

ANÁLISIS GEOQUÍMICO CON ÉNFASIS EN EL CONTENIDO DE FÓSFORO DEL SISTEMA VACA MUERTA – QUINTUCO EN EL SECTOR CENTRAL DE LA CUENCA NEUQUINA

Juan I. Musacchio¹, Alejandro Bande², Ignacio A. Capelli¹, Roberto A. Scasso¹

1: Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGeBA), Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

juani.musacchio1@gmail.com, capelli@gl.fcen.uba.ar, rscasso@yahoo.com.ar.

2: Tecpetrol, Buenos Aires. alejandro.bande@tecpetrol.com

Palabras clave: fósforo, productividad, geoquímica, Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina

ABSTRACT

The objective of this work is to carry out a stratigraphic interpretation of the Vaca Muerta - Quintuco system (Tithonian - Valanginian) in the central sector of the Neuquén Basin, with special emphasis on the phosphorus (P) content and its paleoenvironmental significance. A complementary objective is to propose a correlation scheme with the shallow marine phosphate deposits outcropping towards the west in the fold and thrust belt. A geochemical characterization based on well logs and cutting was performed on a 867 m thick, subsurface sedimentary column located on the eastern flank of the Chihuidos High. Five distinct stratigraphic intervals were defined. The bottom three intervals correspond to the Vaca Muerta Fm. The lowermost Interval (168 m thick) is dominated by carbonate sedimentation, and shows the highest total organic carbon (TOC) content and the lowest P (<0.5 %) values, pointing to high productivity and anoxic bottom waters. Interval 2 (124 m thick) begins with a sharp drop in TOC values and an increase in the input of detrital material, while P reaches 0.5 %, indicating increased oxygenation and lower productivity. Interval 3 (86 m thick) records an increase in TOC and the highest P values (1 %) within the profile, attesting for an increase in productivity and a suboxic seafloor, associated with a relative sea-level rise. The upper two intervals (4 and 5) are assigned to the Quintuco Formation. Interval 4 (261 m thick) is characterized by an alternation of carbonate and clastic sedimentation, while Interval 5 (228 m thick) is dominated by clastic input. Both intervals record phosphorus values that reach up to 0.7 %, whereas TOC values are lower compared to those registered in the Vaca Muerta Formation. High P values recorded in the Interval 3 might have originated during high relative sea level and slow clastic sedimentation rates. In this context, the uplift of the Dorso de los Chihuidos in the Jurassic - Cretaceous boundary, might have played an important role in the generation of upwelling currents, locally increasing productivity in the water column. Understanding the relationships between productivity, accumulation and preservation of organic matter is a key factor in predicting the geographical and stratigraphic distribution of organic carbon-rich intervals within the Vaca Muerta-Quintuco system.

INTRODUCCIÓN

El sistema Vaca Muerta – Quintuco (Tithoniano – Valanginiano) en la Cuenca Neuquina es conocido a nivel mundial debido al gran espesor, extensión areal y elevado contenido de materia orgánica (MO) de la Formación Vaca Muerta, la cual constituye la principal roca madre de la cuenca Neuquina y un reservorio no convencional de clase mundial (e.g., Veiga *et al.* 2020). Este sistema contiene depósitos fosfáticos de edad cretácica descritos en la Sierra de la Vaca Muerta por Mastandera *et al.* (1975) y Leanza *et al.* (1986) entre otros, quienes los asignaron a la Formación Vaca Muerta. Castro *et al.* (2009) correlacionaron estos depósitos con un evento fosfogénico global que tuvo lugar entre el Jurásico Tardío y el Cretácico Temprano (Glenn *et al.* 1994). Más recientemente, Medina *et al.* (2016) y Capelli *et al.* (2018) reportaron la presencia de niveles y anomalías fosfáticas de edad berriasiense – valanginiana aflorando en el área del cerro Salado y Puerta Curaco respectivamente (Fig. 1). Sin embargo, hasta el momento no está clara la relación de los fosfatos con las pelitas ricas en MO ni tampoco el contexto paleogeográfico que produce grandes variaciones en dicha relación. Estos aspectos se analizan en este trabajo, poniendo el foco en las anomalías fosfáticas detectadas a partir de los registros de Fluorescencia de Rayos X de un pozo exploratorio (Pozo A), la composición de las pelitas, el paleoambiente de sedimentación y la paleogeografía en el flanco oriental del Dorso de los Chihuidos (Fig. 1), ubicado en el sector

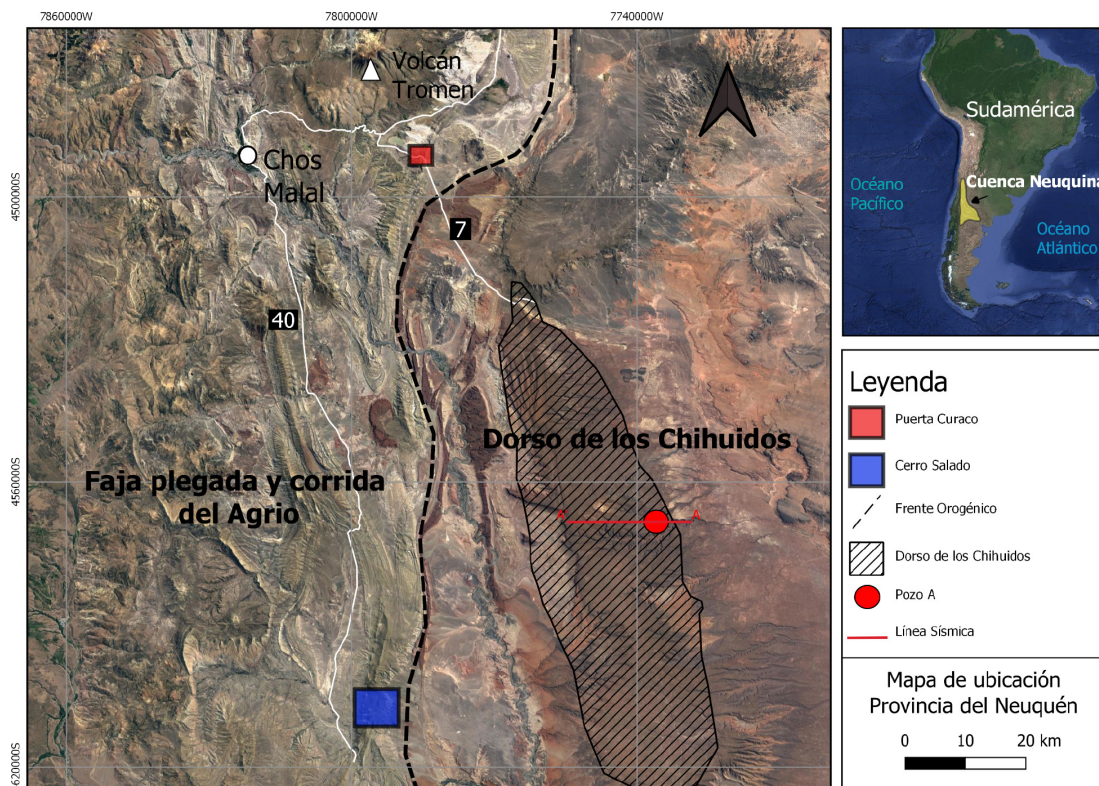


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio en el sector central de la Cuenca Neuquina. Modificado de Micucci *et al.* (2018).

central de la Cuenca Neuquina. Se correlacionan además los niveles fosfáticos del Pozo A con los de un perfil de superficie en el área del Cerro Salado (Medina *et al.* 2016).

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina constituye un amplio engolfamiento de morfología triangular, abierto hacia el oeste y con una superficie de más de 120.000 km² (Yrigoyen 1991). En ella se encuentra representado más de 7000 m de espesor sedimentario que fue depositado entre el Triásico Tardío y el Paleógeno.

La cuenca se inicia en el Triásico Tardío durante una etapa de rift. Luego, entre el Jurásico Temprano y el Cretácico Tardío, evolucionó a una etapa de subsidencia termal, con el progresivo desarrollo de un arco volcánico al oeste (Mitchum y Uliana 1985). Durante este lapso la cuenca pasó a comportarse como una única depresión, lo cual habría permitido establecer una conexión semi-permanente con el Océano Pacífico (Legarreta y Gulisano 1989).

Durante el intervalo Tithoniano temprano-Valanginiano temprano la cuenca alcanzó su máxima extensión debido a un importante ascenso relativo del nivel del mar (Spalletti *et al.* 2000). Durante este lapso se depositó el Grupo Mendoza inferior (Stipanovic 1969), que incluye a las pelitas negras de la Formación Vaca Muerta y a las pelitas, calizas y areniscas de la Formación Quintuco (Weaver 1931).

El sistema Vaca Muerta – Quintuco constituye un ciclo transgresivo – regresivo de segundo orden (sensu Vail *et al.* 1977), integrado por una serie de secuencias deposicionales con morfología de clinoformas progradantes hacia el N y NO (Mitchum y Uliana 1985). En dicho contexto sismoestratigráfico, la Formación Vaca Muerta representa a las facies de *bottomset* y *foreset*, mientras que la Formación Quintuco corresponde a la zona de *topset* (Desjardins *et al.* 2016).

El Dorso de los Chihuidos es una estructura braquianticlinal de orientación NNO-SSE, cuya morfología actual es el resultado de los movimientos del ciclo andino (Micucci *et al.* 2018). Sin embargo, esta estructura estuvo activa desde el Jurásico Temprano a Medio, controlando la sedimentación de los grupos Precuyo, Cuyo y, en particular, del sistema Vaca Muerta – Quintuco, cuyo espesor se reduce hacia el dorso (Maretto y Pángaro 2005; Dominguez *et al.* 2017, 2020; Micucci *et al.* 2018) (Fig. 2).

METODOLOGÍA

Se realizó un estudio estratigráfico del sistema Vaca Muerta - Quintuco mediante la combinación de los registros de Fluorescencia de Rayos X (FRX), Rayos Gamma Espectral (GRE) y contenido de Carbono Orgánico Total (COT) del Pozo A, en donde el sistema presenta un espesor total de 867 metros (Fig. 2).

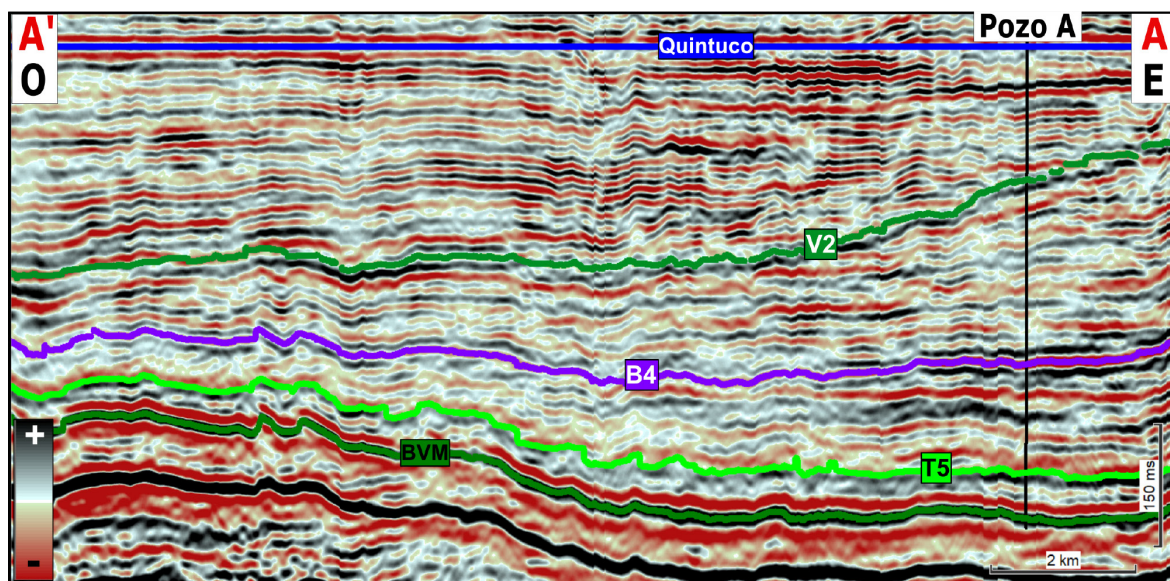


Figura 2. Línea sísmica en dirección E-O mostrando la ubicación del Pozo A, objeto de estudio del presente trabajo, y en donde se observa una reducción del espesor del sistema Vaca Muerta - Quintuco hacia el Dorso de los Chihuidos (Oeste). BVM=Base Fm. Vaca Muerta; Quintuco= Techo Fm. Quintuco; T5, B4, V2: marcadores regionales definidos por Desjardins *et al.* (2016).

Los datos de GRE (Fig. 3) fueron adquiridos mediante perfilaje eléctrico, los resultados de FRX fueron obtenidos realtime en muestras de recortes de perforación cada 3 m, mientras que los datos de COT fueron medidos sobre muestras lavadas estandar, y luego se utilizaron para construir registros continuos de elementos mayoritarios (Si, Al, K, Ca y P) y elementos traza de interés (Mo, V, Cu) (Figs. 4 y 5).

Se realizó un análisis estratigráfico secuencial en el intervalo estudiado utilizando datos geoquímicos, los valores del GRE y siguiendo las propuestas de Desjardins *et al.* (2016) y Kietzmann *et al.* (2016) para reconocer secuencias deposicionales (CS) y secuencias de alta frecuencia (HFS). Cada secuencia contiene un *transgressive systems tract* (TST) y un *regressive systems tract* (RST) (e.g. Embry y Johannessen 1992).

En la Fm. Vaca Muerta los TST se caracterizan por presentar altos valores de COT y Si y bajos valores de Ca, mientras que los RST registran un progresivo incremento de este último producto de una mayor sedimentación carbonática. Esta relación entre Si y Ca se invertiría en la Fm. Quintuco (Kietzmann *et al.* 2016).

RESULTADOS

Rayos Gamma Total y Espectral

El GR total alcanza los valores más altos del perfil en la base de la Fm. Vaca Muerta, con máximos de 222 °API, y una gradual disminución hacia el marcador B2 (Fig. 3). Por encima se

mantiene relativamente bajo y constante (100 °API) hasta los 600 m, donde aumenta hasta los 172 °API en la Fm. Quintuco.

El U registra valores máximos en la base de la Fm. Vaca Muerta, alcanzando 20 ppm, por encima se observa una tendencia decreciente. Los mínimos valores se encuentran entre los *markers* B2 y B4. La Fm. Quintuco presenta valores relativamente bajos y estables a lo largo del perfil, alcanzando máximos de 9 ppm.

En cuanto al Th y K, ambos perfiles muestran grandes similitudes en su comportamiento. Los valores son relativamente bajos en la Fm. Vaca Muerta, con un incremento entre B2 y B4 (Fig. 3). En la Fm. Quintuco se observa un gradual incremento hasta alcanzar los máximos valores del perfil: 4 % para el K y 22 ppm para el Th. La curva de GR total sigue principalmente la de U en la Fm. Vaca Muerta y la de K y Th en la Fm. Quintuco.

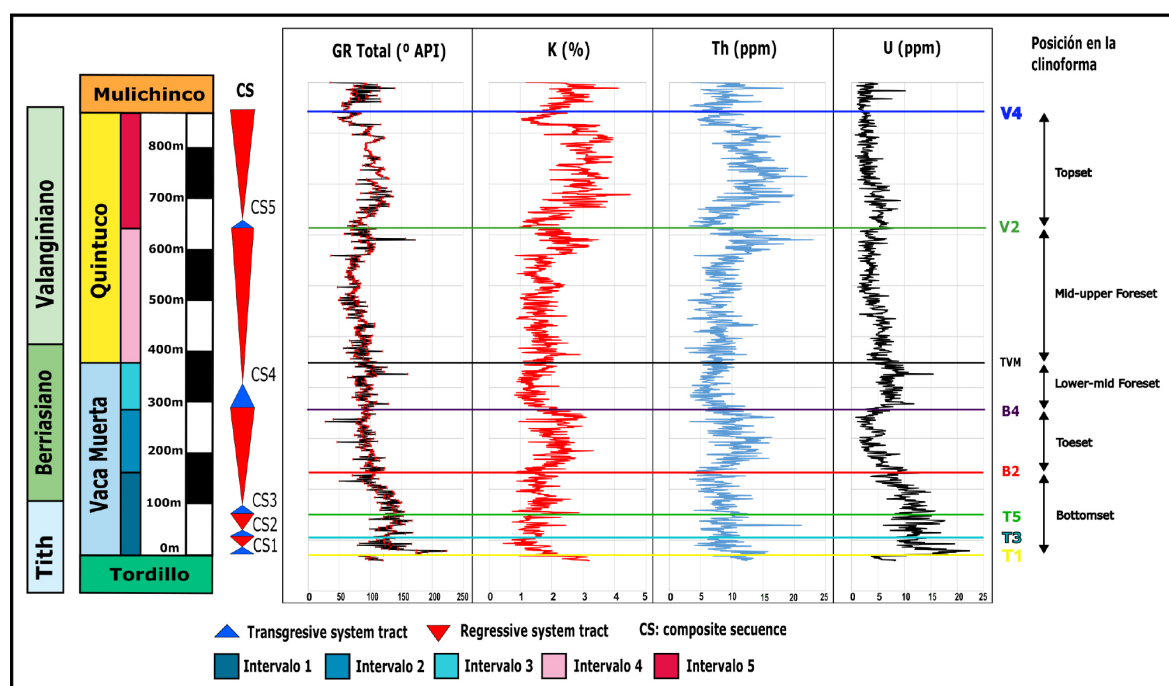


Figura 3. Perfil GR Total y GRE (K, Th y U) del Pozo A. TVM = techo Fm. Vaca Muerta. Las superficies estratigráficas T1, T3, T5, B2, B4, V2, V4 (regionales) fueron definidas por Desjardins *et al.* (2016) y correlacionados en el pozo mediante interpretación sísmica. Los intervalos 1-5 corresponden al presente trabajo (ver discusión), cuya posición en la clinoforma se destaca a la derecha.

Elementos mayoritarios, minoritarios y traza (FRX)

En esta sección se utilizan tres grupos de elementos, que se asumen geoquímicamente asociados (Montero-Serrano *et al* 2015; Capelli *et al.* 2018):

- (1) Silicoclásticos: Si, Al, K, Ti son algunos de los elementos típicos de este grupo, los cuales están generalmente asociados a los minerales detríticos. El Si (9 – 21 %) es el elemento más abundante de este grupo, cuyos valores son máximos en los 200 m basales. El Al (1 - 6 %) y

el Ti (0 - 7 %) tienen un comportamiento similar al del Si. El K (1 - 4 %) muestra un gradual aumento desde la base hasta el tope del perfil.

- (2) Orgánico – Sulfuros: integrado por P, Mo, V y Cu, estos elementos suelen vincularse genéticamente con la MO, por lo que el COT se incluye en esta sección. El Mo, V, Cu y COT presentan los valores más altos en la parte inferior del perfil, con máximos de 217 ppm, 3 %, 137 ppm y 8,8 % respectivamente. Por encima, alrededor de los 180 m, se observa una brusca caída y posteriormente un leve aumento hacia el tramo superior de la Fm. Vaca Muerta. La Fm. Quintuco se caracteriza por sus bajos valores hasta la base de la Fm. Mulichinco. En cuanto al P, este registra muy bajos valores (<0,5 %) hasta los 200 m, y luego un incremento hasta los 300 m donde alcanza un pico del 1 %. En la Fm. Quintuco, el P disminuye gradualmente, aunque se registran valores los 0,7 % (Fig. 5).
- (3) Carbonatos: El Ca se encuentra presente en la calcita y es el principal elemento mayoritario de este grupo. El mismo presenta valores entre 2 y 14 %, con valores máximos en el tramo superior de la Fm. Vaca Muerta, y dos intervalos con altos valores (12 %) en el sector medio de la Fm. Quintuco. En general, se observa que los altos valores de Ca se asocian a bajos valores de Si y altos valores de P, especialmente en la Fm. Quintuco (Figs. 4 y 5).

DISCUSIÓN

Sobre la base de los resultados obtenidos se optó por dividir al perfil en cinco intervalos. Los intervalos 1, 2 y 3 están comprendidos en la Fm. Vaca Muerta, mientras que los intervalos 4 y 5 corresponden a la Fm. Quintuco. El intervalo 1 se extiende desde la base del perfil hasta el *marker* B2, el intervalo 2 se ubica entre los *markers* B2 y B4, el intervalo 3 tiene su tope en el techo de la Fm. Vaca Muerta, mientras que los intervalos 4 y 5 se encuentran separados por el *marker* V2.

Intervalo 1: Abarca los 168 m basales del perfil y se desarrolla en el segmento de *bottomset* de la clinoforma. El Ca alcanza valores del 12 %, con un mínimo de 5 % en T5. El Si varía entre 9 y 21 %. Los valores de K y Th, asociados normalmente a las arcillas (Zanin *et al.* 2016) son los más bajos del perfil, lo que sugiere que el aporte detrítico fue bajo, a excepción de un breve intervalo en T5 donde se registra un leve incremento de estos elementos. Los elevados valores de COT, asociados a la acumulación y preservación de gran cantidad de MO (kerógeno tipo II) de origen marino (Brisson *et al.* 2020) sugieren una alta productividad en la columna de agua, cuyos valores son los más altos del perfil, superando incluso el 8 %. Este intervalo presenta los mayores registros de U, V y Mo, lo que sugiere que predominaron condiciones anóxicas a euxínicas en el fondo marino (Spalletti *et al.* 2019; Krim *et al.* 2017; Capelli *et al.* 2021), que permitieron la preservación de la MO. El P registra los valores más bajos, oscilando entre 0 y 0.5 %, sugiriendo condiciones anóxicas del fondo marino. Bajo estas condiciones, el P es utilizado por bacterias como fuente

de energía y liberado hacia la masa de agua marina (Ingall 1993; Tribovillard *et al.* 2006). De esta forma, no solo no queda preservado en el registro sedimentario, sino que además puede aumentar la productividad del agua generando mayor eutrofización y por lo tanto mayor anoxia (Watson *et al.* 2017). Esto podría, en parte, explicar los elevados niveles de MO en este intervalo.

Intervalo 2: Este intervalo se desarrolla en posición de toeset entre los 168 y los 292 m del perfil. Registra un fuerte incremento de Si, Al, Th, K y Ti respecto al intervalo anterior, mientras que los valores del Ca disminuyen. Esto viene acompañado por una brusca caída del U, V y Mo, elementos que tienden a ser solubles, y, por lo tanto, no se conservan en el sedimento bajo condiciones subóxicas/óxicas (Tribovillard *et al.* 2006). Esto último podría explicar el incremento del P (0,1 – 0,7 %), el cual, por el contrario, tiende a fijarse en los sedimentos en condiciones subóxicas. Los bajos valores del COT y de Cu apuntan a que la productividad en la columna de agua se vio reducida respecto al intervalo anterior.

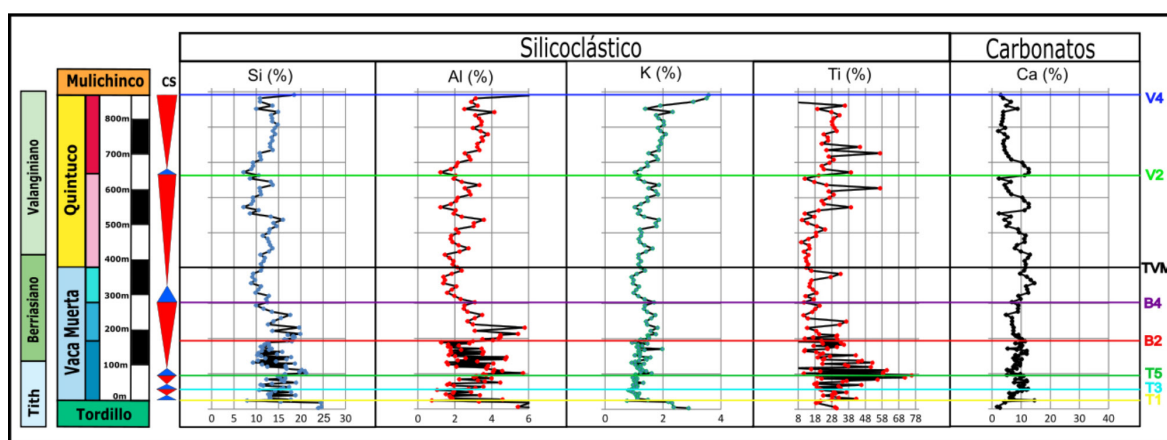


Figura 4. Elementos mayoritarios de los grupos silicoclástico y carbonático en el Pozo A. TVM = techo Fm. Vaca Muerta. Superficies estratigráficas T1, T3, T5, B2, B4, V2, V4 (regionales) (Desjardins *et al.* 2016).

Intervalo 3: tiene lugar entre los 292 y 378 m del perfil y registra el pasaje desde lower *foreset* (en la base) a mid *foreset* (hacia el tope). Este intervalo incluye a la sección que informalmente es conocida como “la segunda cocina”. Se ubica por encima del B4, evento que representa una inundación marina en la cuenca (Desjardins *et al.* 2016). Este tramo registra un aumento progresivo del Ca, alcanzando valores del 14 %, mientras que el Si, Th, K y Ti disminuyen. Tanto el COT (hasta 6 %), como los valores del Mo, U, V y Cu presentan un incremento, aunque no alcanzan los valores máximos observados en el intervalo 1. Los valores permiten inferir condiciones de alta productividad de la columna de agua, y condiciones subóxicas del fondo marino, lo que habría permitido la preservación de la MO y del P. Precisamente, este tramo registra los mayores valores de P del perfil, alcanzando el 1 %. El elevado nivel del mar, las bajas tasas de sedimentación clástica y la elevada productividad biológica pueden haber dado lugar a la formación y preservación de fosfatos, posteriormente concentrados por el retrabajo mecánico producto de corrientes y oleajes

durante variaciones relativas del nivel del mar de alta frecuencia (Föllmi 1996; Medina *et al.* 2016). Paralelamente, durante la sedimentación de este intervalo tuvo lugar el levantamiento del Dorso de los Chihuidos (Maretto y Pángaro 2005). Se trata de una estructura con un relieve sumergido que alcanzó los 390 metros sobre el fondo marino (Domínguez *et al.* 2017), cuyo eje se ubica inmediatamente al oeste del pozo estudiado. Esto pudo haber generado el desarrollo de corrientes de tipo upwelling que favorecieron a la productividad, y asimismo pudo haber modificado las condiciones redox del fondo marino favorablemente para la sedimentación de fosfatos.

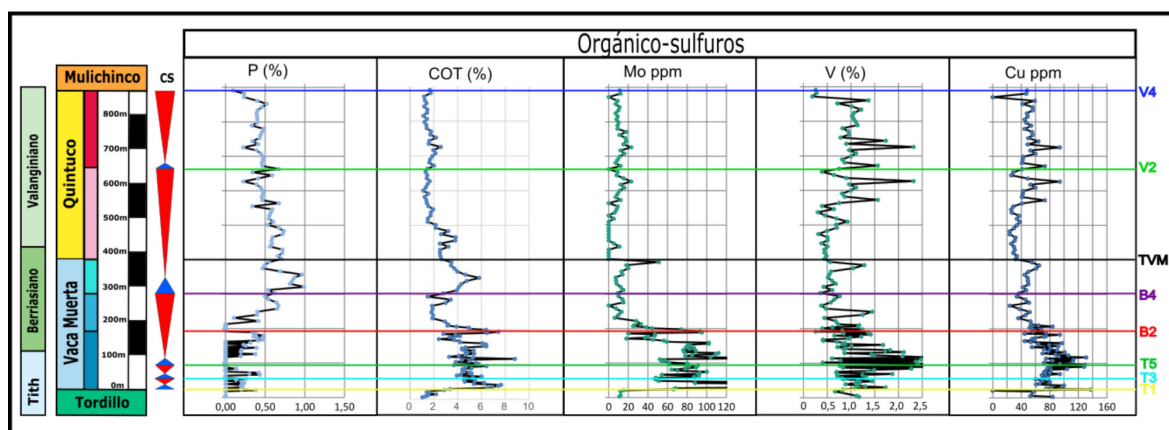


Figura 5. Elementos del grupo orgánicos – sulfuros en el Pozo A. TVM = techo Fm. Vaca Muerta. Superficies estratigráficas T1, T3, T5, B2, B4, V2, V4 (regionales) (Desjardins *et al.* 2016).

Intervalo 4: Se extiende entre los 378 y los 639 m del perfil, en posición de mid-upper *foreset*. Este intervalo se caracteriza por un gradual incremento desde la base en los elementos de origen detrítico (Al, Ti, Si y K) y un descenso en los valores del Ca. Sin embargo, se registran descensos en los valores de los elementos silicoclásticos, mientras que lo opuesto sucede con el Ca. Esto fue interpretado como cambios en la sedimentación producto de una mayor producción y acumulación de carbonatos. Los elementos del grupo orgánico (Mo, V y Cu) registran una brusca caída inmediatamente por encima del límite Vaca Muerta – Quintuco, lo que sugiere un fondo más oxigenado y una menor productividad en la columna de agua, asociado probablemente a un descenso relativo del nivel del mar. Por encima, se observa un leve incremento en el V, Mo y Cu, apuntando a la restitución de un ambiente subóxico a anóxico. Sin embargo, no se registran tan elevados porcentajes de COT como en el intervalo infrayacente. Los valores del fósforo muestran una tendencia general decreciente, con oscilaciones que van desde el 0,2 al 0,7 %. Se destacan zonas con altos valores de P (0,7 %) las cuales coinciden con valores altos del Ca y bajos de Si, por lo que se habrían depositado durante el ascenso del nivel del mar (Fig. 6).

Intervalo 5: Este intervalo abarca los últimos 228 m del perfil y se ubica por debajo de la Fm. Mulichinco, ocupando segmentos de *topset*. Los valores de los elementos del grupo silicoclástico registran bajos valores en la base y luego un marcado incremento, mientras que el Ca disminuye, alcanzando los valores más bajos del perfil. Esto estaría asociado a un ascenso relativo del nivel del

mar, seguido de una caída del nivel de base (Domínguez *et al.*, 2020; Reijenstein *et al.*, 2014), con una sedimentación predominantemente silicoclástica. Sin embargo, se observan dos niveles donde se incrementan los valores del Ca que coinciden con aumentos del P, aunque de menor magnitud que en el intervalo anterior. Los elementos del grupo de los orgánicos mantienen valores similares al intervalo anterior. El COT registra valores entre 0,9 y 2,3 %, mientras que el P mantiene la tendencia decreciente, alcanzando valores máximos de 0,5 %.

Los elevados registros de V observados en la Fm. Quintuco coinciden con altos valores de Cu, Mo y COT. Sin embargo, estos últimos no son tan marcados como los del V. El enriquecimiento de V en sedimentos tiene lugar en condiciones de bajo contenido de oxígeno, pero menos reductoras que las requeridas para el enriquecimiento en Mo (Tribovillard *et al.* 2006). Esto sugiere que el V es más sensible a cambios en las condiciones redox del fondo marino (Wu *et al.* 2020) y apunta a que en los intervalos 4 y 5 se alcanzaron condiciones anóxicas, alternando con condiciones subóxicas a óxicas en el fondo marino. Sin embargo, los valores de COT son más bajos que en la Formación Vaca Muerta. Teniendo en cuenta la fuerte dependencia del GR con el Th y el K de la Fm. Quintuco, se interpreta que los bajos valores del COT estarían vinculados a una dilución debido a un aumento significativo en el aporte clástico (Capelli *et al.* 2018).

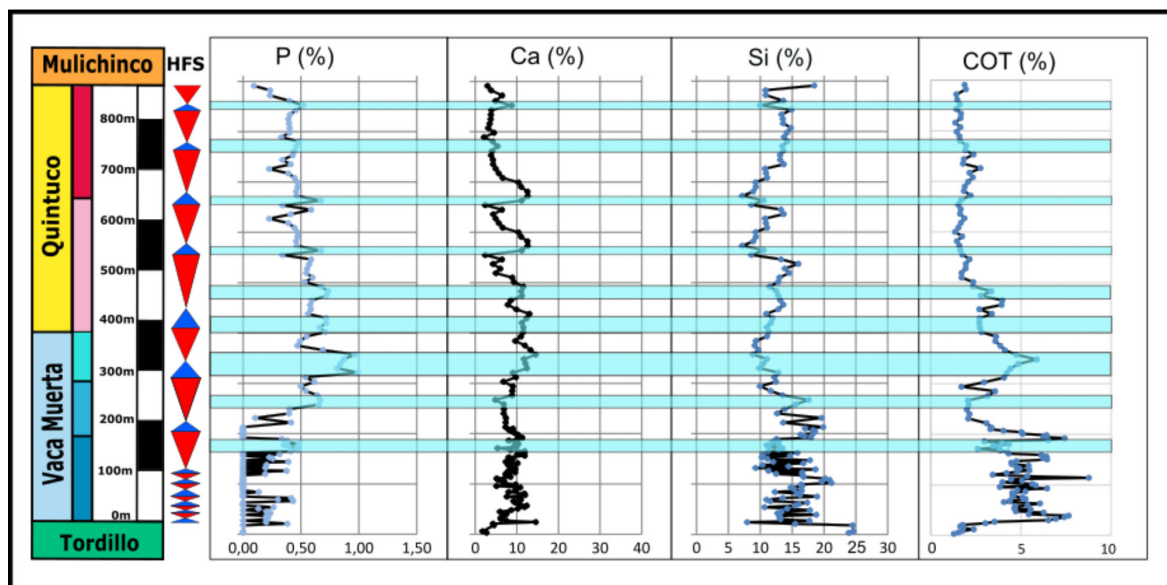


Figura 6. Valores máximos de fósforo y su correlación con los elementos Ca, Si y con el COT en el Pozo A.

Evolución paleoambiental e implicancias en la caracterización de reservorios no convencionales

El intervalo inferior de la Fm. Vaca Muerta fue depositado en una rampa carbonática en un fondo marino predominantemente anóxico a euxínico (Capelli *et al.* 2018, 2021), con altos contenidos de Mo, V, los máximos de MO y mínimos de P. La composición de las rocas presenta

abundante carbonato. Un descenso en los valores de los elementos del grupo orgánico hacia el tramo medio a superior, acompañado por un progresivo incremento en el P, apunta a que las condiciones redox evolucionaron a un ambiente subóxico. La evolución de las condiciones fuertemente reductoras en la sección basal, que disminuyen hacia el tope de la Fm. Vaca Muerta fue reconocida por Veiga *et al.* (2018), quienes lo interpretaron como una disminución en la estratificación de las aguas. Este cambio podría estar vinculado al ascenso del Dorso de los Chihuidos durante el Berriasiano que habría aumentado tanto la oxigenación del fondo marino como la productividad en la columna de agua. Alternativamente, podría deberse a un proceso autocíclico producto del avance de las progradaciones hacia un sector más proximal del sistema, o bien una combinación de ambos factores.

La Fm. Quintuco registra desde la base un incremento en el aporte silicoclástico, evidenciando la transición a una plataforma mixta carbonática - silicoclástica (Kietzmann *et al.* 2016; Capelli *et al.* 2018). Sin embargo, los altos valores del Ca sugieren que la sedimentación carbonática en el Intervalo 4 continuó siendo importante. El Intervalo 5 se caracteriza por un marcado cambio hacia una sedimentación predominantemente silicoclástica. Los indicadores de oxigenación no registran grandes variaciones entre ambos intervalos, los elementos del grupo orgánico indican que persistieron condiciones anóxicas alternando con condiciones subóxicas a óxicas en el fondo marino. Por lo tanto, se interpreta que el bajo COT respecto de la Fm. Vaca Muerta sería consecuencia de la dilución por un mayor aporte clástico a la cuenca.

Del análisis geoquímico y estratigráfico precedente se desprende que la sección basal de la Fm. Vaca Muerta se depositó en un ambiente anóxico a euxínico, mientras que el intervalo 3 se acumuló en un ambiente subóxico. Este intervalo contiene a la sección que informalmente se la conoce como segunda cocina y en ciertos sectores de la cuenca es un nivel objetivo para aterrizar pozos horizontales. La diferencia paleoambiental observada es relevante, ya que muestra una roca genética y composicionalmente distinta, que podría tener consecuencias en la performance de producción de los pozos navegados en este nivel.

Correlación estratigráfica

Los niveles fosfáticos son buenos indicadores de discontinuidades en el registro sedimentario, lo que les confiere un alto valor estratigráfico, y permiten la correlación con secuencias deposicionales de alta frecuencia (Medina *et al.* 2016).

Como se mencionó anteriormente, intervalos fosfáticos de edad cretácica fueron descriptos en la Cuenca Neuquina. Un ejemplo es el trabajo realizado por Medina *et al.* (2016) en el área del Cerro Salado, al oeste del Dorso de los Chihuidos (Fig. 1). Estos autores describen, para la Fm. Quintuco, cuatro intervalos fosfáticos constituidos por *wackestones*, *rudstones* bioclásticos y areniscas híbridas, cuyos valores de P₂O₅ oscilan entre 1 y 8 %. En la figura 7 se presenta una

correlación preliminar basada en las edades de los niveles ricos en P en el Pozo A con los intervalos fosfáticos descriptos en el Cerro Salado.

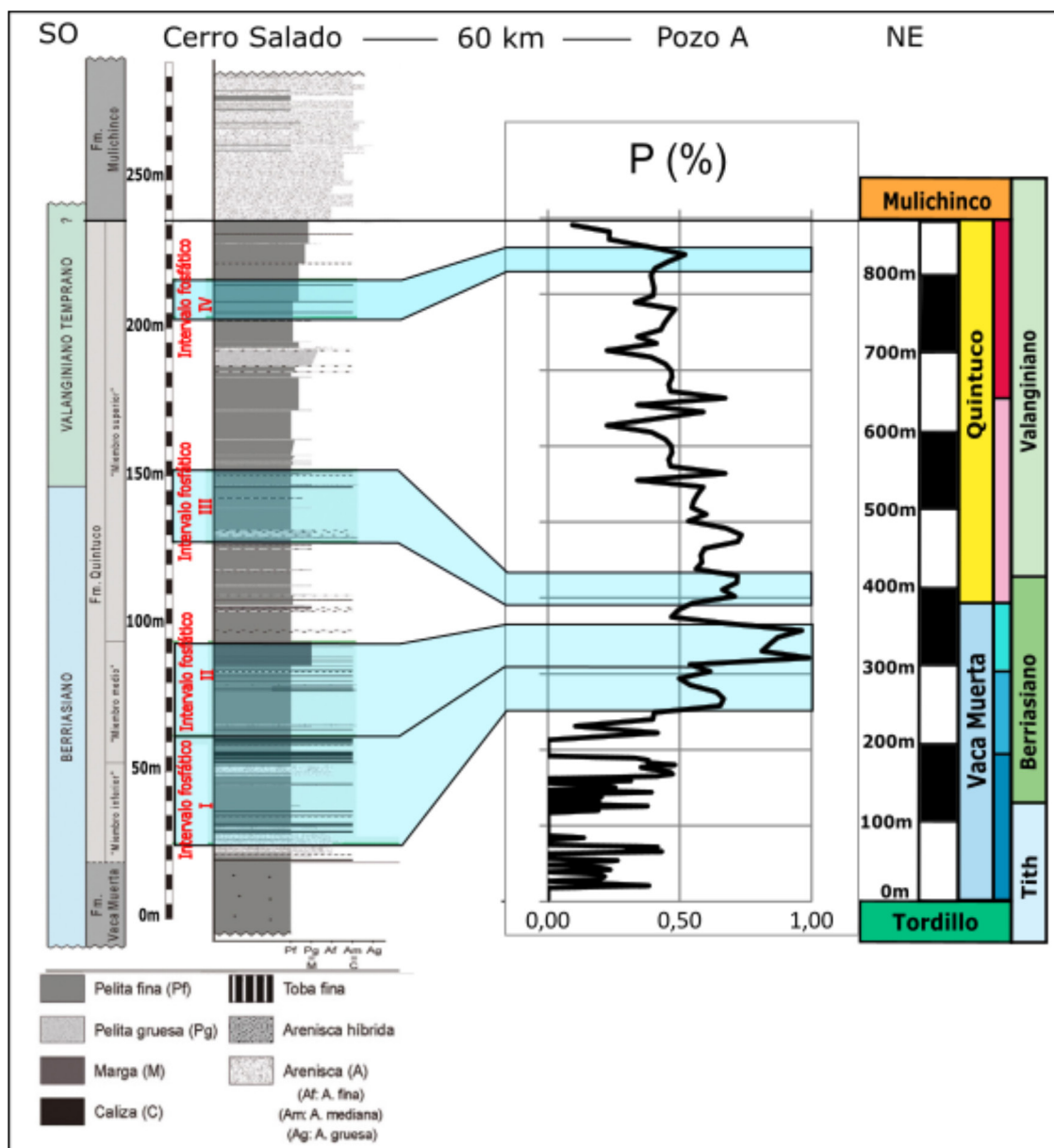


Figura 7. Comparación entre el perfil de superficie en el área del Cerro Salado y la curva de P correspondiente al Pozo A. Modificado de Medina *et al.* (2016).

CONCLUSIONES

El análisis geoquímico permitió reconocer cinco intervalos con características diferentes. En la Fm. Vaca Muerta la sedimentación del intervalo 1 tuvo lugar en una rampa carbonática con condiciones predominantemente anóxicas/euxínicas, con bajo aporte de material detrítico en

posición de *bottomset*. El intervalo 2, ubicado en el *toeset* de la clinoforma, registra un influjo silicoclástico importante y paralelamente una caída en la productividad en la columna de agua. El intervalo 3 ocupa segmentos de *lower-mid foreset* y registra un cambio hacia una sedimentación predominantemente carbónica. Los altos valores del GR Total para la Fm. Vaca Muerta están vinculados principalmente a la presencia de U.

La Fm. Quintuco, ubicada en el *upper foreset - topset*, representa la transición a una plataforma mixta carbonática - silicoclástica, registrándose desde la base un incremento en el input clástico. Sin embargo, la sedimentación carbonática continuó siendo importante, sobre todo en el intervalo 4. El intervalo 5 se caracterizó por una sedimentación predominantemente silicoclástica. En este caso, los elevados valores del GR Total se asocian a la presencia de Th y K.

En el caso de la Fm. Vaca Muerta, las condiciones redox del fondo marino jugaron un rol importante durante la fosfogénesis. En el intervalo 1 los valores del fósforo son los mínimos del perfil, debido a que las condiciones redox del fondo marino hicieron que fuera devuelto a la columna de agua. Este proceso pudo aumentar la productividad y, por lo tanto, incrementar la cantidad de MO en estos depósitos. Los intervalos 2 y 3, en cambio, presentan una mayor oxigenación, probablemente asociada al levantamiento del Dorso de los Chihuidos, o bien producto del avance de las progradaciones debido a un proceso autocíclico (*bottomset a foreset*). Esto habría favorecido a la preservación de la MO y del fósforo. El intervalo 2, que registra un alto influjo silicoclástico, presenta menores valores de fósforo que el intervalo 3.

En la Fm. Quintuco el fósforo registra una tendencia general decreciente. Sin embargo, se observaron varios niveles con elevado contenido de este elemento, que coinciden con altos valores de Ca y bajos de Si, interpretados como episodios de ascenso relativo del nivel mar, con bajo aporte de material silicoclástico (sección condensada).

Por otra parte, no se reconoció una clara correlación entre los niveles fosfáticos y los niveles ricos en MO. Sin embargo, se reconocieron intervalos con elevado COT inmediatamente por encima y por debajo de niveles fosfáticos.

Los niveles fosfáticos detectados en el perfil estarían, en general, vinculados a episodios de ascenso del nivel del mar, bajas tasas de sedimentación silicoclástica y un fondo marino, al menos, subóxico. Las variaciones relativas del contenido de fósforo en el perfil están vinculadas a cambios en los parámetros mencionados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Tecpetrol S.A. la autorización para publicar el presente trabajo y a los árbitros, Hernán Reijenstein y Germán Otharín, cuyos comentarios y sugerencias permitieron mejorar la calidad final del mismo.

REFERENCIAS CITADAS

- Bande, A., Veiga, R., Acevedo, H. y Mosquera, A., 2019. Tectonic Control on the Deposition of Organic-Rich Basinal Facies of Vaca Muerta Formation.
- Brisson, I.E., Fasola, M.E., y Villar, H.J., 2020, Organic geochemical patterns of the Vaca Muerta Formation, in D. Minisini, M. Fantín, I. Lanusse Noguera, and H. A. Leanza, eds., Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina: American Association Petroleum Geologist Memoir 121, p. 297–328.
- Capelli, I.A., Scasso, R.A., Kietzmann, D.A., Cravero, F., Minisini, D., Catalano, J.P., 2018. Mineralogical and geochemical trends of the Vaca muerta-Quintuco system in the Puerta Curaco section. Neuquén Basin. Rev. de la Asoc. Geol. Arg. 75, 210–228.
- Capelli, I.A., Scasso, R.A., Spangenberg, J.E., Kietzmann, D.A., Cravero, F., Duperron, M., Adatte, T., 2021. Mineralogy and geochemistry of deeply-buried marine sediments of the Vaca Muerta-Quintuco system in the Neuquen Basin (Chacay Melehue section), Argentina: Paleoclimatic and paleoenvironmental implications for the global Tithonian-Valanginian reconstructions. Journal of South American Earth Sciences 107, 103103.
- Castro, L.N., Scasso, R.A. y Moya, M.C., 2009. Phosphate deposits in Argentina: state of the art. CO-VAPHOS 5.
- Desjardins, P., Fantín, M., González Tomassini, F., Reijenstein, H., Sattler, F., Dominguez, F., Kietzmann, D., Leanza, H., Bande, A., Benoit, S., Borgia, M., Vittore, F., Simo, T., and Minisini, D., 2016. Estratigrafía Sísmica Regional. In: González, G., Vallejo, M.D., Kietzmann, D., Marchal, D., Desjardins, P., González Tomassini, F., Gómez Rivarola, L, Domínguez, R.F., Fantín, M. (eds.), Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta: integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos, Instituto Argentino del Gas y Petróleo: 5-22, Buenos Aires.
- Domínguez, R.F., Leanza, H.A., Fantín, M., Marchal, D. y Cristallini, E., 2020. Basin configuration during the Vaca Muerta times, en Minisini, D., Fantín, M., Lanusse Noguera, I. y Leanza, H.A. eds., Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina: American Association Petroleum Geologist Memoir 121, p. 141–162.
- Dominguez, R.F., Fantin, M.A. y Cristallini, E., 2017. Configuración morfo-estructural de la Cuenca Neuquina durante la depositación del sistema Vaca Muerta – Quintuco. XX Congreso Geológico Argentino - Simposio 05: Geología de la Formación Vaca Muerta. pp 46-52.
- Embry, A.F., y Johannessen, E.P., 1992. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic- Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. En: Vorren, T.O., Bergsager, E., Dahl-Stamnes, O.A., Holter, E., Johansen, B., Lie, E. y Lund, T.B. (eds.), Arctic geology and petroleum potential: Norwegian Petroleum Society Special Publication 2: 121-146.
- Föllmi, K.B., 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. Earth-Science Reviews 40: 55-124.
- Glenn, C.R., Föllmi, K.B., Riggs, S.R., Baturin, G.N., Grimm, K.A., Trappe, J., Abed, A.M., Galli-

- Olivier, C. Garrison, R.E., Ilyin, A.V., Jehl, C., Rohrlisch, V., Sadaqah, R.M., Schidlowski, M., Sheldon, R.E. y Siegmund, H., 1994. Phosphorous and phosphorites: sedimentology and environments of formation. *Journal of Swiss Geological Society, Eclogae Geologica Helvetica*, 87, 747-788.
- Ingall, E.D., Bustin, R.M., y Van Cappellen, P., 1993. Influence of water column anoxia on the burial and preservation of carbon and phosphorus in marine shales. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(2), 303-316.
- Kietzmann, D.A., Ambrosio, A.L., Suriano, J., Alonso, M.S., González Tomassini, F., Depine, G., and Repol, D., 2016. The Vaca Muerta-Quintuco system (Tithonian-Valanginian) in the Neuquén Basin, Argentina: a view from the outcrops in the Chos Malal fold and thrust belt. *American Association Petroleum Geologist Bulletin* 100: 743-741.
- Krim, N., Tribouvillard, N., Riboulleau, A., Bout-Roumazeilles, V., Bonnel, C., Imbert, P., Aubourg, C., Hoareau, G., Fasentieux, B., 2019. Reconstruction of palaeoenvironmental conditions of the Vaca Muerta formation in the southern part of the Neuquén Basin (Tithonian-Valanginian): evidences of initial short-lived development of anoxia. *Mar. Petrol. Geol.* 103, 176-201.
- Leanza, H.A., Spiegelman, A.T. y Hugo, C.A., 1986. Episodicidad y distribución paleolatitudinal de las fosforitas marinas fanerozoicas de la República Argentina. 1º Reunión Argentina de Sedimentología, Resúmenes expandidos: 213-216, La Plata.
- Legarreta, L. y Gulisano, C.A., 1989. Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior - Terciario inferior), Argentina. En: Chebli, G.A. y Spalletti, L.A. (eds.), *Cuenas Sedimentarias Argentinas, Serie Correlación Geológica* 6: 221-244, San Miguel de Tucumán.
- Maretto, H. y Pángaro, F., 2005. Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del engolfamiento de la Cuenca Neuquina: Actividad tectónica durante la depositación de la Fm. Quintuco. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata.
- Mastandrea, O.O., Leanza, H.A., Hugo, C.A. y Spiegelman, A.T., 1975. Manifestaciones fosfáticas en la Sierra de la Vaca Muerta y adyacencias, provincia del Neuquén, República Argentina. 2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 2: 461-486, Buenos Aires.
- Medina, R.A., Scasso, R.A., and Medina, F.A., 2016. Geología y estratigrafía de los bancos fosfáticos del Cretácico inferior en el área del Cerro Salado, Cuenca Neuquina, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73: 520-537.
- Micucci, E., Bande, A., Starck, D. y Veiga, R., 2018. El Jurásico del Dorso de los Chihuidos, contribución a su conocimiento. 10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos 437-460. Mendoza.
- Mitchum, R.M. y Uliana, M.A., 1985. Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic - Lower Cretaceous, Neuquén Basin, Argentina. En: Berg, B.R. y Woolverton, D.G. (eds.), *Seismic stratigraphic stratigraphy 2: an integrated approach to hydrocarbon analysis*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 39: 255-274, Tulsa.
- Montero-Serrano, J.C., Föllmi, K.B., Adatte, T., Spanberg, J.E., Tribouvillard, N., Fantasia, A., y Suan, G., 2015. Continental weathering and redox conditions during the early Toarcian Oce-

- anic Anoxic Event in the northwestern Tethys: Insight from the Posidonia Shale section in the Swiss Jura Mountains. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 429: 83-99.
- Reijenstein, H.M., Posamentier, H.W. Fantín, M. González Tomassini, F. y Lipinski, C., 2014. Vaca Muerta seismic stratigraphy and geomorphology: Regional architectural trends for unconventional exploration: 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (IAPG), Mendoza, Argentina, 3-7 November, CD ROM.
- Spalletti, L.A., Franzese, J.R., Matheos, S.D. y Schwarz, E., 2000. Sequence stratigraphy of a tidally dominated carbonate siliciclastic ramp; the Tithonian-Early Berriasian of the Southern Neuquén Basin, Argentina. *Journal of the Geological Society* 157: 433-446.
- Spalletti, L.A., Remírez, M.N., Sagasti, G., 2019. Geochemistry of aggradational - progradational sequence sets of the upper jurassic – lower cretaceous Vaca muerta shales (añelo area, Neuquén basin, Argentina): relation to changes in accommodation and marine anoxia. *J. South Am. Earth Sci.* 93, 495-509.
- Stipanovic, P.N., 1969. El avance en los conocimientos del Jurásico argentino a partir del esquema de Groeber. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 24 (4): 367-388.
- Tribovillard, N., Algeo, T.J., Lyons, T., Riboulleau, A., 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chemical Geology* 232, 12-32.
- Vail, P.R., Mitchum, R.M., Todd, R.G., Widmier, J.M., Thompson, S., Sangree, J.B., Bub, J.N. y Hatlelid, W.G., 1977, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, en C. E. Payton, ed., *Seismic stratigraphy—Applications to hydrocarbon exploration*: Association Petroleum Geologist Bulletin Memoir 26, p. 49-212.
- Veiga, R., Vergani, G., Brisson, I., Macellari, C. y Leanza, H., 2020. The Neuquén Super Basin. *American Association Petroleum Geologist Bulletin*, v.104. N°12, 2521-2555.
- Veiga, R., Bande, A., Micucci, E., Mosquera, A. y Macellari, C., 2018. ANÁLISIS EN LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE GAS A PARTIR DEL USO DE REGISTROS DE POZO. EJEMPLOS EN LA FORMACIÓN VACA MUERTA CUENCA NEUQUINA. ARGENTINA. 10° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. 503-521. Mendoza.
- Watson, A.J., Lenton, T.M. y Mills, B.J.W., 2017. Ocean deoxygenation, the global phosphorus cycle and the possibility of human-caused large-scale ocean anoxia. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375, 20160318.
- Weaver, C., 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina. University Washington, Memoir 1, 469P. Seattle.
- Wu, F., Owens, J.D., Scholz, F., Huang, L., Li, S., Riedinger, N., Peterson, L.C., German, C.R. y Nielsen, S.G., 2020. Sedimentary vanadium isotope signatures in low oxygen marine conditions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 284, Pages 134-155, ISSN 0016-7037.
- Yrigoyen, M.R., 1991. Hydrocarbon resources from Argentina. In: *World Petroleum Congress*, Buenos Aires. *Petrotecnia*, 13, Special Issue, 38-54.
- Zanin, Y. N., Zamirailova, A. G., y Eder, V. G., 2016. Uranium, thorium, and potassium in black shales of the Bazhenov Formation of the West Siberian marine basin. *Lithology and Mineral Resources*, 51(1), 74-85.

