tomassini, H. Reijenstein, F. Sattler, R. F. Domínguez, D. Kietzmann, H. A. Leanza, A. Bande, S. Benoit, *et al.* 2016, “Estratigrafía sísmica regional” en: González, G. *et al.* eds, *Transecta regional de la Formación Vaca Muerta: Integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos*, 5–22, IAPG, Buenos Aires.
- Legarreta, L., y C. A. Gulisano, 1989, “Análisis estratigráfico secuencial de la cuenca Neuquina (Triásico superior-Terciario inferior)” en G.A. Chebli and L.A. Spalletti, eds., *Cuencas Sedimentarias Argentinas*, 221–243.
- Massaferro, J.L., M. Zeller, D.L. Giunta, G. Sagasti, y G.P. Eberli, 2013, “The Vaca Muerta - Quintuco Mixed System: a Regional Outcrop to Subsurface Overview”, AAPG ACE, Pittsburgh, PA.
- Mitchum, R. Jr., y M. A. Uliana, 1985, “Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic-Lower Cretaceous, Neuquén Basin, Argentina” en D. R. Berg and D. G. Woolverton, eds., *Seismic stratigraphy II: An integrated approach to hydrocarbon exploration: AAPG Memoir 39*, 255–274.
- Pángaro, F, H. Maretto, y L. Pianelli, 2002, “Abultamientos carbonáticos en la Fm. Quintuco en el área de rincón del mangrullo, Cuenca Neuquina, Argentina. Un nuevo objetivo exploratorio?” V congreso de exploración y desarrollo de hidrocar-

- buros, Mar del Plata, Argentina.
- Vergani, G. D., A. J. Tankard, H. J. Belotti, and H. J. Welsink, 1995, "Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina", en A. J. Tankard, R. Suárez Soruco, H. J. Welsink, eds., *Petroleum basins of South America: AAPG Memoir 62*, 383–402.
- Weaver, C. E., 1931, "Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west-central Argentina" University of Washington Press-