

FORMACIÓN VACA MUERTA, ELECTROFACIES, DEFINICIÓN Y SU IMPORTANCIA EN EL MODELADO GEOLÓGICO

Mauro Gastón Sánchez¹, Gustavo Tarrés¹

1: YPF S.A. mauro.sanchez@ypf.com, gustavo.tarres@ypf.com

Palabras clave: Vaca Muerta, electrofacies, modelado geológico

ABSTRACT

The Vaca Muerta Formation is characterized by a wide lithological heterogeneity, with facies present both laterally and vertically. The present work aims to differentiate facies by means of their electrical log response.

The main objective of the study is to characterize the productive intervals of the Vaca Muerta Formation in the southeast areas area of the Neuquén basin through 3D geological modeling considering the degree of heterogeneity observed in the reservoir. The results of the study will contribute to minimize the risks associated with drilling by relating the lithological characteristics of the different objective layers with the events observed during wells drilling.

Petrophysical modeling was carried out in different stages. The first consisted in the interpretation using pre-existing models and adapting the parameters according to the fluid and kerogen properties characterized in each studied area. In addition, facies description in core as well as laboratory X-ray diffraction, X-ray fluorescence, and open hole log data were incorporated into the analysis. This data integration allowed the construction of a detailed lithological model that consisted in the definition of six electrofacies using ternary graphs and principal component analysis.

Subsequently, the electrofacies model was replicated in sectors where wells had incomplete electrical logs information, located in strategic positions, and then used as input data to the different static models. This allowed not only to condition the population of the continuous properties (total porosity and water saturation) of the units, but also to analyze the spatial distribution, regional trend, and evolution of these at the sedimentological level.

Based on maps plotting and geological models, allows us to draw several conclusions.

INTRODUCCIÓN

A partir del modelo petrofísico para la Fm. Vaca Muerta, basado en el volumen mineral que compone la matriz, se desarrolló y definió el modelo de electrofacies. Estas nos ayudaron a visualizar la heterogeneidad vertical y variación horizontal en el tipo de roca presente en los diferentes yacimientos, como así también para el poblado de los modelos geológicos 3D.

CARBONATOS	MINERAL	MATRIZ
Asociación QFM		
ARCILLAS		
PIRITA		
KEROGENO	MAT. ORG. INSOLUBLE	

Tabla 1. Matriz modelo petrofísico conceptual para Fm. Vaca Muerta.

METODOLOGÍA

Una vez definido el modelo petrofísico conceptual, se asociaron fracciones de los distintos minerales en cuatro grupos principales, de ellos se utilizaron los tres mayoritarios, las asociaciones de los Carbonatos, Arcillas y el grupo denominado QFM, compuesto por cuarzo, plagioclasas, feldespato y trazas de mica. Luego se usaron las mismas para extraer las electrofacies que posteriormente se utilizaron como dato de entrada al modelo geológico y de guía al poblado de las propiedades petrofísicas.

Definición de matriz mineral

Se calcularon las fracciones en volúmenes a partir de los pesos en seco de cada componente. Estos pesos para cada fracción provienen de dos posibles fuentes, una del perfil Geoquímico y la otra alternativa es con un modelo litológico a partir de los registros eléctricos básicos a cable, entre

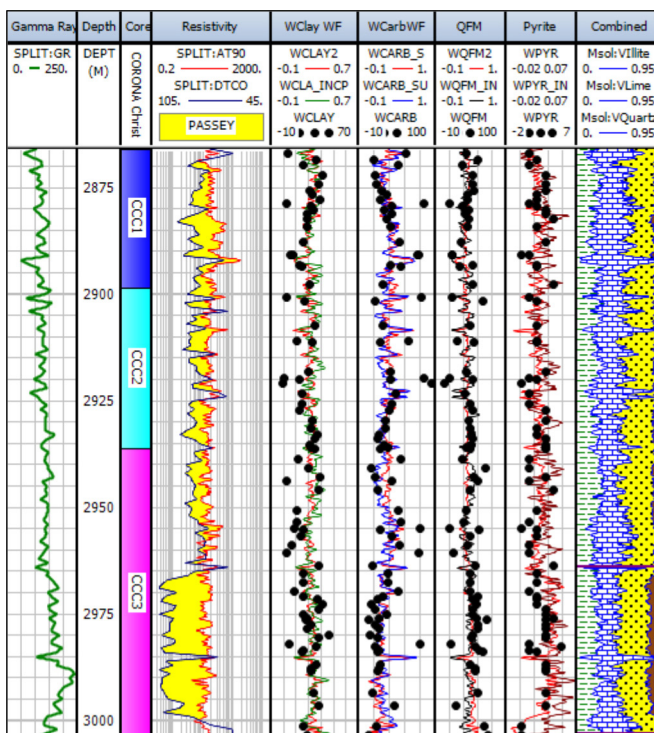


Figura 1. Verificación modelo litológico con Perfil geoquímico y Xrd.

los que se puede incluir el neutrón, utilizando los flujos de trabajo presentados en la propuesta de Cuervo, *et al.* 2016, en la URTEC – 2437257. Los factores mineralógicos fueron calibrados con difracción de rayos x, sobre coronas o testigos, medidos en laboratorio. La Figura 1, muestra la correspondencia de laboratorio contra modelo.

Definición de Electrofacies

Una vez calculada la fracción mineralógica, se procedió al ploteo en un gráfico triangular utilizando cada vértice con cada matriz mayoritaria presente en la formación. Partiendo de la clasificación de las Fangolitas definida por Dott, (1964), refiriéndonos en este caso a la composición de la matriz y no al contenido de granos, con cuatro componentes principales, Arcillosa, Calcárea, Silíceo y Mixta.

También se pensaron otras propuestas, como la de Gamero Díaz *et al.* (2012), en la cual describe dieciséis facies, ella quedó descartada por considerarla de demasiado detalle para el presente trabajo.

Finalmente se decidió confeccionar un diagrama triangular propio, definiendo seis electrofacies con el fin de visualizar las heterogeneidades verticales y laterales, y su posterior mapeo en un modelo geológico. La Figura 2 muestra las configuraciones de estos diagramas, marcando en rojo la misma zona central en cada uno de ellos.

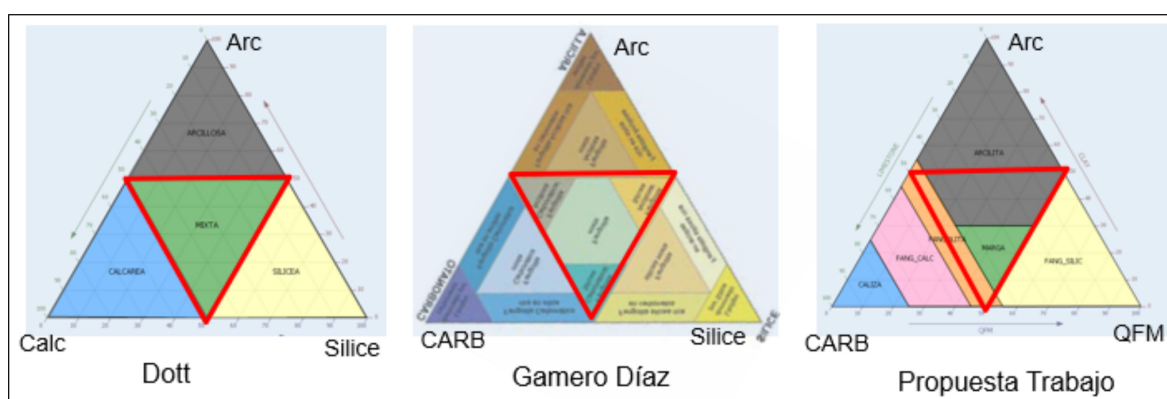


Figura 2. Definición de diagrama triangular utilizado, basado en las propuestas de Dott (1964) y Gamero Díaz, *et al.* (2012).

Tabla 2. Clasificación de electrofacies para nuestra propuesta de trabajo.

CALIZA
FANGOLITA CALCAREA
FANGOLITA
MARGA
FANGOLITA ARCILLOSA
FANGOLITA SILICOCLASTICA

Los límites definidos en este trabajo tienen el objeto de tratar de diferenciar variaciones verticales observadas en coronas, afloramientos y representadas en un perfil (Fig. 3).

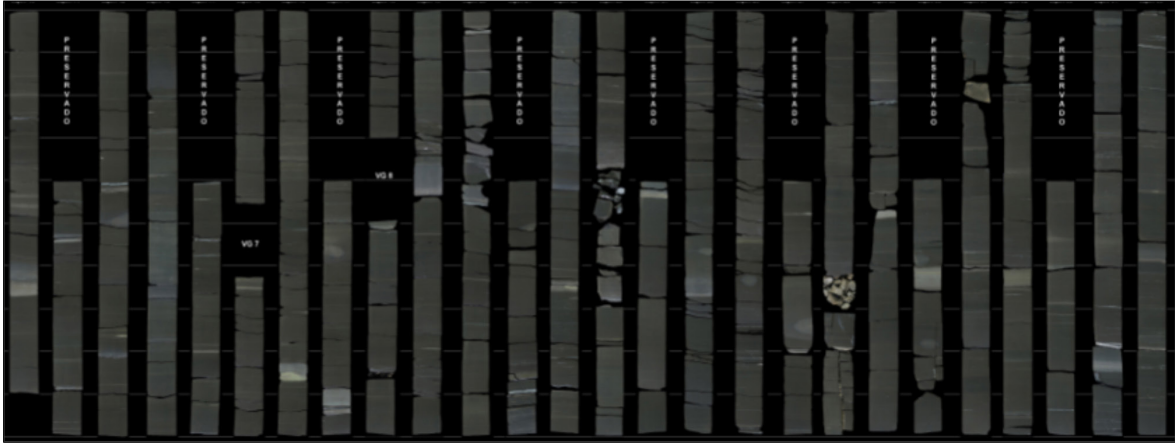


Figura 3. Variaciones verticales en corona, a diferenciar en las facies, (foto mosaico corona).

Un ejemplo de límites puede ser la electrofacie Margas, la cual se tomó con un valor de hasta 30% en la fracción Arcilla, de esta manera sirve de ayuda para marcar y diferenciar las variaciones mineralógicas hacia el centro del diagrama. En principio este límite del 30% creemos que es una aproximación para definir buenas condiciones para la estimulación hidráulica.

La Figura 4 muestra la evolución normal mineralógica a medida que se profundiza en la fm. Vaca Muerta, donde va disminuyendo el contenido calcáreo y aumenta el contenido silicoclástico. En el gráfico triangular esta evolución se aprecia de izquierda a derecha.

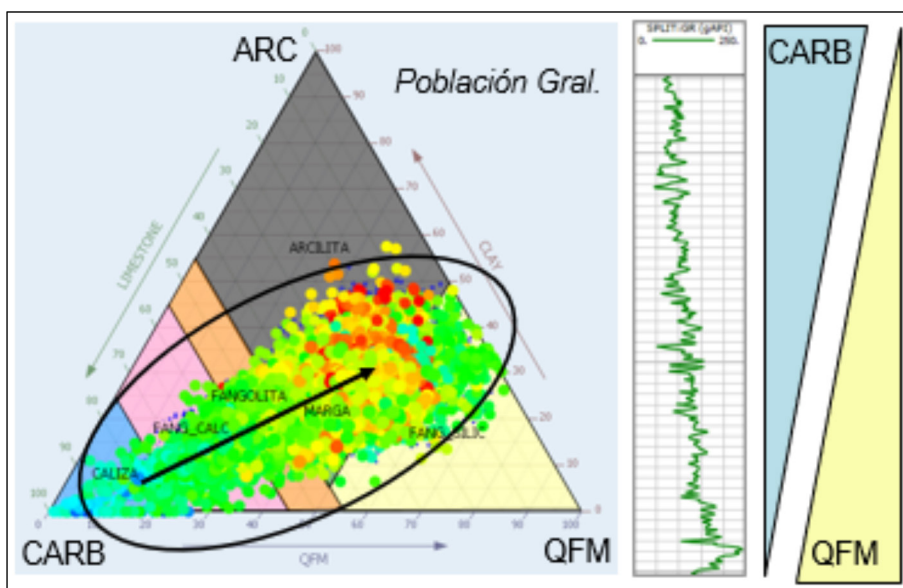


Figura 4. Gráfico triangular mostrando evolución Mineralógica en toda la Fm. Vaca Muerta.

Se ilustran dos ejemplos comparando los diagramas triangulares y las electrofacies representadas en un perfil, (Fig. 7).

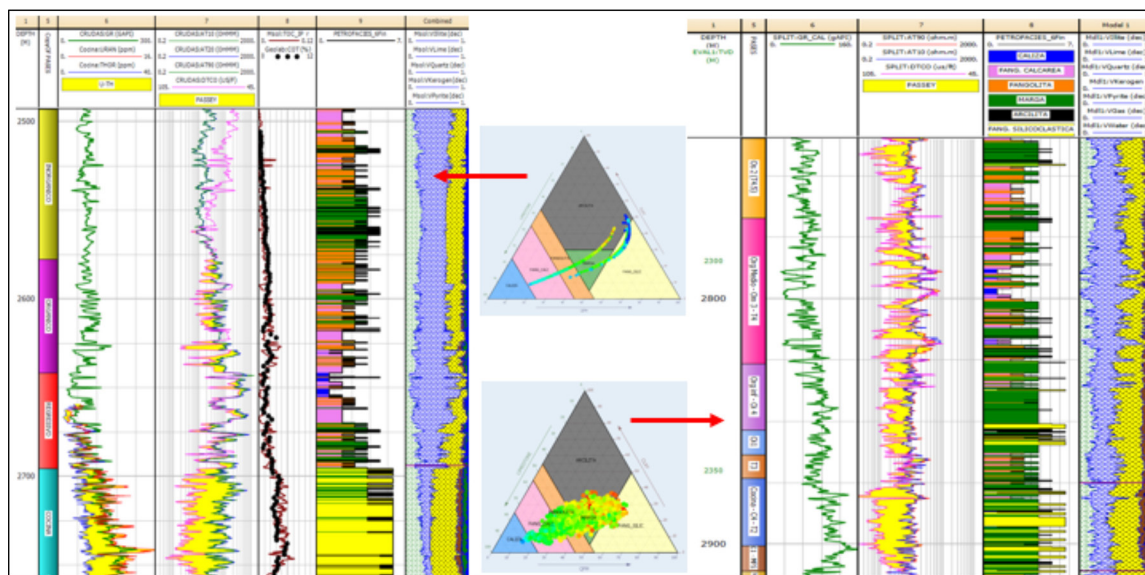


Figura 7. Electrofacies a partir de registros a pozo abierto y otro caso siguiendo las leyes del modelo.

MODELOS GEOLÓGICOS

Objetivo

El principal desafío fue generar un diseño que aborde el propósito de los modelos (cálculo del GOIS) y a la vez represente las características principales de la arquitectura geológica. Para ello se propuso una metodología de trabajo orientada a la construcción de modelos 3D en forma rápida y flexible, basada en un diseño hecho a medida del desafío planteado y que permita responder a interrogantes específicos (P. Ringrose y M. Bentley, 2015).

Marco sísmo-estratigráfico

El sistema Quintuco-Vaca Muerta presenta un espesor comprendido entre 1050 y 1100 m y está conformado por una sucesión mixta silicoclástica-carbonática, acumulada en un ambiente marino somero a profundo. La Fm. Vaca Muerta está compuesta por una sucesión de margas y arcillitas calcáreas ricas en materia orgánica, resultante de un periodo de máxima transgresión. Desde un punto de vista estratigráfico secuencial y de acuerdo con la interpretación realizada por Massafiero *et al.* (2014), el sistema Quintuco-Vaca Muerta puede subdividirse en 3 ciclos deposicionales transgresivo-regresivos de segundo orden. La base de la Fm. Vaca Muerta está representada por la superficie I mientras que el techo de la Fm Quintuco está representado por la superficie VII (Fig. 8).

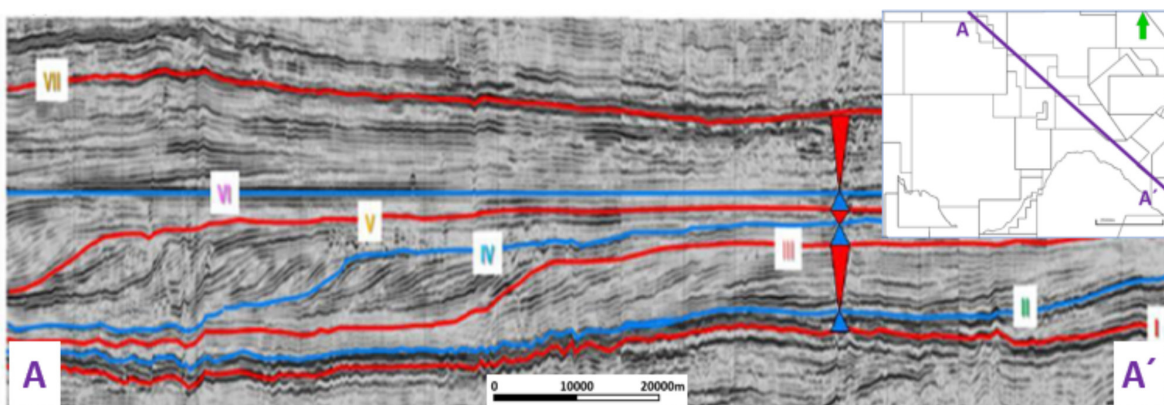


Figura 8. Sección sísmica de orientación NO-SE donde se ilustran las superficies regionales interpretadas por Massaferro *et al.*, 2014.

En el esquema mencionado se reconocieron distintos tipos de clinoformas del sistema Quintuco – Vaca Muerta de acuerdo con la geometría de los reflectores sísmicos y sus terminaciones: *topsets* en la zona proximal y somera, *foresets* en la zona central y *bottomsets* en la zona distal (Mitchum *et al.* 1977). El quiebre de pendiente entre el *topset* y el *foreset* se denomina *rollover point* o *shelf break* (Fig. 9). Los bloques donde se construyeron los modelos estáticos se encuentran en posición desde base de *foreset* hasta *bottomset*.

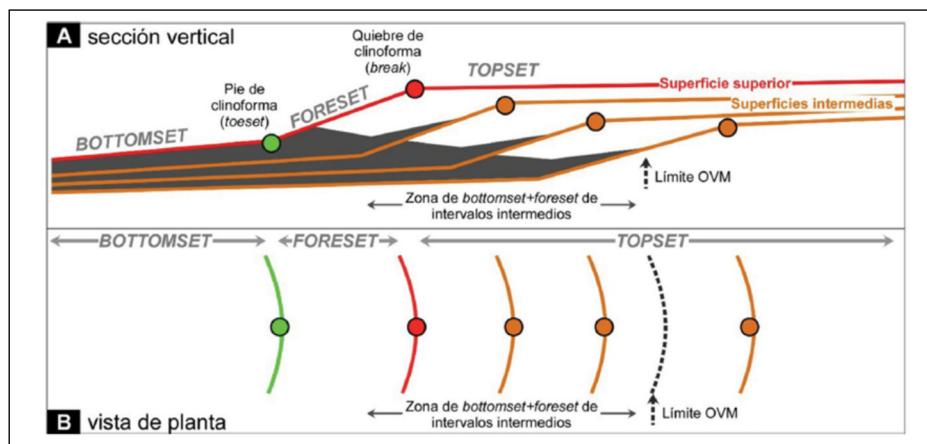


Figura 9. A- Sección esquemática conceptual de las clinoformas del Sistema Quintuco – Vaca Muerta. B- Vista en planta de las unidades, zonación y distribución de sus elementos característicos. Extraído de Domínguez *et al.* 2018.

La naturaleza de la Fm. Vaca Muerta, conformada por una amplia heterogeneidad litológica, con variaciones en las facies presentes tanto en sentido lateral como vertical, hizo que sea necesario y fundamental la incorporación de las electrofacies para poblar y guiar las propiedades petrofísicas y de esta manera obtener un modelo estático representativo.

Integración de las electrofacies dentro del flujo de trabajo

La secuencia de trabajo empleada fue la siguiente:

- 1 - Verificación y correlación pozo a pozo de los principales horizontes del esquema sismo-estratigráfico regional definido en la compilación de trabajos técnicos denominada “Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta” (G. González *et al.*, 2016) y actualizaciones posteriores.
- 2 - Generación de un modelo estructural simplificado. Esto quiere decir que las fallas se consideraron verticales y abarcando todo el intervalo de interés.
- 3 - Subdivisión en niveles en base a los principales horizontes interpretados, de interés para el cálculo volumétrico.
- 4 - Grillas constituidas por celdas de 100*100 m en la dimensión XY, con altura variable de acuerdo con el grado de detalle vertical requerido en cada zona (h min de celda=1m).
- 5 - Carga del modelo de electrofacies como propiedad discreta en el modelo geológico. El beneficio en este punto es de observar las heterogeneidades verticales y horizontales de la formación Vaca Muerta en los modelos 3D (Fig.10). A la vez sirvieron de guía para el poblado petrofísico.

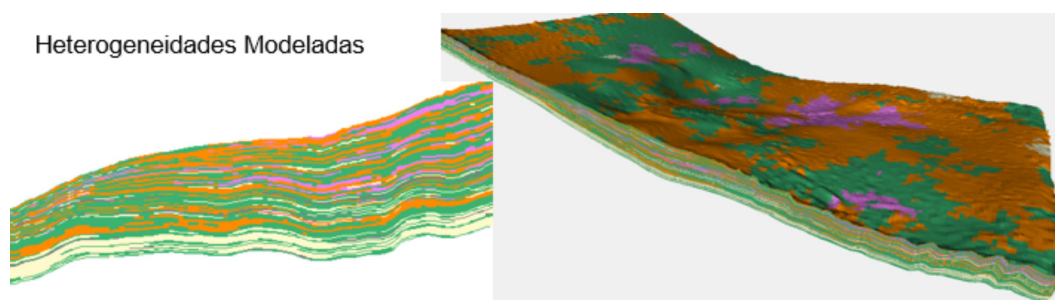


Figura 10. Carga electrofacies al modelo geológico 3D.

- 6 - Escalado y poblado estadístico de propiedades petrofísicas continuas: porosidad total (Φ_{iT}), saturación de agua (S_w) y Carbono orgánico total (COT), guiadas por las electrofacies. Esto impacta en el momento de seleccionar los potenciales niveles de navegación al poder identificar facies más favorables para su desarrollo (Fig. 11).

En el corte estructural mostrado abajo se observa en la parte basal una participación más silicoclástica y distribución homogénea de las electrofacies, mientras que las mismas van gradando hacia facies más carbonáticas a medida que nos desplazamos hacia los niveles superiores, donde los mismos pasan a tener un arreglo progradacional. A la vez se aprecia la variabilidad lateral de Este a Oeste (Fig. 12).

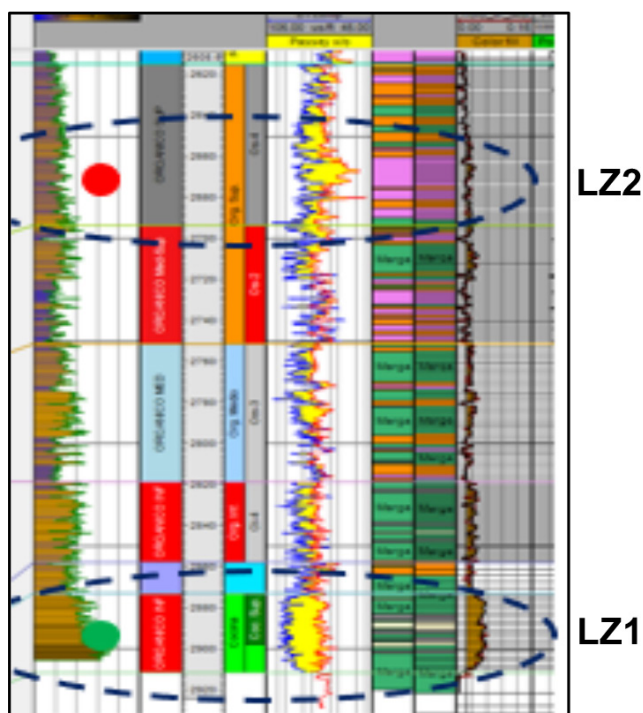


Figura 11. Niveles de navegación seleccionados con distintas electrofacies.

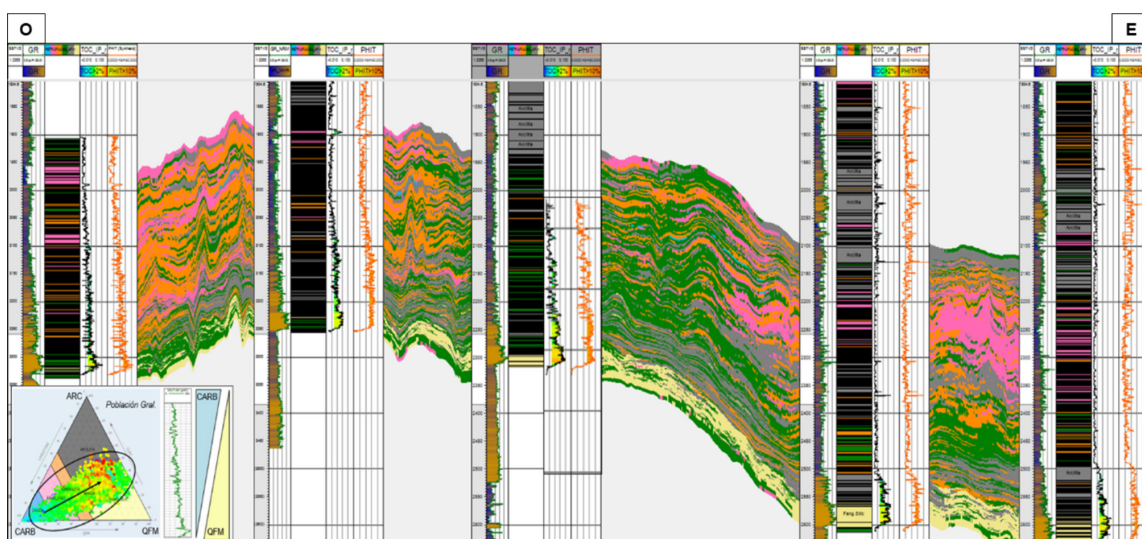


Figura 12. Sección en sentido E-O de todo el intervalo de interés modelado donde se observa la variabilidad tanto lateral como vertical de las electrofacies.

Se guió la distribución espacial de las diferentes electrofacies a partir del modelo conceptual basado en la progradación de las clinoformas en sentido SE-NO (Domínguez, *et al.* 2017a). (Fig. 13 a - b).

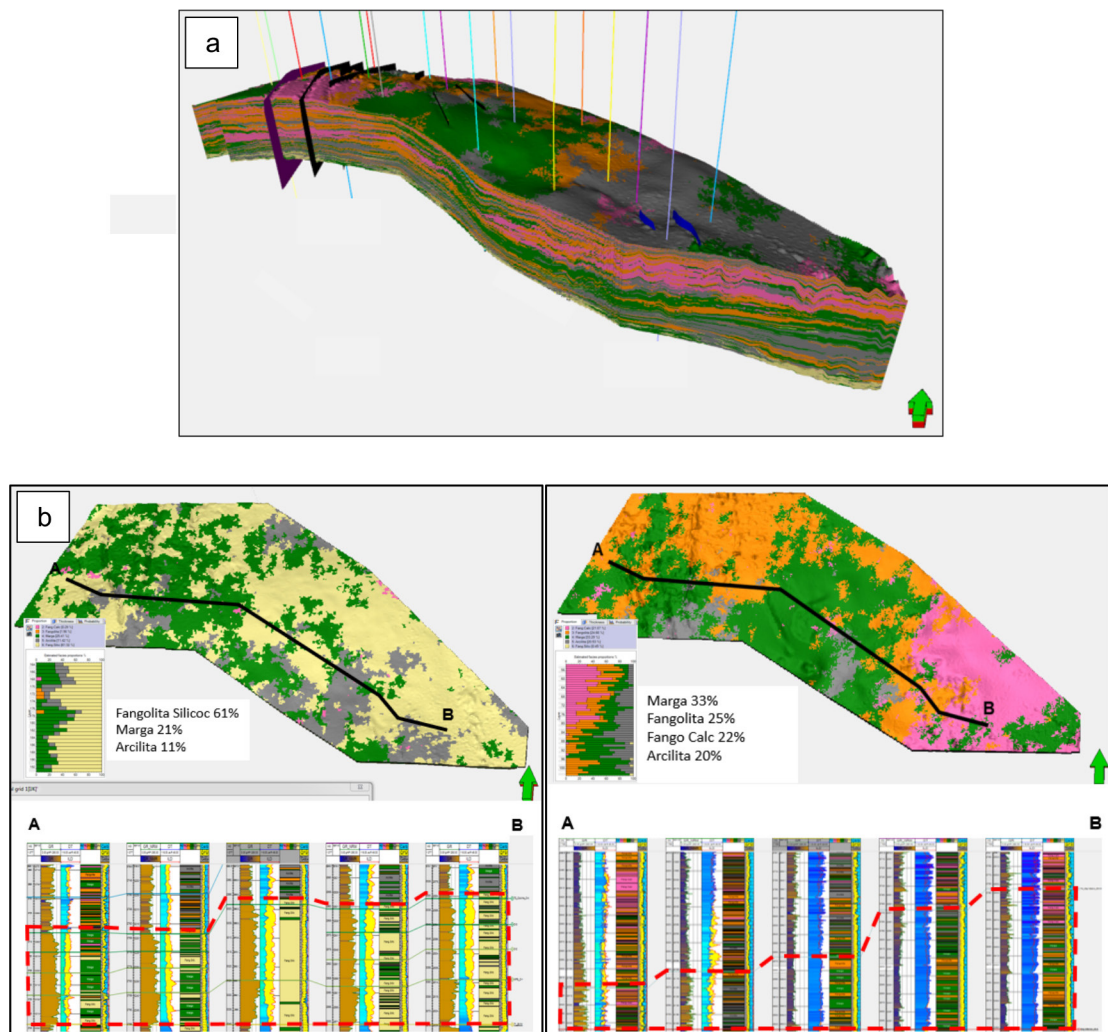


Figura 13. a. Distribución espacial de las diferentes electrofacies a partir del modelo conceptual. b. En los cortes se observa la homogeneidad facial en los niveles agradantes correspondientes al *bottomset* (izquierda) y la variación hacia facies cada vez más heterogéneas hacia el tope, zona de *foreset* (derecha).

CONCLUSIONES

- Las electrofacies ayudaron a identificar y caracterizar las heterogeneidades verticales y laterales observadas en la Formación Vaca Muerta, otorgando una mayor robustez a los modelos geológicos.
- Las electrofacies definidas pudieron replicarse en los diferentes bloques y sirvieron de guía para el poblado de propiedades petrofísicas en los modelos geológicos 3D.
- Se obtuvo un buen ajuste entre la distribución espacial de las electrofacies y el modelo geológico conceptual propuesto para la formación Vaca Muerta, donde se identifican los niveles agradacionales en la parte basal y arreglos progradacionales hacia el tope.

- La heterogeneidades verticales y horizontales identificadas son un valioso complemento que colabora en la planificación de la perforación según los distintos comportamientos de las herramientas utilizadas, por ejemplo, en la construcción de la curva en pozos horizontales, en el diseño de las estimulaciones hidráulicas, entre otros.
- La definición de electrofacies ayudó a caracterizar potenciales niveles de navegación con posible interés geológico.
- Próximos pasos:
 - Contribuir en la navegación de los pozos horizontales, fijando límites faciales en zonas con menor interés hidrocarburífero.
 - Complementar con datos geomecánicos, para alimentar el modelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo queremos agradecer a Diego Licitra por su valioso aporte durante el proceso de modelado geológico y definición de electrofacies.

También a YPF S.A. por permitirnos la realización de este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Cuervo et al, 2016. URTEC – 2437257. Towards a Simplified Petrophysical Model for the Vaca Muerta Formation.
- Dott, R. H., 1964, Wacke, graywacke and matrix; what approach to immature sandstone classification? *Journal of Sedimentary Research* 34: 625-632.
- Gamero Díaz, H., C. Miller y R. Lewis, 2012, sCore: a classification scheme for organic mudstones based on bulk mineralogy. *Search and Discovery Article #40951*.
- Ringrose, P and Bentley, M., 2015. *Reservoir model design: A practitioner's guide*. ISBN: 978-94-007-5496-6.
- Massaferro, J.L., Zeller, M., Giunta, D.L., Sagasti, G. y G. P. Eberli, 2014. "Evolución del sistema mixto Tithoniano-Valangianiano (formaciones Vaca Muerta, Quintuco y equivalentes) a partir de estudios de afloramiento y subsuelo, centro sur de la cuenca Neuquina". IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos IAPG, CD Trabajos Técnicos, Mendoza, Argentina.
- Mitchum, R.M., P.R. Vail & S. Thompson. 1977. Seismic Stratigraphy and global changes of sea level. Part. 7: Seismic stratigraphic interpretation procedure: in *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration* (C.E. Payton, ed.): Am. Assoc. Petroleum Geol. Memoir 26, p. 135-143.
- González, G., Vallejo, M., D., Kietzmann, D., Marchal, D., Desjardins, P., Tommasini, F., G., Rivarola, L., G., Domínguez, R., F. 2016. *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta. Integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos*. IAPG.
- Domínguez, R. F., C. Bernhardt, F. González Tomasini, M. Fantín, M. Di Benedetto, 2018. *Varia-*

ciones paleogeográficas de las unidades ricas en materia orgánica de la Formación Vaca Muerta en el Engolfamiento Neuquino. XX Congreso

de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Simposio de Recursos No Convencionales: Hacia una Nueva Convención.