

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES MINERALÓGICAS PARA EL ENTENDIMIENTO TRIDIMENSIONAL DE UN ÁREA CORE EN LA FORMACIÓN VACA MUERTA

Tamara Mobilio¹, Carolina Bernhardt¹

1: YPF S.A. tamara.mobilio@ypf.com, carolina.bernhardt@ypf.com

Palabras clave: Mineralogía, *shale*, clinoformas, rampa

ABSTRACT

The identification of the heterogeneities in Vaca Muerta Fm. is key to understand the variability in the quality and the behavior of the reservoir to optimize the full field development. The goal of this paper is to present an integrated study of the geology and petrophysics of Vaca Muerta Formation in a core area of the Play in the Neuquén Basin. This characterization is presented through a static model of the reservoir that includes mineralogical variables as part of the key parameters for the visualization and analysis of spatial changes, increasing predictability in the study area and encouraging synergy with other disciplines for integrated assessment.

In a first stage, petrophysical calculations were done with a deterministic-probabilistic model incorporating 21 wells with basic and/or special electrical logs into the calculations, adjusting the final determinations with laboratory data on different types of rock samples (cutting, sidewall cores and cores). As well as this, a static model was built with the information of 38 vertical wells and 72 horizontal wells distributed throughout the area with the output of petrophysical interpretations such as total porosity, total saturation, TOC and inorganic mineralogy (volume of carbonates, quartz+feldspars and clay).

In a second stage, the analysis of the results and the integration within a regional paleogeographic context of the Quintuco-Vaca Muerta System led to the identification of two zones with different mineralogical behavior:

1) a ramp area with higher relative calcareous content (lower clastic content) and a divergent pattern of mineralogy in well logs. 2) a mixed platform with a greater presence of clastic content, showing a prograding pattern in well logs that evidences a characteristic of the system.

The characterization of two different geomorphological areas based on the distribution of the mineralogical properties leads to a better understanding of well performance, improve stimulation designs, adjust drilling programs and geosteering models.

INTRODUCCIÓN

La caracterización estática de la Fm. Vaca Muerta como reservorio no convencional tipo *shale*, es clave para múltiples decisiones dentro de la industria. Generalmente se hace especial foco en la distribución espacial de las propiedades petrofísicas tales como porosidad, saturación y contenido en materia orgánica. Otros componentes de la roca como la mineralogía inorgánica

suelen analizarse unidimensionalmente en el pozo (Ortiz *et al.*, 2020) o se simplifica a través de diagramas ternarios (Nielsen *et al.* 2020; Marchal *et al.*, 2016). Esto se debe tanto a la incertidumbre del flujo petrofísico para estimar estas variables y su calibración con resultados de laboratorio (diferentes laboratorios y técnicas de medición), como también a la escasa representatividad de mediciones más precisas (p. ej. perfiles geoquímicos).

En esta contribución se presenta un análisis de la distribución de la mineralogía en la Formación Vaca Muerta como un parámetro clave para un mejor entendimiento de la variabilidad, tanto en la vertical como de forma lateral. Se entiende como la incorporación de esta variable permite interpretar el contexto paleogeográfico de la formación en el área de estudio, logrando así obtener un modelo conceptual completo para utilizar de soporte de la estrategia de desarrollo y para el entendimiento del comportamiento del reservorio como la performance de pozos y la respuesta ante la estimulación hidráulica.

METODOLOGÍA

Con el objetivo de caracterizar y analizar la variabilidad mineralógica, tanto de la sección vertical como areal de la Formación Vaca Muerta (Weaver 1931; Leanza 1973) en una zona hub core, el presente trabajo se resume en 2 etapas: la primera es la determinación petrofísica en pozos verticales y confección de un modelo estático de celdas de 100 x 100 x 1 m, cubriendo los diferentes niveles de navegación del reservorio de un área semi-regional de 1205.7 km² y una segunda etapa de análisis de mapas mineralógicos en conjunto con datos de laboratorio disponibles.

Las estimaciones petrofísicas se realizaron para 21 pozos a través de un modelo combinado determinístico – probabilístico y con un ajuste roca-perfil con datos de laboratorio sobre diferentes tipos de muestras de roca (cutting, testigos laterales y coronas).

Hay pozos claves, esto significa que son pozos con registros básicos y especiales (Mineralógicos, Resonancia Magnética y Dieléctrico), que además tienen mediciones de laboratorio como difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), petrofísica (porosidad y saturación) y carbono orgánico total (COT). En estos pozos la incertidumbre de los resultados es menor con respecto al resto de los pozos que no cuentan con esta información (Fig. 1).

Los resultados del modelo son determinaciones en volumen de los componentes minerales de la matriz (Carbonatos, Cuarzo + Feldespato, Pirita y Arcillas Totales, COT, porosidad (PHI) y saturación (SW).

Para la construcción del modelo estático se utilizó la información de 38 pozos verticales y 72 pozos horizontales (considerando los topes hasta el aterrizaje) distribuidos en el área de estudio, con la tendencia de los horizontes provenientes de la sísmica, considerando intervalos conformes en la base y geometrías progradantes hacia el tope del modelo.

El modelo con celdas de tamaño 100 x 100 x 1 m se propagó con las interpretaciones petrofísicas tales como porosidad total, saturación total, COT y la mineralogía inorgánica, como volumen de carbonatos (VCARB), cuarzo + feldespatos (VQFP) y arcillas totales (VCLAY). El poblado está realizado con Simulación Gaussiana Truncada, isotrópico en los niveles basales y anisotrópicos en los niveles superiores (respetando el modelo conceptual).

La generación de mapas se realizó para 4 intervalos de la sección orgánica de VM (COT > 2%), considerando el framework regional definido internamente en YPF: Cocina (C), Orgánico Inferior (Oi), Orgánico medio (Om) y Orgánico Superior (Osup).

Por último, se realizó el análisis mineralógico a partir de los mapas extraídos del modelo estático y también de los resultados de laboratorio de DRX y FRX (Fig. 1), dando mayor certeza a la variabilidad mineralógica mapeada.

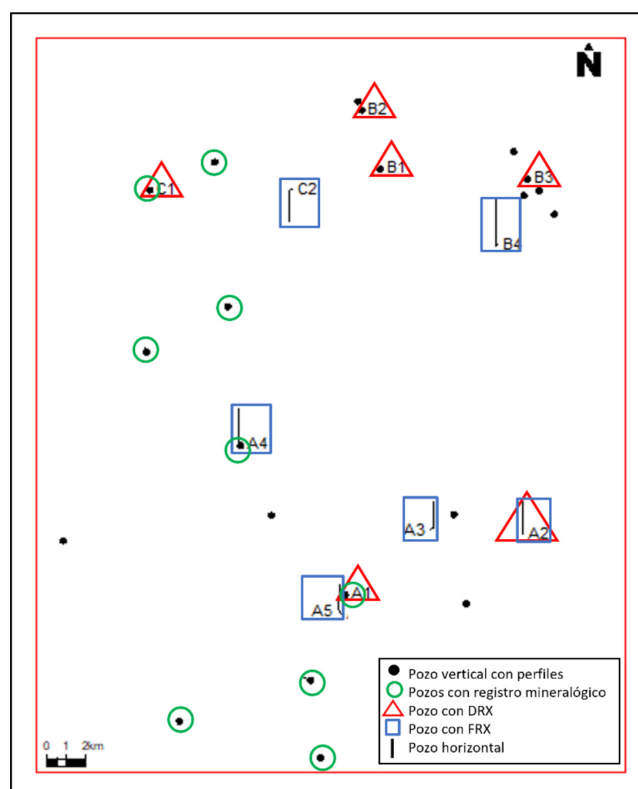


Figura 1. Distribución de pozos de referencia con datos de laboratorio de DRX y FRX

RESULTADOS

Interpretación petrofísica

En la Figura 2 se muestra la interpretación mineralógica calibrada con datos de laboratorio, tanto para un pozo clave como para uno con set de registros básicos. Ambos pozos representan la proporción y distribución de la mineralogía en dos zonas extremas del área de estudio.

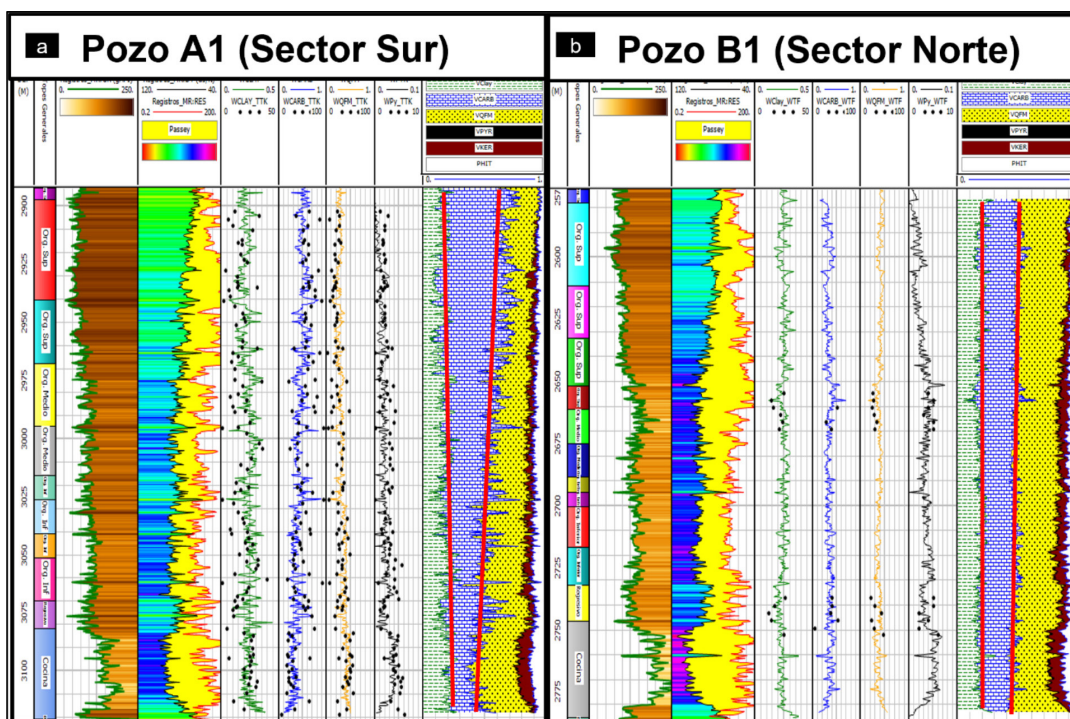


Figura 2. Interpretación mineralógica de los pozos de referencia A1 (a) y B1 (b). Track #5 a Track 8 muestran la interpretación de Clay (minerales de arcilla totales), Carbonato, QFP y Pirita ajustada con los datos de laboratorio en % de peso en seco. Track#9 muestra la mineralogía en volumen indicado el patrón progradante (Pozo A1) y astatico (Pozo B1) de los perfiles.

En el pozo A1, ubicado en el sector Sur del área de estudio, puede observarse como el contenido de carbonato aumenta de base a techo de la formación (23% v/v a 53% v/v), manifestando un patrón progradante. Por el contrario, el contenido de minerales silicoclásticos ($Qz + \text{Plagioclasa} + \text{Feldespato K}$) y arcillas disminuye en ese sentido. El pozo B1, ubicado en el sector Norte, muestra un comportamiento homogéneo tanto para el contenido carbonático (27% v/v a 31% v/v), como silicoclástico y contenido de arcillas, adquiriendo un patrón más astatico (indicado por las líneas rojas).

Mapas Mineralógicos

A partir del modelo estático se extrajeron varios mapas mineralógicos para diferentes niveles dentro de VM (Cocina, Orgánico inferior, Orgánico medio, Orgánico superior).

A continuación, se presentan los mapas de volumen de carbonato (VCARB) y volumen clástico (VCLAS = $VQFP + VCLAY$) los cuales muestran de manera más marcada la variabilidad, tanto areal como en la vertical.

Comenzando por el nivel Cocina, en los mapas de la Figura 3, se observa como el VCARB disminuye desde el SSO y NNE hacia el W, estando los valores más altos (28% v/v) en el NNE del área. Los mapas de VCLas, si bien muestran una leve diferencia entre ambos sectores (4%), manifiestan los valores más bajos en el sector NNE (50% v/v) y hacia el sur los más altos valores clásticos (54% v/v).

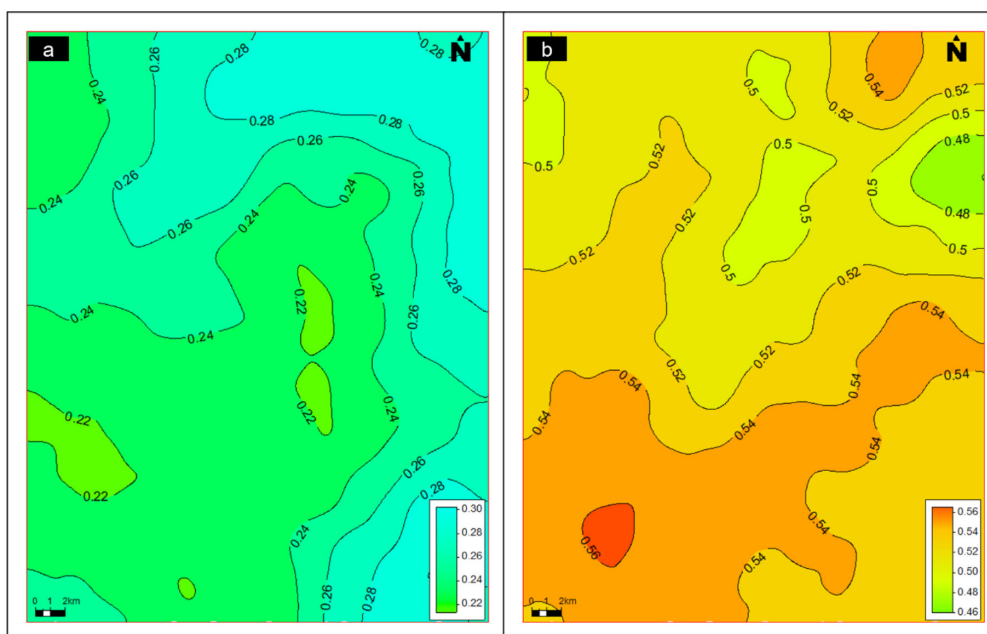


Figura 3. Mapa de volumen carbonático (a) y volumen clástico (b) para la Cocina.

Los mapas del Orgánico inferior (Fig.4) muestran una menor variabilidad areal con valores promedios para toda el área de VCARB ($\sim 30\%$ v/v) y VClas ($\sim 50\%$ v/v). En cambio, sí se observa un aumento en el contenido carbonático y disminución en el nivel clástico con respecto al nivel basal Cocina. La diferencia es más marcada en el sector sur de la zona de estudio.

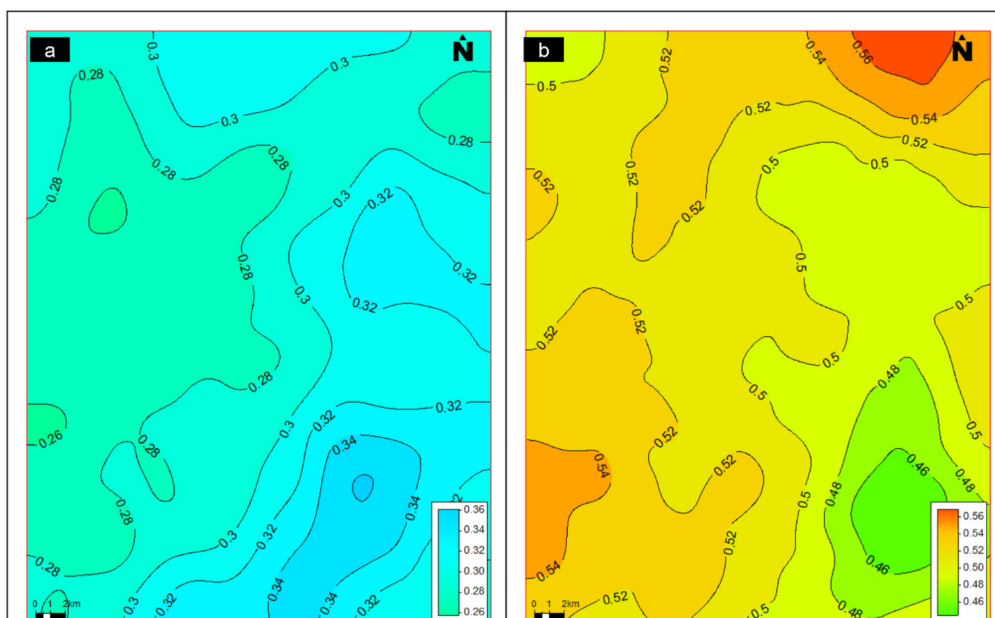


Figura 4. Mapa de volumen carbonático (a) y volumen clástico (b) para el Orgánico inferior.

El Orgánico medio presenta variaciones más significativas para ambas propiedades (Fig. 5), observándose una zona SSO fuertemente carbonática (40% v/v) y menos clástica (44% v/v),

mientras que la zona NNE prácticamente no registra cambios con respecto al nivel anterior, presentando valores de VCarb 29% v/v y VClas 53% v/v.

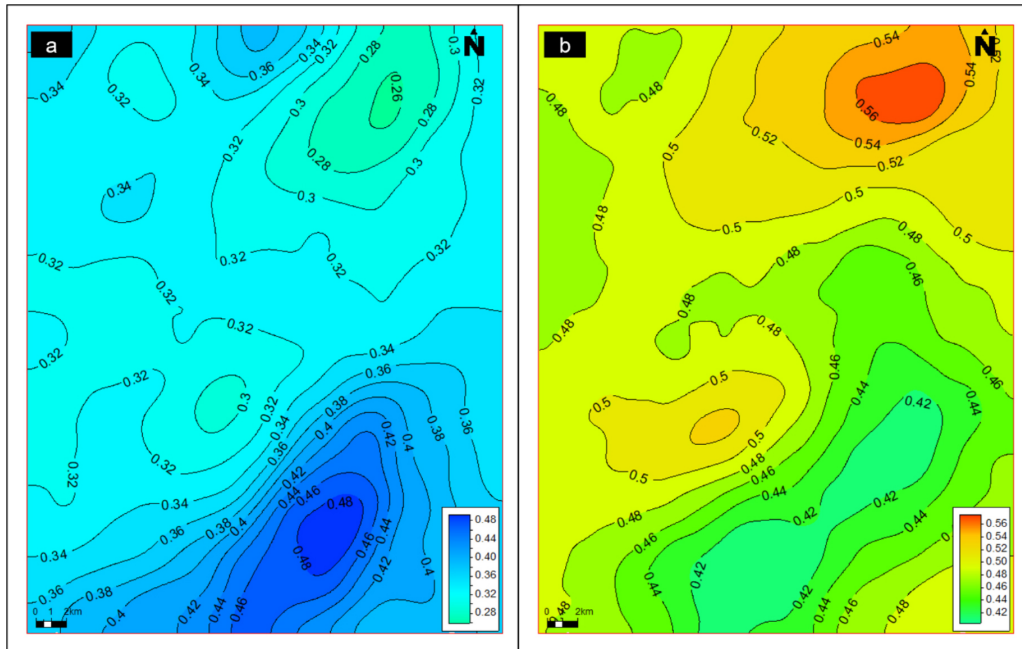


Figura 5. Mapa de volumen carbonático (a) y volumen clástico (b) para el Orgánico medio.

En cuanto al Orgánico superior es el nivel en el que se aprecia la mayor diferencia entre zonas (Fig. 6), con un máximo VCarb con 54% v/v y un VClas mínimo de 35 %v/v en la zona SSO mientras que al NNE se observan valores de VCarb de 38% v/v y VClas de 48% v/v.

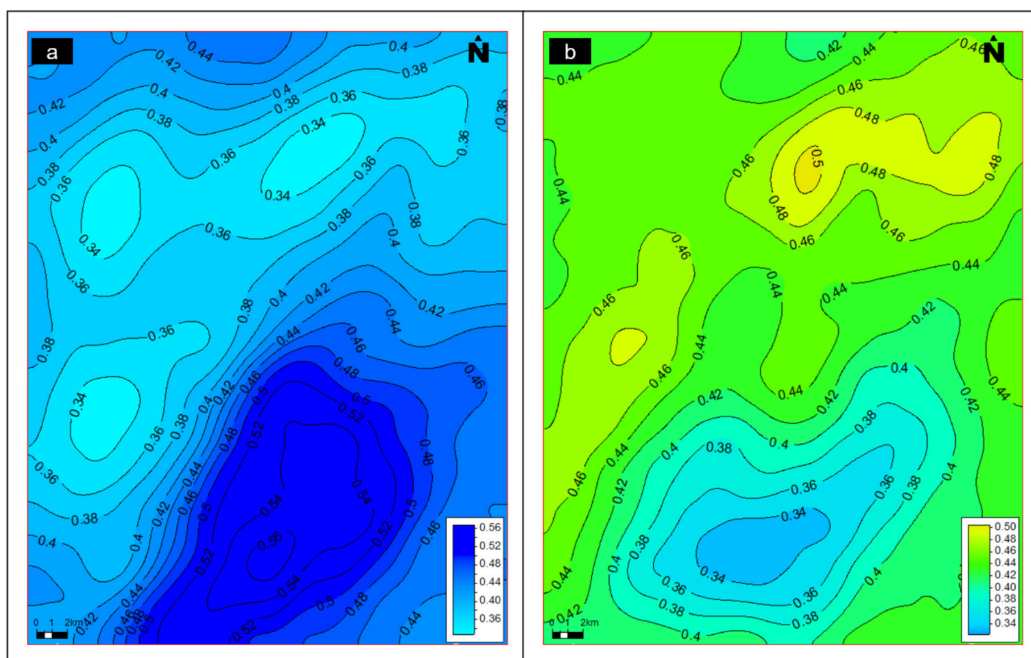


Figura 6. Mapa de volumen carbonático (a) y volumen clástico (b) para el Orgánico superior.

Comparando los valores de VCarb y VClas para los diferentes niveles se observa que la mayor diferencia se presenta en la zona SSO del área de estudio, mientras que la zona NNE hay una constancia del contenido carbonático y clástico.

Análisis de datos de laboratorio

Se analiza la composición mineralógica a través de diagramas ternarios con valores de DRX (corona-cutting) de 5 pozos representativos del área de estudio (Fig.1). Si bien la cantidad de datos es reducida, se consideran representativos de cada nivel analizado. Para la construcción de estos, se agruparon las facies minerales en: sílice (cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa); carbonato (calcita y dolomita) y todas las arcillas en el polo arcilla.

Pozos en el sector Sur

En el diagrama del pozo A1 (Fig. 7) se observa que el mayor contenido de sílice está en la Cocina (30-60% w/w), disminuyendo hacia niveles superiores (Orgánico superior 5-35% w/w). Por el contrario, el carbonato presenta una tendencia inversa, con menor proporción Cocina (15-40% w/w), y valores máximos en el Orgánico superior (35-90% w/w).

El pozo A2 (Fig. 7) tiene en la Cocina valores altos de sílice (30-50% w/w), con un decrecimiento hacia el Orgánico superior (15-25% w/w). Con respecto al carbonato, hay un incremento desde la Cocina (20-35% w/w) hasta el Orgánico superior (60-75%w/w).

Pozos en el sector Norte

En los pozos B2 y B3 (Fig. 7) se observan los valores más bajos de sílice (20- 30% w/w) y altos valores de carbonato (50-60 % w/w), no advirtiéndose saltos significativos de ambos componentes entre niveles.

El pozo C1 (Fig. 7) muestra valores de sílice entre 35-60% w/w para los niveles Cocina y Orgánico inferior, con una leve caída del contenido de sílice hacia los niveles Orgánico medio (30-50% w/w) y Orgánico superior (25-45% w/w). Lo inverso sucede con el contenido carbonático, donde se observan los valores más bajos en la Cocina (15-35% w/w), Orgánico inferior (15-40% w/w) y Orgánico medio (15-55% w/w) y los valores más altos en el Orgánico superior (20-60 % w/w). Al igual que los pozos B1 y B2 no hay variaciones significativas en los diferentes niveles analizados, tanto de sílice como carbonatos.

También se analizaron las proporciones de Aluminio (Al), Sílice (Si) y Calcio (Ca) provenientes de los datos de mediciones con FRX de la rama horizontal del nivel Cocina para 6 pozos representativos del área (Fig. 8).

La fracción arcilla se representa con el elemento Al, cuarzo-feldespatos con Si y carbonatos con Ca.

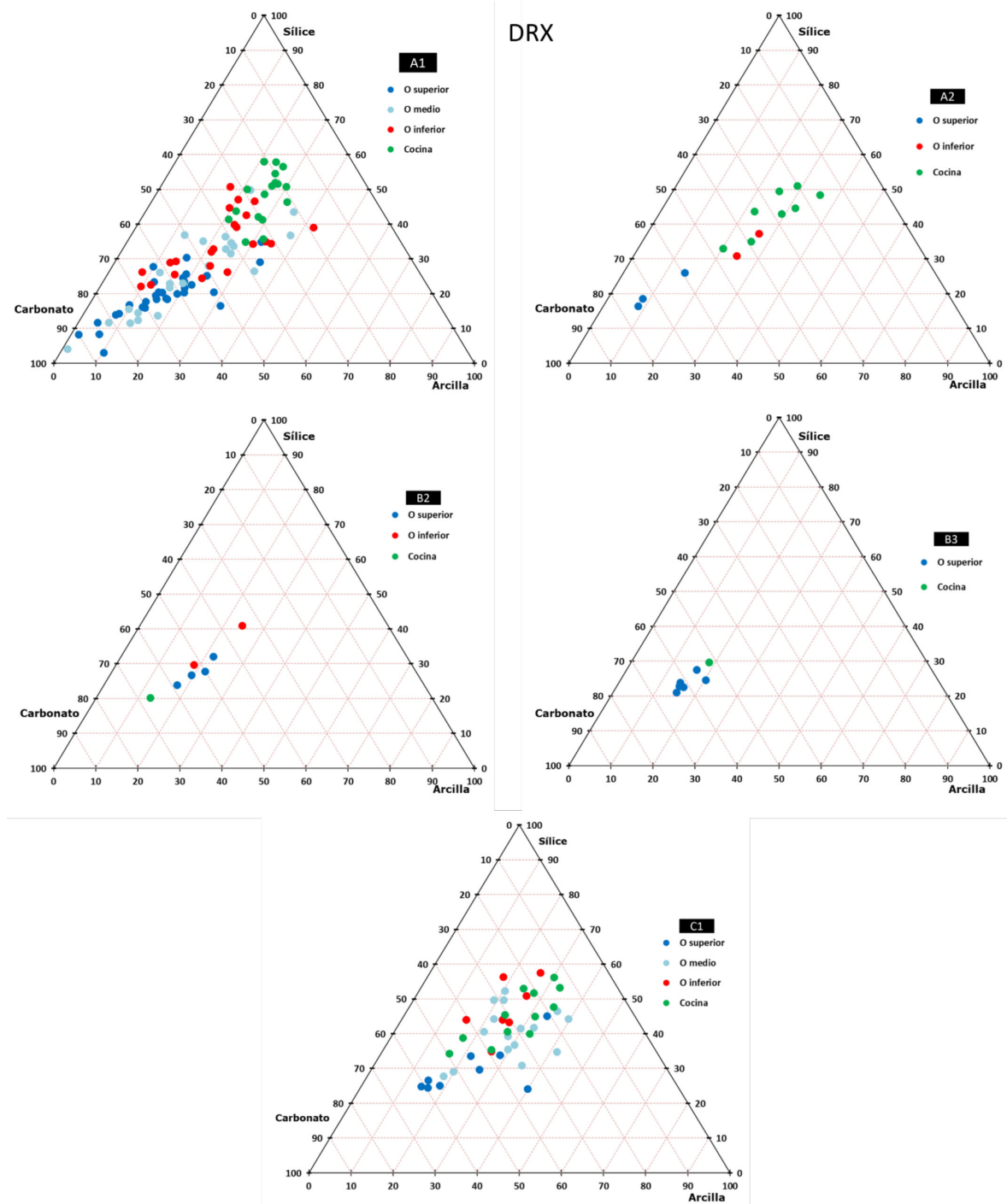


Figura 7. Diagramas de composición mineralógica (Silice-Arcilla-Cuarzo) de los pozos A1, A2, B2, C1.

Los pozos del sector sur (A2, A3, A4 y A5) tiene los valores más altos de sílice (60-62%) y más bajos de calcio (28-31%), con respecto a los pozos del sector norte (B4 y C2) con contenido de sílice entre 48% y 59% y carbonato entre 42% y 33%. El contenido de aluminio (~10%), no muestra variaciones entre pozos.

Estos resultados se consideran representativos ya que todos los pozos navegaron el mismo nivel dentro de la cocina, sin desvíos en la geonavegación.

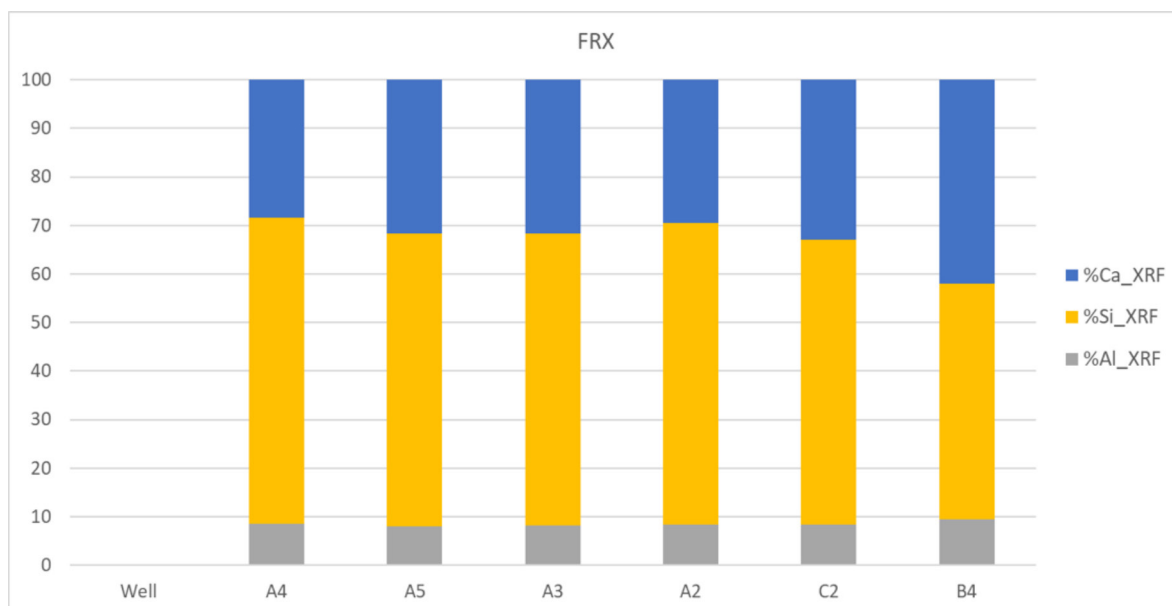


Figura 8. Gráfico de barras con las proporciones de Al, Si y Ca para los pozos A 2-5, B4 Y C2, todos horizontales al nivel cocina.

Discusión

Al analizar los mapas mineralógicos de la cocina se visualizaron dos zonas marcadas (Fig. 9): la zona A al SSO más silíceo y con menor contenido carbonático (22-24% V/V) y la zona B, al NNE más carbonático (28% V/V) y con menor contenido de sílice. Considerando la homogeneidad de este nivel y en una posición distal como la que está en esta zona (Desjardins *et al*, 2016), no se esperaría una variación en esta variable. El modelo conceptual presentado por Domínguez *et al* (2018), identifica para la Cocina una zona de bottomset distal de una clinoforma (composición mixta-más silicoclástica) y una zona al norte con el desarrollo de una rampa carbonática (con claro predominio calcáreo). El dominio de rampa se extendería hacia la zona norte de nuestra área de estudio, hipótesis que quedó sin confirmar por falta de datos mineralógicos.

Considerando entonces el modelo conceptual regional (Fig. 9), la evolución vertical de la mineralogía analizada previamente en este trabajo como interpretación mineralógica 1 D en perfiles (Fig. 3), mapas mineralógicos extraídos del modelo estático (Figs. 3-6), Diagramas triangulares de DRX (Fig. 7) y análisis de datos de FRX (Fig. 8), se distinguen entonces tres zonas con características propias. La zona A (Fig. 9) situada al SSO en los mapas y representada por los pozos A1-5, muestra un marcado aumento del contenido carbonático desde los niveles basales a los niveles superiores, en detrimento de una disminución del contenido clástico. Este patrón progradante

de la mineralogía es observado en el perfil del pozo A1, poniendo en evidencia la progradación de las clinoformas de Vaca Muerta (Desjardins *et al.*, 2016 y Marchal *et al.*, 2016), pasando de un *bottomset* distal más clástico para el nivel cocina a un foreset más carbonático en el orgánico superior. La zona B (Fig. 9) situada al NNE y correspondiente a los pozos B1-4, en cambio no presenta grandes variaciones del contenido carbonático entre todos los niveles, lo mismo que ocurre con el contenido de sílice. Este comportamiento se aprecia en el perfil del pozo B1, en donde el patrón agradable de la mineralogía es característico de una geometría en rampa, dominio en el cual se ubicaría para todos los niveles (Fig. 10). La zona C (Fig. 9), comprendida entre ambas zonas contiene a los pozos C1 y C2 y constituye una zona de transición entre ambos sistemas. Por un lado, el contenido de sílice se mantiene constante en los niveles basales, aumentando levemente hacia el tope de la formación, mientras que el contenido carbonático no muestra una tendencia clara, manteniéndose prácticamente en el mismo rango.

Cada una de estas zonas identificadas (A, B y C Fig. 9) presenta una evolución vertical propia, estando las mayores diferencias en cuanto a la mineralogía en los niveles superiores de Vaca Muerta, manifestándose una vez más la heterogeneidad lateral y vertical de esta formación incluso en un área reducida (Kietzmann *et al.*, 2019; Minisini *et al.*, 2019). Si bien la caracterización de esta heterogeneidad es clave para el soporte de la estrategia de desarrollo (Sagasti *et al.*, 2014), particularmente las diferencias en la distribución de la mineralogía tendrían un impacto en las propiedades mecánicas de las rocas y, por ende, en el comportamiento de las mismas durante la estimulación hidráulica, afectando más que nada a la geometría de la fractura.

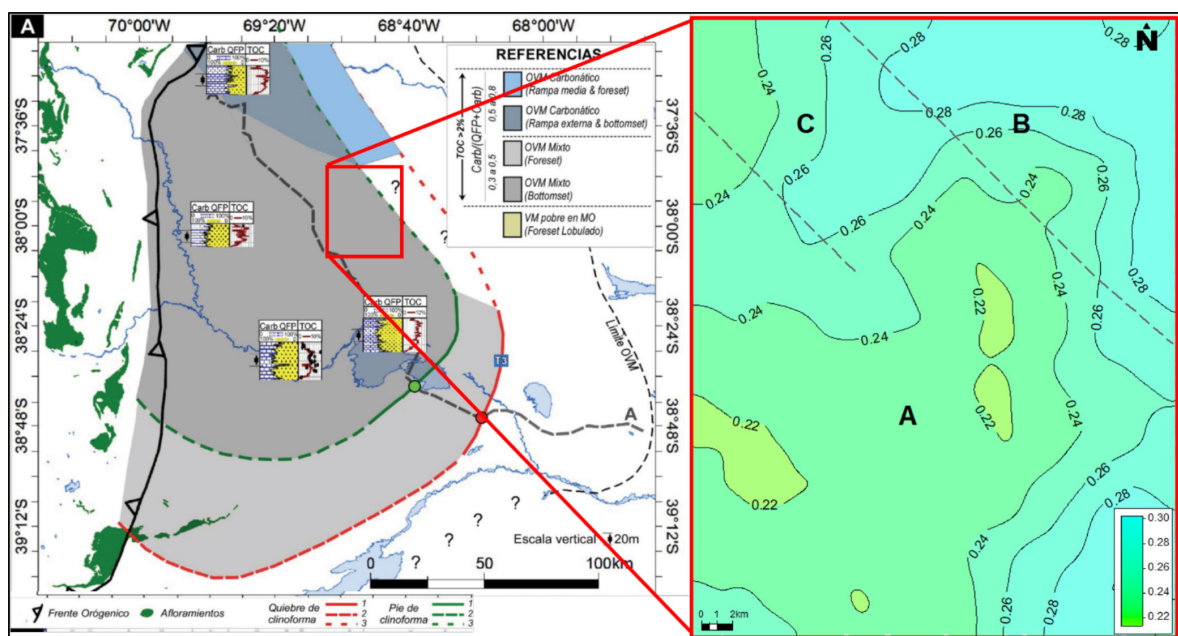


Figura 9. Modelo geológico conceptual modificado de Dominguez *et al.*, 2018. a) Mapa paleogeográfico de ambientes b) Mapa VCARB en zona de estudio. En líneas punteadas divisiones entre zonas A, B y C identificadas en este trabajo.

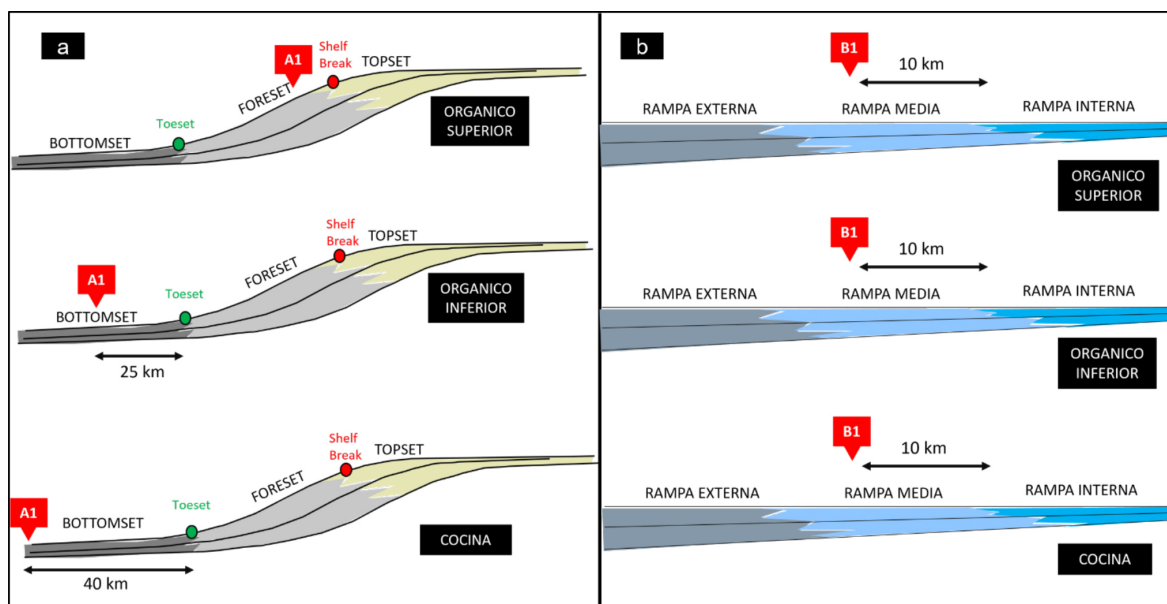


Figura 10. Esquema conceptual evolución de Vaca Muerta en las zonas A (a) y B (b) en contextos paleogeográficos diferentes.

CONCLUSIONES

El análisis integrado de la mineralogía permitió identificar 3 zonas bien marcadas.

Una zona A de un ámbito mixto (clástico-carbonático) con mayor presencia de contenido clástico, con un patrón progradante de carbonatos característico del desarrollo de clinoformas. Mayor contenido clástico en el bottomset que disminuye en detrimento del aumento del contenido carbonático hacia el *foreset*.

Una zona B de un ámbito de rampa carbonática, con mayor contenido relativo calcáreo en la base y un patrón mineralógico agradante, en el que no se observan variaciones en los diferentes niveles de Vaca Muerta.

Una zona C de transición, sin tendencias claras. Con un contenido silicoclástico que varía muy poco hacia los niveles superiores y el contenido carbonático se mantiene prácticamente constante en todos los niveles.

La caracterización estática de estos tres dominios, así como el entendimiento de la evolución de Vaca Muerta en cada uno de ellos permitirá comprender las variaciones en la performance de los pozos y optimizar la estrategia de desarrollo del campo, complementando el estudio con el análisis de las propiedades mecánicas de las rocas, la respuesta de las mismas ante una estimulación hidráulica y la evaluación de la interferencia entre pozos.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecemos en primer lugar a YPF S.A. por permitir la publicación de este

trabajo. Agradecemos también a Fabián Domínguez y Martín Foster por sus valiosos comentarios y contribuciones. También a Alejandro Saccomano por su soporte técnico.

REFERENCIAS

- Desjardins, P., Fantín, M., González-Tomassini, F., Reijenstein, H., Sattler, F., Dominguez, F., Kietzmann, D., Leanza, H., Bande, A., Benoit, M., Borgnia, M., Vittore, F., Simo, T. y Minisini, D., 2016, Capítulo 2: Estratigrafía sísmica regional en G. González, G.; Vallejo, D.; Desjardins, P.; González-Tomassini, F.; Kietzmann, D.; Rivarola, L.; Domínguez, R. F., eds., *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta. Integración de sísmica, registro de pozos, coronas y afloramientos*. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG) – Asociación Geológica Argentina (AGA), p. 5-22.
- Dominguez, F., Bernhardt, C., González Tomassini, F., Fantín, M. y Di Benedetto, M., 2018. Variaciones paleogeográficas de las unidades ricas en materia orgánica de la formación vaca muerta en el engolfamiento neuquino. X Congreso Exploración y Desarrollo Hidrocarburos, IAPG. p.213-229, Mendoza, Argentina.
- Dominguez, R.F., Leanza, H.A., Fantín, M., Marchal, D., Cristallini, E., 2020. Chapter 6: Basin configuration at Vaca Muerta time in Daniel Minisini, Manuel Fantín, Iván LanuSSO Noguera, and Héctor Leanza, eds., *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play*, Argentina: AAPG Memoir 121, p. 141-162.
- Kietzmann, D. A., F. González Tomassini, and T. Smith, 2019, Lithofacies and microfacies of the Vaca Muerta Formation based on subsurface and outcrops data, in D. Minisini, M. Fantin, I. LanuSSO, and H. A. Leanza, eds., *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play*, Argentina: AAPG Memoir 120, p. 267-296.
- Leanza, H. A., 1973, Estudio sobre los cambios faciales de los estratos limítrofes Jurásico–Cretácicos entre Loncopué y Picún Leufú, provincia del Neuquén, República Argentina: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 28, no. 2, p. 97–132.
- Marchal, D., González, G. y Dominguez, F.R., 2016, Capítulo 4: Análisis mineralógico de la Fm. Vaca Muerta en G. González, G.; Vallejo, D.; Desjardins, P.; González-Tomassini, F.; Kietzmann, D.; Rivarola, L.; Domínguez, R. F., eds., *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta. Integración de sísmica, registro de pozos, coronas y afloramientos*. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG) – Asociación Geológica Argentina (AGA), p. 33-43.
- Minisini, D., P. Desjardins, G. Otharán, M. Paz, D. Kietzmann G. Eberli C. Zavala, T. Simo and C. Heine, 2019, Depositional Model for the Vaca Muerta Formation and implications for reservoir quality, in Daniel Minisini, Manuel Fantin, Iván LanuSSO, and Héctor Leanza, eds., *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play*, Argentina: AAPG Memoir 120, p. 1-24.
- Nielsen, O., Curia, D., Paleti, P., Caniggia, J., Ortega, A. y Slinde, M., 2020, Pilot Phase of the Aguada Federal Block, Black-Oil Window in Daniel Minisini, Manuel Fantín, Iván LanuSSO Noguera, and Héctor Leanza, eds., *Integrated geology of*

- unconventionals: The case of the Vaca Muerta play, Argentina: AAPG Memoir 121, p. 469-496.
- Ortiz, A., CrouSSO, L., Bernhardt, C., Vallejo, D., y MoSSO, L., 2020, Reservoir properties: Mineralogy, porosity, and fluid types, in Daniel Minisini, Manuel Fantín, Iván LanuSSO Noguera, and Héctor Leanza, eds., Integrated geology of unconventionals: The case of the Vaca Muerta play, Argentina: AAPG Memoir 121, p. 329-350.
- Sagasti, G., Ortiz A., Hryb, D., Foster M. y Lazzari, V., 2014. Understanding Geological Heterogeneity to Customize Field Development: An example from the Vaca Muerta Unconventional Play, Argentina. Unconventional Resources Technology Conference: URTeC :1923357.
- Weaver, C. E., 1931, Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina: Seattle, University of Washington, Memoir 1, 469 p.

