

# Estratigrafía y análisis de facies de la Formación Vaca Muerta en el área de El Trapial

Por **Federico González Tomassini** (UBA), **Diego A. Kietzmann** (UBA y Conicet), **Manuel A. Fantín** y **Luisa C. Crousse** (Chevron Argentina); y **Hernán M. Reijenstein** (Chevron LABU)

*Este trabajo ha sido galardonado con la 2ª Mención Compartida del Simposio de Recursos No Convencionales en el IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mendoza, 2014).*

La importancia de los análisis estratigráficos, de facies y sedimentológicos para evaluar el potencial de un reservorio no convencional para identificar las zonas más favorables para la prospección y explotación de hidrocarburos.

Los análisis estratigráficos, de facies y sedimentológicos, son métodos de fundamental importancia para evaluar el potencial de un reservorio no convencional. Estos estudios permiten predecir la distribución espacial de facies, identificar las zonas con las propiedades petrofísicas más favorables para la prospección y explotación de hidrocarburos, además de poder estimar con un mayor grado de certeza el volumen de hidrocarburos *in situ* y la óptima terminación de un pozo.

A tal efecto, se trabajó en forma conjunta con sísmica 3D, perfiles de pozo y testigos-corona, los que permitieron el reconocimiento de secuencias sedimentarias transgresivo-regresivas, asociación de facies sedimentarias, microfacies y ambientes de sedimentación del intervalo en cuestión. A su vez, a escala microscópica y mesoscópica, se realizó un estudio pormenorizado de la textura, fábrica, mineralogía y etapas de diagénesis del intervalo de interés prospectable, el cual en la zona de estudio tiene un espesor aproximado de 350 metros. Los estudios de detalle apuntan a una mejor comprensión de la relación entre las distintas litofacies con la porosidad, permeabilidad, fragilidad de la roca y en última instancia su respuesta a la fracturación hidráulica y los caudales de producción de hidrocarburo.

También se efectuó una correlación entre la información de subsuelo y afloramientos de la Formación Vaca Muerta ubicados en las zonas más cercanas al área de estudio. El análisis lito y bioestratigráfico de afloramientos y del subsuelo de la zona de El Trapial permitió ajustar correlaciones y enmarcar al intervalo Tithoniano-Valanginiano dentro de un contexto regional.

## Ubicación del área de estudio

El bloque El Trapial se sitúa en los 37° de latitud sur y 69° de longitud oeste, en el noroeste de la provincia del Neuquén, al sur del río Colorado (figura 1). La formación de estudio, dentro del bloque, presenta un espesor de 450 m y profundidades variables entre los 2.300 y 4.000 m desde la cota topográfica (figura 2).

La Formación Vaca Muerta abarca en esta área el intervalo Tithoniano temprano tardío a Valanginiano temprano sobre la base de biozonas de amonoides, calciesferas y calpionéllidos (Kietzmann 2013b; Aguirre Urreta y Vennari 2013; Kietzmann *et al.* 2014b).

## Antecedentes

La Formación Vaca Muerta (Weaver 1931) es una de las unidades litoestratigráficas con mayor extensión areal de la Cuenca Neuquina, reconociéndose desde el sur de la provincia del Neuquén hasta el norte de la provincia de Mendoza y hacia el este, por información de subsuelo, en la provincia de Río Negro.

Se han empleado diversas terminologías para la descripción macroscópica de esta formación, siendo las más utilizadas las de pelita/lutitas, margas y calizas (Weaver 1931; Groeber 1946; Groeber *et al.* 1953; Leanza 1973; Leanza *et al.* 1977; Kietzmann *et al.* 2014a).

Asimismo, en lo referente a los ambientes depositacionales de esta formación, han habido diversas interpre-

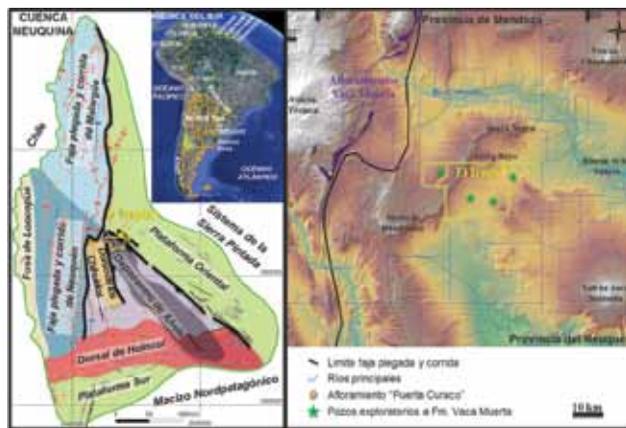


Figura 1. Mapa de ubicación del bloque El Trapial en el contexto regional de la Cuenca Neuquina.

taciones tanto en subsuelo como en afloramientos, y los mismos han sido recopilados recientemente por Leanza *et al.* (2011).

En cuanto al estudio de la estratigrafía secuencial, uno de los trabajos más relevantes en la Cuenca Neuquina es el realizado por Mitchum y Uliana (1985). Estos autores, sobre un análisis sismoestratigráfico y de campo, definieron nueve secuencias depositacionales (A-I) para el intervalo Tithoniano-Valanginiano. En tanto, Legarreta y Gulisano

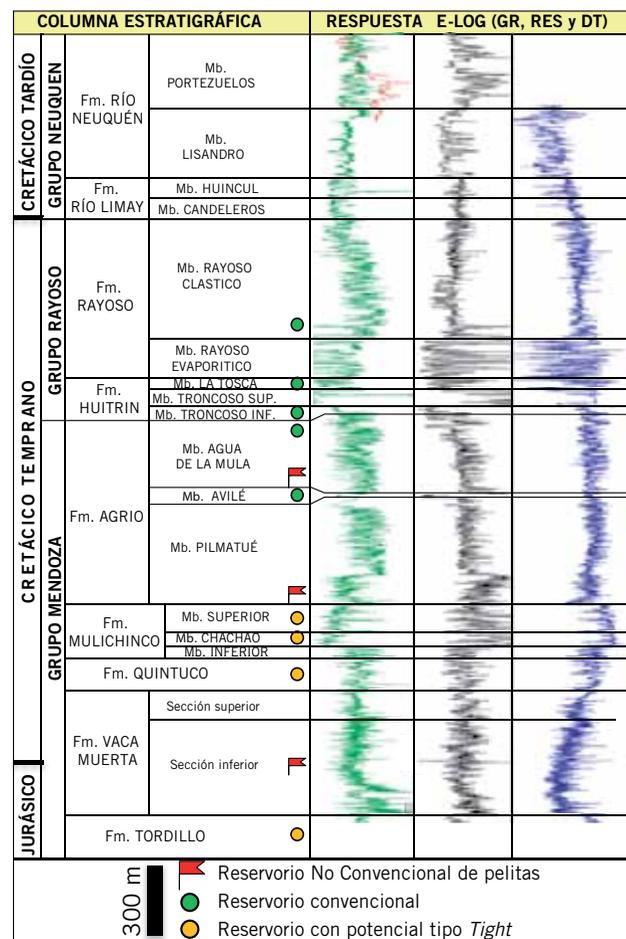


Figura 2. Columna estratigráfica tipo para el área de estudio (modificado de Howell *et al.* 2005).

			FACIES				
			1: rampa externa restringida a cuenca	2: rampa externa	3: offshore zona de transición		
LITOFACIES	alta energía	<i>Packstones</i> intraclásticos laminados	P <sub>i</sub> h	R	MR		
		<i>Grainstones</i> intraclásticos laminados	G <sub>i</sub> h		S		
		<i>Grainstones</i> biocásticos	G <sub>b</sub> m		S		
		Areniscas con laminación horizontal	Sh			MR	
	baja energía	<i>Bindstones</i> microbianos	B <sub>m</sub> l	R			
		<i>Wackestones</i> laminados	W <sub>i</sub> h/ W <sub>e</sub> h		R		
		<i>Wackestones</i> dolomitizados	W <sub>D</sub>			S	
		Margas biocásticas	Mr <sub>b</sub> h	MR	MR		
		Margas laminadas	Mrh	MR	MR		
		Pelitas laminadas	Fl	MR	S	MR	
		Volcanoclásticas	Tobas reemplazadas por carbonatos	T <sub>m</sub> /g	R	R	

Figura 3. Tabla de facies y asociaciones de facies para coronas de El Trapial. Referencias: (MR) facies más representativas, (R) facies representativas, (S) facies subordinadas.

(1989) incluyeron estas nueve secuencias dentro de la Mesosecuencia Mendoza Inferior y las denominaron Mi<sub>1</sub> a Mi<sub>9</sub>, respectivamente.

Recientemente, Kietzmann *et al.* (2014a,b) dividieron la Formación Vaca Muerta en 15 secuencias depositacionales de alta frecuencia, las que se agrupan en 5 secuencias transgresivos-regresivos (Embry y Johannessen 1992), o secuencias compuestas para afloramientos en el área de Mendoza y norte de Neuquén. Por otro lado, Sales *et al.* (2014) reconocieron por lo menos 12 ciclos transgresivos – regresivos (T-R) en el ámbito del engolfamiento.

### Metodología de trabajo y datos disponibles

Con el fin de evaluar el potencial de la Formación Vaca Muerta como reservorio no convencional de hidrocarburos, se perforaron 4 pozos exploratorios en el bloque El Trapial. Durante estas perforaciones, se adquirieron cerca de 120 testigos laterales y 423 metros de coronas, obteniendo así una densa cobertura de la zona de interés que permitiese caracterizarla.

Las características litológicas y texturales, como así también las estructuras sedimentarias, relaciones de contacto y contenido fósil observado en los testigos-corona, permitió definir litofacies, facies sedimentarias y asociaciones de facies. Con este conjunto de datos e interpretaciones, se elaboraron perfiles tipo Selley a escala 1:40 y 1:100. (Marlats *et al.* 2014). También, se realizó un estudio de microfacies en 200 cortes delgados. Para ello, se utilizó el código de litofacies modificado del propuesto por Kietzmann *et al.* (2014a). El mismo consiste en tres letras, en donde la primera indica la textura, la segunda el componente principal (como subíndice), y la tercera la estructura sedimentaria dominante. Las litofacies fueron utilizadas para interpretar procesos; la agrupación de estas define, en esta contribución, facies interpretando subambientes de

deposición, y las asociaciones de facies indican ambientes sedimentarios dominantes.

Además, se realizaron estudios de difracción de rayos X (DRX) sobre roca total en 70 de los cortes antes mencionados. Estos se llevaron a cabo en un mismo laboratorio para resultados consistentes y comparables entre sí.

Para la división de sub-ambientes en rampas carbonáticas se utilizó el esquema propuesto por Burchette y Wright (1992).

La uniformidad de las facies y la clara dificultad para establecer superficies de valor estratigráfico secuencial inequívocas, vuelve complejo el análisis secuencial en las coronas estudiadas y su extrapolación a los perfiles eléctricos. Sin embargo, las superficies de inundación son superficies de fácil identificación y las tendencias en las facies permiten entender el patrón de apilamiento, por lo que en primera instancia se utiliza el modelo de Embry y Johannessen (1992), con el objetivo de subdividir a la Formación Vaca Muerta desde un punto de vista genético.

### Análisis de facies en coronas

A partir de descripciones de afloramientos y de coronas se reconocieron 8 microfacies, 12 litofacies subdivididas a su vez en alta energía, baja energía y volcanoclásticas. Las mismas fueron agrupadas en 3 facies y 2 asociaciones de facies dentro del área de estudio (figura 3).

A continuación, se describe cada una de las facies y la interpretación de su ambiente sedimentario. Asimismo, se mencionan y correlacionan algunas facies diagenéticas con las subsiguientes microfacies.

### Facies 1: Rampa externa restringida a cuenca

#### Descripción

La facies 1 consiste de una alternancia de pelitas (Fl) y

margas (Mrh), entre las que se intercalan de manera subordinada *packstones* intraclásticos laminados (Pih), *bindstones* microbianos (Bml) y tobas (Tm/g). La relación pelitas/carbonatos (P/C) es de ~9:1.

Las pelitas (Fl) y margas (Mrh) son laminadas de color negro a gris oscuro, con espesores de 5 a 80 centímetros. Contienen radiolarios, escamas de peces y fragmentos óseos. En forma subordinada aparecen amonites, bivalvos articulados y desarticulados (en ocasiones fragmentados y bioturbados), microcrinoideos y foraminíferos epistomínidos con orientación aleatoria. En estas litofacies se reconocen 2 microfacies. La microfacies 1 (fangolitas intraclásticas) es clasto-sostén, y está constituida por abundantes intraclastos pelíticos tamaño limo grueso a arena fina, junto con clastos de cuarzo, plagioclasa y micas tamaño limo, así como escasas partículas esqueléticas (radiolarios, escamas, bivalvos, microcrinoideos, entre otros). La microfacies 2 (fangolitas con laminación lenticular microbiana) es matriz-sostén, y se caracteriza por la alternancia de láminas microbianas con láminas fango sostén, con terrígenos tamaño limo y partículas esqueléticas similares a la microfacies 1 (figuras 4-A, B y C).

Los *packstones* intraclásticos laminados (Pih) son de color gris oscuro a negro, con espesores de 5 a 30 centímetros. Los límites son netos y planos y la bioturbación está generalmente ausente. Contienen partículas esqueléticas dispersas o como delgadas concentraciones bioclásticas.

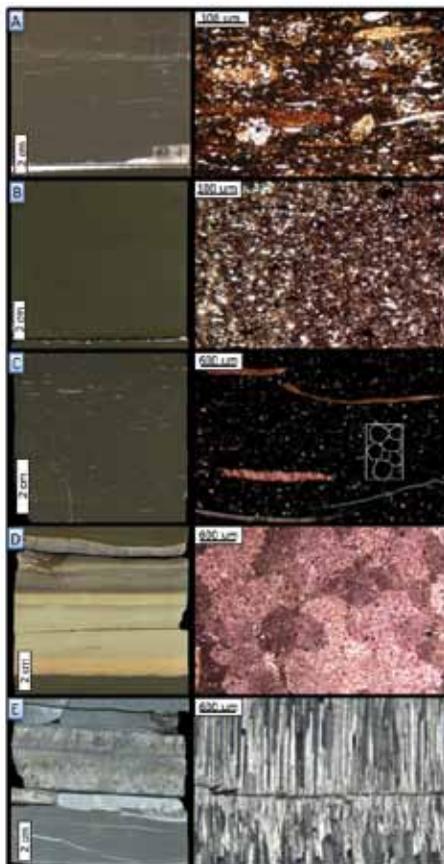


Figura 4. Muestras de mano y cortes delgados de las principales microfacies identificadas en las coronas de la Formación Vaca Muerta. A) Fangolita con fábrica lenticular microbiana, B) Fangolita, C) Fangolita intraclástica (en el recuadro blanco del corte delgado se indican los intraclastos), D) Toba reemplazada por carbonatos, E) calcita fibrosa o "beef".

Los bioclastos incluyen escamas y fragmentos óseos de peces, amonites y pequeños bivalvos. La disposición de los bioclastos es concordante con la laminación. Los bivalvos aparecen articulados o desarticulados, pero bien preservados. Constituyen la microfacies 3 (*packstones* intraclásticos) y contienen abundantes intraclastos micríticos y radiolarios (figura 5-B). La naturaleza micrítica de las partículas lleva a la formación de pseudomatrix carbonática, y macroscópicamente pueden confundirse con *mudstones* y *wackestones* (Kietzmann y Palma 2011).

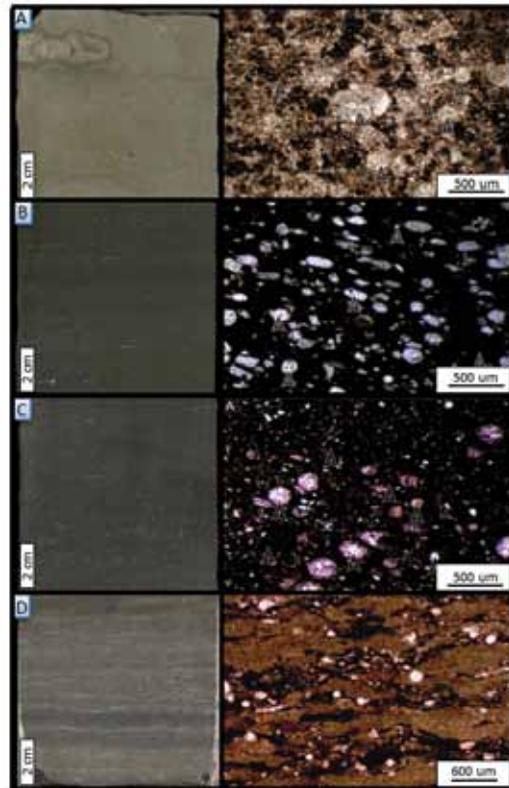


Figura 5. Muestras de mano y cortes delgados de las principales microfacies carbonáticas identificadas en las coronas de la Formación Vaca Muerta. A) Grainstone bioclástico, B) Packstone intraclástico, C) Wackestone, D) Bindstone microbiano.

Los *bindstones* microbianos (Bml) presentan una fina laminación de aspecto irregular, que consiste en la alternancia de láminas micríticas y láminas de calcita granular. Las láminas micríticas contienen radiolarios y foraminíferos epistomínidos. La morfología de crecimiento es laminar. En planta se observan acumulaciones de intraclastos de las mismas láminas microbianas. Contiene amonites, fragmentos aislados de ostreoides, lucínidos y a veces fragmentos óseos. Estos depósitos constituyen la microfacies 4: *bindstones* microbianos (figura 5-D).

Las tobas (Tm/g) están reemplazadas por carbonato de calcio mostrando un aspecto cristalino. Consisten en capas de carbonatos de color gris verdoso a gris parduzco. Presenta contactos netos y planos, comúnmente estructuras de deformación por carga, estructuras tractivas y de escape de fluidos. El espesor varía de 2 a 15 centímetros. A nivel macroscópico y a luz reflejada se identifica un mosaico de cristales de calcita poikilotópica que contienen trizas y/o fragmentos pumíceos, y en muchos casos

bivalvos fragmentados y radiolarios. En menor medida, se reconocieron tobas (Tm/g) alteradas a arcillas. Las mismas corresponden a bancos gris blanquecino de menor potencia que las tobas reemplazadas por carbonato. En muestra de mano son friables y sus contactos son netos y planos. Los depósitos antes descriptos corresponden a la microfacies 5: tobas reemplazadas o alteradas (figura 4-D).

## Interpretación

Estas facies son atribuidas a una rampa externa restringida a cuenca, en donde la depositación principal ocurrió por debajo del nivel de olas de tormenta y en condiciones anóxicas (figura 6).

Los procesos de transporte y sedimentación interpretados fueron eventos de tormenta que pusieron en suspensión partículas, procesos de floculación y posterior decantación y productividad de organismos.

La laminación horizontal se desarrolló a partir de la decantación y floculación de partículas en condiciones de baja energía. La deficiencia de oxígeno queda evidenciada por la ausencia de bioturbación y el color negro a gris oscuro en estos depósitos.

La abundancia de intraclastos, la fábrica lenticular microbiana y los bioclastos asociados a las tobas indicarían que la depositación ocurrió a partir de la erosión de zonas más someras debido a la acción de tormentas, con el consiguiente transporte del material sedimentario a zonas más distales de la rampa como flujos de tipo turbidíticos o corrientes de fondo.

Los *bindstones* microbianos sugieren una baja tasa de sedimentación, una muy baja energía y un medio pobremente oxigenado.

## Facies 2: Rampa externa

### Descripción

La facies 2 está constituida por la intercalación de margas (Mrh, Mrbh) con *packstones* y *grainstones* intraclásticos (Pih, Gih). En forma subordinada, aparecen *grainstones* bioclásticos (Gbm), *wackestones* laminados (Wrh, Weh), tobas reemplazadas (Tm/g) y pelitas grisáceas (Fl). La relación pelitas/carbonatos es ~3:1.

Al igual que en la facies anterior, las margas (Mrh, Mrbh) son laminadas, de color negro a gris oscuro, con espesores de 5 y 40 cm. Contienen amonites, bivalvos articulados y desarticulados, en ocasiones fragmentados, y foraminíferos epistominidos con orientación aleatoria. Estas litofacies contienen las mismas 2 microfacies que en la facies 1: microfacies 1 (fangolitas intraclásticas) y microfacies 2 (fangolitas con laminación lenticular microbiana).

Los *packstones/grainstones* intraclásticos (Pih, Gih) son similares a los de la facies anterior (Microfacies 3: *packstones* intraclásticos), pero aparecen en mayores proporciones y con espesores de 15 a 30 centímetros. Contienen partículas esqueléticas dispersas incluyendo amonites y bivalvos. La disposición de los bivalvos es concordante con la laminación, pudiendo aparecer articulados o desarticulados.

Los *grainstones* bioclásticos (Gbm) se presentan en capas tabulares de 5 a 15 cm de espesor. El límite basal es neto, irregular y erosivo. Consisten en concentraciones

bioclásticas de empaquetamiento denso. Los bioclastos están conformados principalmente por ostreidos, aunque en menor medida aparecen bivalvos recristalizados y amonites. Los bancos son masivos, aunque ocasionalmente presentan gradación inversa. Las valvas aparecen desarticuladas y fragmentadas. La matriz es peloidal y contiene además foraminíferos bentónicos y escasos terrígenos (Microfacies 6: *grainstones* bioclásticos) (figura 5-A).

Los *wackestones* (Wrh, Weh) son tabulares, con contactos netos y planos; tienen espesores de 15 a 35 centímetros. La bioturbación, cuando está presente, contiene *Chondrites* o trazas horizontales mal preservadas (*Thalassinoides?*). También contiene bivalvos y radiolarios recristalizados y abundantes amoniteos. Estos depósitos corresponden a las microfacies 7 (*wackestones* radiolaríticos) y 8 (*wackestones* con *epistomina*).

Las tobas reemplazadas son similares a las de la facies 1 (Microfacies 5: tobas reemplazadas), pero se presentan en bancos de mayor espesor, hasta unos 25 centímetros.

En lo referente a facies diagenéticas, se observan concreciones esféricas a subesféricas carbonáticas de 2 cm a más de 40 centímetros de espesor. Las capas supra y subyacentes suelen aparecer deformadas debido a la compactación diferencial. Es común que contengan pirita o fragmentos bioclásticos en su interior, así como fracturas asociadas. Asimismo, abundan niveles de calcita fibrosa ("beef") de tamaño milimétrico hasta unos 10 cm de potencia. En algunos *beef* de mayor espesor se reconoce porosidad intergranular por disolución, mientras que en los más delgados es frecuente la asociación con concreciones (figura 4-E).

## Interpretación

Esta facies y sus asociaciones son interpretadas como un ambiente de rampa externa, donde imperaron en forma alternada períodos de tormenta y buen tiempo (figura 6).

Las margas y pelitas reconocidas sugieren una sedimentación producto de la decantación de material transportado en suspensión o como flujos de tipo turbidíticos.

Los *packstones* intraclásticos y peloidales indicarían sedimentación asociada a procesos de tormentas, mientras que los *wackestones* con epistominas o abundantes radiolarios, y las tobas reemplazadas se podrían asociar a sedimentación a partir de flujos densos o a la acción de corrientes de fondo.

La presencia de concreciones indicaría la recirculación de carbonatos durante períodos de baja tasa de sedimentación y en etapas de diagénesis temprana. En cuanto a la abundancia de *beef*, su presencia estaría asociada a la sobrepresión producto de la generación y expulsión de hidrocarburos (Rodrigues *et al.* 2009).

## Facies 3: Offshore – zona de transición

### Descripción

La facies 3 está integrada por bancos de pelitas laminadas (Fl) de color gris oscuro con intercalaciones de limos y arenas muy finas laminadas (Sh), de color gris oscuro. Subordinadamente aparecen *wackestones* dolomitizados (WD) y *wackestones* con terrígenos. La relación pelita/arena es de ~6:1.

Las pelitas son laminadas (Fl) de color gris oscuro, contienen escasas escamas de peces y subordinadamente aparecen bivalvos articulados (*Eriphyla* sp.) con orientación aleatoria.

Las limolitas y areniscas están laminadas (Sh). Son de color gris oscuro y no presentan signos de bioturbación a nivel microfacies.

### Interpretación

Esta facies pertenecería a depósitos de la zona de *offshore* a transición, con depósitos por debajo del nivel de olas de tormenta (figura 6).

El color oscuro y la laminación horizontal sugieren un depositación por decantación en un ambiente de baja energía y anóxico.

La presencia de limolitas y areniscas laminadas con ausencia de bioturbación sugeriría una depositación producto de la acción de tormentas en áreas adyacentes que promovieron la removilización de material sedimentario como flujos de tipo turbidíticos o corrientes de fondo.

### Asociaciones de facies

#### Asociación de facies A:

Esta asociación incluye a las facies 1 (rampa externa restringida a cuenca) y 2 (rampa externa), y es interpretada como un ambiente de rampa mixta (carbonática - silico-

clástica) con una importante influencia de flujos densos y la acción de corrientes de fondo (figura 6). Su espesor para la zona de El Trapial es de alrededor de 400 metros.

Las tobas reemplazadas y el alto contenido de material volcánico asociado a otras microfacies indicarían actividad del arco volcánico y un sistema con importante cantidad de flujos turbidíticos asociados que queda evidenciado en las facies 1 y 2.

La importante cantidad de concreciones, la evidencia de bioturbación, las microfacies asociadas a sedimentación por decantación, sugieren un ambiente con baja energía sometido periódicamente a la acción de flujos distales.

Asimismo, y siguiendo la propuesta de Rodrigues *et al.* (2009), la existencia de calcita fibrosa o *beef* indicaría en forma indirecta una abundancia de materia orgánica para esta asociación de facies, la cual es concordante con los altos valores de carbono orgánico total (COT) medidos y calculados (Fantín *et al.* 2014).

#### Asociación de facies B:

Esta asociación de facies solo incluye a la facies 3 según lo que se ha podido analizar en recortes de roca, testigos rotados y comparaciones con las asociaciones de facies realizadas en afloramientos. En base a esto, se la interpreta como parte de una plataforma mixta predominantemente silicoclástica (figura 6).

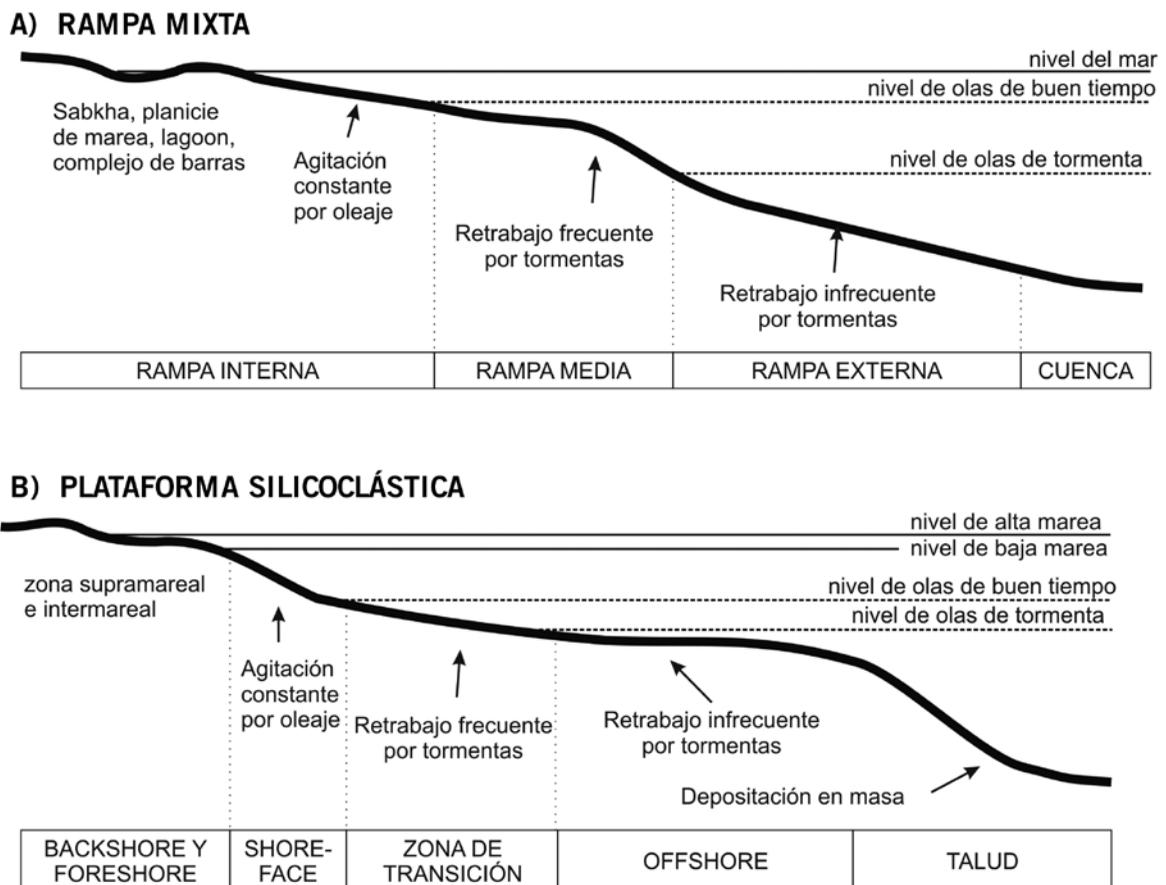


Figura 6. Sección esquemática indicando los subambientes de los dos ambientes sedimentarios interpretados. A) Rampa mixta. B) Plataforma silicoclástica.

En general, esta asociación de facies, representada por un sub-ambiente de *offshore* a zona de transición depositada por debajo del nivel de olas de tormenta, responde a la progradación de facies asignadas a las Formación Quintuco.

### Mineralogía y diagramas ternarios

Con el fin de caracterizar y comparar las principales microfacies identificadas en cortes delgados, se realizaron estudios de difracción de rayos X sobre roca total (DRX) en 70 de las 200 muestras descritas. El uso final de estas caracterizaciones es la utilización de perfiles eléctricos especiales (ej.: mineralógicos) como un *proxy* más para la interpretación de facies en donde no se cuenta con testigos-corona.

Siendo un determinado grupo de minerales los más representativos de estas rocas, se procedió a recalcular las muestras al 100% para arcillas, carbonatos y cuarzo, feldespato y plagioclasas (QFP). Finalmente, se graficó un diagrama ternario mostrando las microfacies identificadas en microscopio (figura 7).

Si bien las muestras analizadas arrojan diversos porcentajes de minerales para las mismas microfacies descritas, y los procesos diagenéticos y la abundante presencia de material volcánico modifican la impronta original al realizar el análisis de rayos X sobre roca total, fue posible reconocer agrupaciones de facies sobre estas muestras.

Las microfacies de fangolita con fábrica lenticular microbiana y fangolita intraclástica son las que mayores valores de QFP presentan (promedio 45%); le siguen en abundancia los carbonatos (de 20 a 45%); y, finalmente, las arcillas (de 15 a 35%) representadas por illita e illita-smectita en su mayoría. Algunas de las fangolitas analizadas en microscopio muestran evidencias de neomorfismo a micrita y fracturas rellenas con calcita, lo que eleva notablemente los valores de carbonato total en estas muestras.

Las microfacies 3 (*packstone* intraclástico), 7 y 8 (*wackestone* radiolarítico y con epistominas) presentan altos valores de carbonatos (promedio 48%), seguidos por QFP (promedio 28%) y en menor medida de arcillas (de 10 a 24%). Las muestras que tienen mayores contenidos de

QFP que el promedio, se vinculan a la presencia de niveles de terrígenos intercalados, mayormente plagioclasas, o a relleno de sílice en fracturas.

En lo que respecta a las microfacies 4 (*bindstone* microbiano) y 6 (*grainstones* bioclásticos), las mismas arrojan altos valores de carbonatos (entre 60 y 80%) y moderados a bajos valores de QFP (promedio 18%) y arcillas (promedio 18%). En estas microfacies se observa que uno de los cortes delgados presenta niveles de terrígenos intercalados, los cuales aumentan el contenido de QFP en esta muestra.

Finalmente, las tobas (microfacies 5) exhiben un patrón muy variable dentro del diagrama ternario. El mismo es dependiente de los reemplazos por carbonato, concentraciones de terrígenos o a las alteraciones a arcillas presentes en estas facies.

### Análisis estratigráfico

El intervalo Tithoniano – Valanginiano está representado en el ámbito de El Trapial por las formaciones Vaca Muerta, Quintuco y Mulichinco. La Formación Vaca Muerta se extiende desde el Tithoniano temprano tardío hasta el inicio del Valanginiano temprano (Aguirre-Urreta y Vennari 2013; Kietzmann 2013b) y sobreyace en contacto neto y paraconcordante a los depósitos continentales de la Formación Tordillo. El contacto con la Formación Quintuco es transicional y se interpreta a partir del aumento en la frecuencia y el espesor de niveles de limolitas, de carbonatos y de pelitas grises, lo cual difiere de la homogenea litología de lutitas negras, margas y calizas que caracterizan a la Formación Vaca Muerta. El contacto entre la Formación Quintuco y la Formación Mulichinco es neto, y está marcado por una dislocación de facies con un nuevo salto granulométrico a areniscas grises finas a muy finas.

### Estratigrafía secuencial

El análisis estratigráfico secuencial para el área de estudio fue realizado a partir del modelo propuesto por Embry y Johannessen (1992), con el objetivo de subdividir a la Formación Vaca Muerta desde un punto de vista genético. En dicho modelo, la secuencia está compuesta por 2 cortejos sedimentarios, uno regresivo y otro transgresivo, mientras que el límite de secuencia lo ubican en el inicio del ciclo transgresivo, o dicho de otra manera, en la superficie de inundación. El temperamento adoptado se cree el más apropiado para la zona de estudio debido a que se encuentra en una posición distal de la cuenca donde las superficies erosivas son escasas y difíciles de reconocer en afloramiento y/o corona. Mientras que, las superficies de inundación que limitan ciclos de diferentes escalas son fácilmente reconocibles en testigo coronas.

Para definir estos cortejos sedimentarios, se valió de la identificación de parasecuencias de pequeña y mediana escala en coronas, las facies antes mencionadas con sus tendencias, la composición mineralógica, y posteriormente se compararon con los perfiles eléctricos registrados en los pozos exploratorios (figura 8). Cabe destacar que la respuesta de estos últimos perfiles se agruparon en 8 electrofacies siguiendo la metodología de análisis de *clusters* (*cluster analysis*), los cuales fueron también utilizados para reconocer cambios verticales recurrentes dentro del

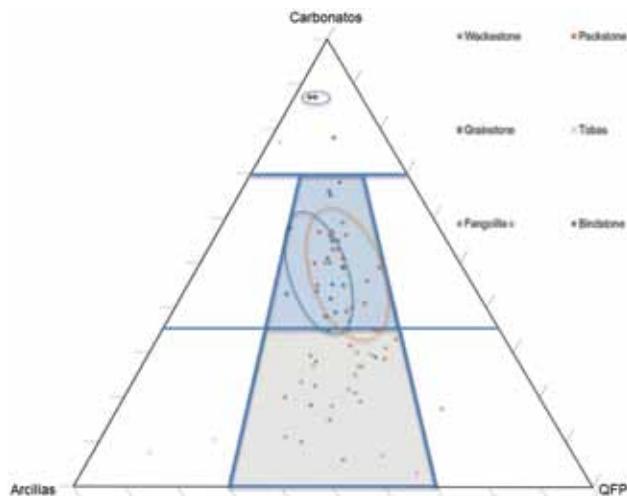


Figura 7. Diagrama ternario carbonatos –arcillas– cuarzo, feldespato y plagioclasas (QFP), en donde se indican las microfacies identificadas y las agrupaciones propuestas sobre 70 muestras analizadas. El óvalo verde agrupa wackestones, el naranja packstones y el azul grainstones.

intervalo de la Formación Vaca Muerta (Cuervo *et al.* 2014; Fantín *et al.* 2014), y así incluidos en este análisis.

Además, se tuvo en consideración las variaciones del contenido de materia orgánica, carbonato de calcio y elementos terrígenos, todos datos que proceden del análisis de perfiles eléctricos como de laboratorio. Según las observaciones hechas en afloramientos del sector sur-mendocino de la Cuenca Neuquina por Kietzmann *et al.* (2014a), y los estudios de subsuelo realizados en el presente trabajo, se nota un incremento de terrígenos (cuarzo, plagioclasas y fragmentos líticos), al comienzo del cortejo sedimentario transgresivo, y un pico de contenido de materia orgánica cerca de la superficie de máxima inundación, mientras que el contenido de carbonato de calcio se incrementa en la parte regresiva del ciclo y decrece en el transgresivo.

Estas secuencias fueron correlacionadas lito y bioestratigráficamente con las identificadas en superficie por Kietzmann *et al.* (2014a y b) en el sector norte de la Cuenca Neuquina. En efecto, la identificación taxonómica de 90 muestras de amonites encontrados en las coronas de los pozos perforados en el área de El Trapial permitió identificar la asociación de biozonas, de acuerdo al esquema bioestratigráfico propuesto para la Cuenca Neuquina para el intervalo Tithoniano-Valanginiano (Aguirre-Urreta y Vennari 2013). Adicionalmente, el estudio taxonómico de microfósiles calcáreos de los grupos de calciesferas y calpionéllidos observados en láminas delgadas de las coronas, testigos laterales y recortes de perforación, permitió refinar aún más la datación bioestratigráfica.

Finalmente, estos estudios permitieron definir informalmente 5 secuencias transgresivo-regresivas dentro del intervalo Quintuco-Vaca Muerta para el área de estudio. También fueron reconocidas en coronas y perfiles eléctricos secuencias de menor orden, denominadas secuencias depositacionales de alta frecuencia. Los resultados preliminares muestran 16 secuencias depositacionales de alta frecuencia en los pozos de El Trapial.

Las cinco secuencias transgresivo-regresivas antes mencionadas fueron denominadas como Tannat, Cabernet, Malbec, Bonarda-Sirah y Torrontés-Quintuco (figuras 8 y 9). A continuación, se destacan los rasgos y características observadas en el subsuelo del área El Trapial, sus interpretaciones y su correlación con los afloramientos de la zona de Chos Malal. La caracterización y respuestas en registros eléctricos y sísmica son descriptas en otro trabajo por Fantín *et al.* (2014).

#### Secuencia Tannat:

Este intervalo presenta aproximadamente 40 metros de potencia, los cuales se mantienen casi constantes a través de toda el área de El Trapial. Los primeros 4 metros corresponden a la parte basal de la Formación Vaca Muerta. Se trata de bancos con un alto contenido en carbonatos, que de acuerdo a la correlación con afloramientos cercanos corresponderían a *bindstones* microbianos asociados a facies de rampa externa (facies 2). En forma progresiva, el sistema se profundiza evolucionando a facies de rampa externa restringida a cuenca (facies 1) en el denominado Tannat medio.

Entre el Tannat medio y el superior se observa un aumento en la cantidad de concreciones, fósiles y niveles de tobas, los cuales disminuyen hacia el final de este ciclo. La

sección superior de este intervalo muestra un incremento de las facies carbonáticas, hecho que sugiere nuevamente la instalación de un medio de rampa externa (facies 2).

De acuerdo a las biozonas observadas en coronas, esta secuencia se encuentra entre la zona de *Pseudolissoceras zitelli* a la parte basal de la zona de *Windhauseniceas internispinosum* (Aguirre-Urreta y Vennari 2013). Si bien no se poseen coronas de los primeros 5 metros de la formación, probablemente el ciclo se inicie en la zona de *Virgatosphinctes mendozanus*, tal como sucede prácticamente en toda la cuenca. Dentro de las biozonas de calciesferas, este ciclo abarca las zonas de *Malmica* a la parte media de *Tenuis*. Así descripto, el ciclo Tannat comprende al intervalo Tithoniano temprano tardío a Tithoniano medio.

#### Secuencia Cabernet:

La segunda secuencia transgresivo-regresiva tiene cerca de 60 metros de espesor y, al igual que el intervalo anterior, no muestra variaciones laterales de importancia. Los primeros 15 metros del Cabernet inferior muestran un aumento en cuarzo y arcillas y una merma en el contenido de carbonatos. El predominio de litofacies de margas y pelitas permite caracterizar a la misma como rampa externa restringida a cuenca (facies 1). En forma progresiva, las facies descriptas precedentemente se somerizan pasando a depósitos de rampa externa (facies 2), en donde los contenidos relativos de arcilla disminuyen notablemente, baja la relación pelita/carbonato y se observa la aparición de abundantes niveles de tobas, estructuras de escape de fluidos, evidencias de bioturbación y concreciones de diversos tamaños.

El Cabernet superior presenta bajo contenido de carbonatos, altos valores de terrígenos, uno de los contenidos más altos de carbono orgánico total para el intervalo y aumento en la porosidad total y la permeabilidad de matriz. Asimismo, esta sección es fácil de identificar en perfiles de pozo a lo largo de todo El Trapial. Este intervalo presenta una dualidad en su asignación a un subambiente. En primera instancia, se cree que el aumento de terrígenos es relativo y podría asociarse a una interrupción de la fábrica carbonática. Si bien la imposibilidad de reconocer estratificaciones entrecruzada *hummocky* (HCS), como estructura diagnóstica para una zona con influencia de olas de tormenta, se interpreta a este intervalo como facies de rampa externa (facies 2) proximal hacia facies de rampa media distal.

Este intervalo abarca las biozonas de *Windhauseniceas internispinosum* y se extiende hasta la base de la zona de *Substeueroceras koeneni* (Aguirre-Urreta y Vennari 2013). También se remarca, como de importante valor estratigráfico, la presencia de microcrinoideos observados en corte delgado, que incluyen *Saccocoma sp.*, indicando una edad tithoniana, y *Roveacrinidae gen. et sp. indet.*, que son típicamente cretácicos (Kietzmann y Palma 2009). En cuanto a las calciesferas del ciclo Cabernet, se encuentran dentro de la biozona de *Tenuis* a la base de la zona de *Proxima* y los calpionéllidos corresponderían a la zona de *Chitinoidella* a *Crassicollaria*. Este ciclo abarca principalmente el Tithoniano tardío.

#### Secuencia Malbec:

El Malbec es el que mayor variabilidad de espesores presenta a lo largo del área de estudio, excepto los primeros 40 metros. El Malbec inferior está representado nuevamente

Análisis Sedimentológico			Análisis Estratigráfico		
Asociaciones de facies	Facies	Litofacies	Unidades estratigráficas	Facies correlacionadas	Secuencias transgresivo-regresivas
B: Plataforma mixta predominantemente silicoclástica	3: Offshore zona de transición	pelita/arena ~6:1	Fm. Quintuco	3	5. Torrontés y Fm. Quintuco
			Torrontés superior	3	
			Torrontés inferior	1 a 3 distal	
A: Rampa mixta (carbonática-silicoclástica)	2: Rampa externa	pelita/carbonatos ~3:1	Sirah	2 proximal	4. Bonarda y Sirah
			Bonarda superior	2	
			Bonarda inferior	1 a 2	
			Malbec superior	2	3. Malbec
	Malbec inferior	1			
	1: Rampa externa restringida a cuenca	pelita/carbonatos ~9:1	Cabernet superior	2 a 2 proximal	2. Cabernet
			Cabernet inferior	1	
			Tannat superior	1 a 2	1. Tannat
			Tannat medio	1	
	Tannat inferior	2			

Figura 8. Resumen del análisis sedimentológico propuesto y su relación con el análisis estratigráfico secuencial interpretado para el área de El Trapial.

por abundantes margas y pelitas y en menor medida por carbonatos. En los primeros metros de esta sección se han descripto *bindstones* microbianos, por lo que se caracteriza a los mismos como facies de rampa externa (facies 2), las que progresivamente pasan a facies de rampa externa restringida a cuenca (facies 1).

La sección superior presenta un espesor que varía entre los 100 y 130 metros a lo largo de El Trapial. En general, es rica en terrígenos y niveles con materia orgánica. Asimismo, el contenido de carbonatos aumenta considerablemente hacia el techo de este ciclo. Esta sección presenta abundantes niveles de calcita fibrosa (“beef”) entre el pase del Malbec inferior al superior. También se observa un aumento en la presencia de fósiles, representados por radiolarios, bivalvos desarticulados y gastrópodos. Se interpreta a esta sección como facies de rampa externa (facies 2).

Bioestratigráficamente, esta secuencia se encuentra entre las biozonas de *Substeueroceras koeneni* y *Spiticeras damesi* (Aguirre-Urreta y Vennari 2013). En cuanto a las biozonas de calciesferas y calpionéllidos, el ciclo Malbec se encuentra entre las zonas de *Proxima* a *Wanneri* y la de *Calpionella* a *Calpionellopsis*. Estas biozonas se encuentran entre el Tithoniano superior alto al Berriasiano superior.

#### Secuencia Bonarda-Sirah:

La cuarta secuencia transgresivo-regresiva está compuesta por dos partes distintivas según la respuesta de los perfiles eléctricos, por lo que se lo ha dividido en dos nombres informales distintos.

Bonarda presenta un espesor de 80 metros y es continuo lateralmente. En este intervalo se intercalan las fangolitas intraclásticas y con fábrica lenticular microbiana con los *wackestones* radiolaríticos y *packstones* intraclásticos. En la sección inferior se reconocen niveles de tobas que hacia la parte superior presentan mayor potencia y muestran evidencias de bioturbación y/o calcos de carga. En este ci-

clo es muy bajo el contenido de niveles de calcita fibrosa (“beef”), y los pocos observados muestran un desarrollo menor al centímetro. Esta sección se interpreta como facies de rampa externa (facies 2), con algunas evidencias de rampa externa restringida a cuenca (facies 1).

La sección superior corresponde a Sirah, y presenta una potencia variable en el área de estudio de 25 a 40 metros en sentido este-oeste. Si bien solo se obtuvieron unos pocos metros de corona para este intervalo, el estudio de 7 cortes delgados y el análisis de rayos X muestran a esta sección con altos valores de carbonatos y predominio de microficies 7 (*wackestones* radiolaríticos) y 3 (*packstones* intraclásticos). En base a estos datos, se interpreta a esta sección como facies de rampa externa (facies 2) proximal a posible facies de rampa media.

En lo que respecta al estudio de amonoideos, se extiende desde la biozona de *Spiticeras damesi* a la de *Neocomites wichmanni* (Aguirre-Urreta y Vennari 2013). En cuanto a las calciesferas y calpionéllidos identificados, este ciclo se comprende entre la biozona de *Wanneri* a *Vogleri* y de la biozona media de *Calpionellopsis* a *Calpionellites*. En base a lo antes mencionado, esta secuencia abarcaría el Berriasiano superior alto a Valanginiano inferior.

#### Secuencia Torrontés-Quintuco:

La última secuencia transgresivo-regresiva corresponde a la sección superior de la Formación Vaca Muerta y a la Formación Quintuco. La potencia de este intervalo es muy variable, desde unos 160 metros en el noreste hasta más de 260 metros hacia el oeste.

Los testigos laterales, los recortes de perforación, los perfiles de pozo y su correlación con afloramientos permiten caracterizar a este intervalo como rico en arcillas y terrígenos, con bajos contenidos de materia orgánica y principalmente litofacies de pelitas laminadas y subordinadamente areniscas y limolitas laminadas. Se interpreta a

este intervalo como facies de *offshore* a zona de transición (facies 3).

El estudio de calciesferas y calpionéllidos en cortes delgados permite incorporar a esta secuencia en las biozonas de *Conferta* a *Echinata* y *Calpionellites* a *Tintinnopsella*. Aunque en la Cuenca Neuquina aún no han podido ser establecidas con exactitud, estas biozonas son asignadas a la base del Valanginiano inferior al Hauteriviano inferior para la zona del Tethys (Borza 1969; Lakova *et al.* 1999).

### Comparación subsuelo-afloramiento

Si bien existen limitaciones en el estudio de facies y secuencias depositacionales en coronas, los resultados de este estudio son comparables con información de afloramiento. Los afloramientos más cercanos al área de El Trapial se encuentran en una faja al pie del Volcán Tromen, en el área conocida como Yesera del Tromen. A su vez, el hecho de contar con un sólido armazón bioestratigráfico, producto de la identificación de amonites y microfósiles, material procedente en gran medida de los testigos-corona

perforados, permitió una comparación crítica con afloramientos ubicados en las cercanías de Chos Malal, particularmente el perfil de Puerta Curaco (figura 9).

Kietzmann *et al.* (este congreso), han estudiado dos secciones clásicas de este sector, que incluyen la sección Yesera del Tromen y Puerta Curaco, donde reconocieron litofacies similares a las de El Trapial, que fueron agrupadas en 6 facies y 2 asociaciones de facies. La asociación de facies 1, que corresponde esencialmente a la Formación Vaca Muerta, contiene facies de cuenca a rampa media distal de un sistema de rampa carbonática. Mientras que la asociación de facies 2, está contenida dentro de la Formación Quintuco e incluye facies de *offshore* a *shoreface* inferior, dentro de un sistema de plataforma mixta.

Las facies presentes en el área de El Trapial parecen ser algo más profundas que las reconocidas en afloramiento, dado que estas no alcanzarían el sector de rampa media. Sin embargo, es importante remarcar que las estructuras entrecruzadas *hummocky* son extremadamente difíciles de reconocer en coronas debido a la limitación de observación lateral. Asimismo, los depósitos de la Formación Vaca Muerta

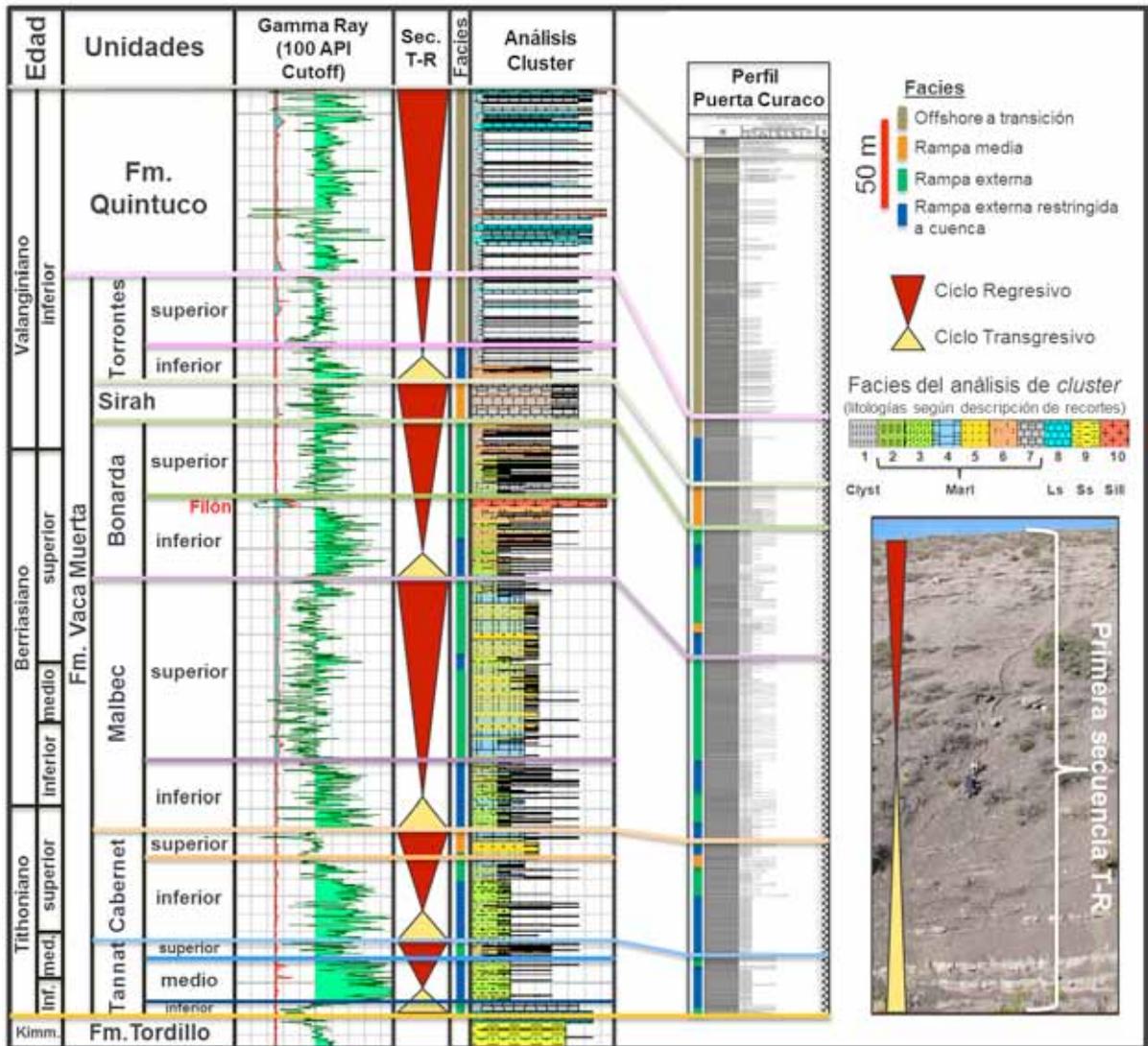


Figura 9. Comparación de secuencias transgresivo-regresivas (T-R), interpretadas en los pozos de El Trapial y las asociaciones de facies y ciclos observados en el perfil Puerta Curaco.

representan un sistema de baja energía, donde la rampa media es un sector del sistema poco representado y claramente transicional con la rampa externa. En efecto, la única diferencia entre estos dos subambientes está relacionada con la frecuencia con la que las tormentas interactúan con el fondo marino (Burchette y Wright 1992). La profundización hacia el área de El Trapial muy probablemente esté controlada por la paleotopografía previa a la depositación de esta unidad, donde el Dorso de los Chihuidos y los sistemas extensionales jurásicos deben haber ejercido un control de primer orden en la distribución de las facies sedimentarias.

Por otro lado, desde el punto de vista estratigráfico secuencial en El Trapial, y como fue descrito, se reconocieron cinco secuencias transgresivo-regresivas, que contienen secuencias depositacionales de alta frecuencia. Estas secuencias son consistentes en edad con las observaciones realizadas por Kietzmann *et al.* (2014a), en el sector surmendocino de la cuenca, así como por Kietzmann *et al.* (este congreso), en el sector de la Faja Plegada y Corrida del Agrio. Al igual que en afloramiento, se observa un enriquecimiento en cuarzo y arcillas en los cortejos transgresivos, y un incremento en el contenido de carbonatos en los cortejos de mar alto, por lo que la subdivisión genética de estos intervalos dentro de la Formación Vaca Muerta es fundamental para reconocer los potenciales reservorios.

### Impacto de la estratigrafía en reservorios no convencionales

Los análisis de facies a distintas escalas de trabajo, desde testigos-corona hasta cortes delgados, como así también la aplicación de criterios de estratigrafía secuencial mediante el uso de perfiles eléctricos, sísmica y testigos-corona, han demostrado ser herramientas de gran valor al momento de caracterizar y profundizar en el conocimiento de un reservorio no convencional.

Del análisis de facies efectuado, se destaca la presencia y abundancia de las microfacies 1, 2 y 3 (fangolitas intraclásticas, con fábrica lenticular microbiana y *packstones* intraclásticos). La abundancia de clastos e intraclastos tamaño limo grueso a arena fina en estas microfacies, impactan en las características reológicas de la formación. Los estudios de laboratorio, realizados en las coronas de El Trapial, indican *a priori* que estas microfacies son las que mayores valores de porosidad presentan.

También impactan en la calidad del reservorio y la fragilidad de la roca la abundancia de partículas volcánicas y la fuerte impronta de los procesos post-depositacionales. Dentro de estos procesos se destaca en el área de estudio la frecuente cantidad de niveles tobáceos, tanto reemplazados a calcita como alterados a arcillas, concreciones de diversos tamaños y niveles de calcita fibrosa (“beef”).

El análisis de facies permitió identificar dos ambientes sedimentarios predominantes: una rampa mixta y una plataforma mixta a silicoclástica. Estas dos secciones fueron reconocidas en una primera fase mediante el estudio de la configuración de los reflectores sísmicos. La sección superior, correspondiente a la quinta secuencia transgresivo-regresiva denominada como Torrontés-Quintuco, se interpreta en El Trapial como facies de *offshore* a transición con bajo potencial como reservorio no convencional, tanto por su litología como por el bajo contenido de materia

orgánica. Las restantes secuencias, con mayor o menor potencial, presentan las condiciones básicas necesarias para ser consideradas y evaluadas como reservorios no convencionales. *A priori*, las facies de rampa externa para el área de El Trapial presentan buena relación y distribución entre el carbonato y las pelitas, adecuados valores de carbono orgánico total y de porosidad.

## Conclusiones

Se reconocieron para el área de estudio litofacies y microfacies dominantes, que fueron agrupadas en facies sedimentarias, las que permitieron definir dos ambientes sedimentarios principales. Asimismo, se agruparon las distintas microfacies estudiadas según sus contenidos de minerales principales. Estos estudios permitieron entender las variaciones verticales y laterales de la Formación Vaca Muerta, tanto en subsuelo como en afloramiento, sustanciales para predecir zonas más favorables para la prospección y explotación de hidrocarburos.

En base al análisis estratigráfico secuencial, se reconocieron 5 secuencias transgresivo-regresivas (Embry y Johannessen 1992). En el cortejo sedimentario transgresivo, representado por un sistema de rampa mixta, se observa un incremento de terrígenos, dominando facies de pelitas/margas, y, comparativamente, valores más altos del carbono orgánico total (COT), hacia la superficie de máxima inundación. Mientras que durante el cortejo sedimentario regresivo el contenido de carbonatos se incrementa. Para el sistema de plataforma mixta a silicoclástica, esta relación se invierte. Se observa en la última secuencia transgresivo-regresiva, que durante el estadio transgresivo hay un incremento de facies carbonáticas, que luego del intervalo Torrontés inferior desciende considerablemente a expensas de un aumento en las facies pelíticas y de disminución de la materia orgánica.

Finalmente, se observa que las facies de rampa externa en las secuencias regresivas de la rampa mixta presentan, para el área de El Trapial, un buen potencial como reservorio no convencional. ■

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Chevron Argentina y al IFC por la autorización para publicar los resultados aquí exhibidos. A los revisores Gustavo Vergani y Daniel Dellapé por sus correcciones, comentarios y sugerencias. A Rubén González, Marcelo Limeres, Sergio Cuervo y María Dolores Vallejo, quienes con sus observaciones contribuyeron a mejorar el presente trabajo.

**Federico González Tomassini:** Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

**Diego A. Kietzmann:** Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires e Instituto de Estudios Andinos Don Pablo Groeber (IDEAN) – CONICET.

**Manuel A. Fantín y Luisa C. Crousse:** Chevron Argentina SRL.

**Hernán M. Reijenstein:** Chevron Latin America Business Unit.

## Referencias

1. Aguirre-Urreta, M.B. y V.V. Vennari, 2013, "Amonites y bioestratigrafía de la Formación Vaca Muerta en tres pozos de El Trapial (ETxp-2001, ETxp-2002 y ETxp-2006)". Informe inédito.
2. Borza, K., 1969, *Die Mikrofazies und Mikrofossilien des Oberjuras und der Unterkreide der Klippenzone der Westcarpaten*. Slovak Academy of Sciences 302, 299 p., Bratislava.
3. Burchette, T.P. y Wright, V.P., 1992. *Carbonate ramp depositional systems*. Sedimentary Geology 79, 3–57.
4. Cuervo, S., D. Vallejo y L.Crousse, 2014, Caracterización integrada petrofísica y geomecánica de la Formación Vaca Muerta en el área de El Trapial. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. IAPG. Mendoza, Argentina.
5. Embry, A.F. y E.P. Johannessen, 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., Lund, T.B. (Eds.), *Arctic Geology and Petroleum Potential*. Norwegian Petroleum Society, Special Publication 2, pp. 121–146.
6. Fantín, M., L. Crousse, S. Cuervo, D. Vallejo, F. Gonzalez Tomassini, H. Reijenstein y C.J. Lipinsky, 2014, *Vaca Muerta Stratigraphy in Central Neuquén Basin: Impact on emergent unconventional project*. Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, Estados Unidos.
7. Fantín, M. y R. González, 2014, Primeros Pasos en la Evaluación de Vaca Muerta como Reservorio No-Convencional en el Bloque El Trapial. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. IAPG. Mendoza, Argentina.
8. Groeber, P., 1946, Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. Hoja Chos Malal, Revista de la Asociación Geológica Argentina 1, 178–208.
9. Groeber, P., P.N. Stipanovic y A. Mingramm, 1953, Geografía de la República Argentina. Sociedad Argentina de Estudios Geográficos GAEA 2.
10. Gulisano, C., R. Gutierrez Pleimling y R.E. Digregorio, 1984, Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano-Valanginiano (Formaciones Vaca Muerta, Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la provincia del Neuquén. 9º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 221-235, Bariloche.
11. Howell, J. A., E. Schwarz, L. A. Spalletti y G.D. Veiga, 2005, *The Neuquén Basin: an overview*, en Veiga, G. D., Spalletti, L. A., Howell, J. A., y Schwarz, E., eds., *The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*, Geological Society of London, London, Special Publications, v. 252, p. 1-14.
12. Kietzmann, D.A. 2013a, Estudio Estratigráfico secuencial de la Formación Vaca Muerta en el yacimiento El Trapial. Informe inédito.
13. Kietzmann, D.A. 2013b, Estudio bioestratigráfico integrado basado en calciesferas y calpionéllidos, Formación Vaca Muerta, Pozos ETxp-2001, ETxp-2002, ETxp-2003 y ETxp-2006. Informe inédito.
14. Kietzmann, D.A. y R.M. Palma, 2009, "Microcrinoideos sacocómidos en el Tithoniano de la Cuenca Neuquina. ¿Una presencia inesperada fuera de la región del Tethys?" *Ameghiniana* 46, 695–700.
15. Kietzmann, D.A. y R.M. Palma, 2011, "Las tempestitas peloidales de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Valanginiano) en el sector surmendocino de la Cuenca Neuquina, Argentina". *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 18(2): 121-149.
16. Kietzmann, D.A., R.M. Palma, A.C. Riccardi, J. Martín-Chivelet y J. López-Gómez, 2014a, *Sedimentology and sequence stratigraphy of a Tithonian - Valanginian carbonate ramp (Vaca Muerta Formation): A misunderstood exceptional source rock in the Southern Mendoza area of the Neuquén Basin, Argentina*. *Sedimentary Geology* 302: 64-86.
17. Kietzmann, D.A., A.L. Ambrosio, J. Suriano, M.S. Alonso, V.V. Vennari, M.B. Aguirre-Urreta, G. Depine y D. Repol, 2014b, Análisis sedimentológico y estratigráfico secuencial de las Formaciones Vaca Muerta y Quintuco en el área de Chos Malal, Cuenca Neuquina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza.
18. Lakova, I., K. Stoykova y D. Ivanova, 1999, *Calpionellid, nannofossil and calcareous dinocyst bioevents and integrated biochronology of the Tithonian to Valanginian in the Western Balkanides, Bulgaria*. *Geologica Carpathica* 50: 151-158.
19. Leanza, H.A., 1973, "Estudio sobre los cambios faciales de los estratos limítrofes Jurásico-Cretácicos entre Loncopué y Picun Leufú, Provincia del Neuquén, República Argentina". *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 28, 97–132.
20. Leanza, H.A., H.G. Marchese y J.C. Riggi, 1977, Estratigrafía del Grupo Mendoza con especial referencia a la Formación Vaca Muerta entre los Paralelos 35º y 40º l.s. Cuenca Neuquina-Mendocina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 32, 190–208.
21. Leanza, H. A., F. Sattler, R. Martinez y O. Carbone, 2011, "La Formación Vaca Muerta y Equivalentes (Jurásico Tardío – Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina". En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Daniela, J.C., Vallés, J.M. (Eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*, Neuquén, 113–129.
22. Legarreta, L. y C.A. Gulisano, 1989, "Análisis estratigráfico de la Cuenca Neuquina (Triásico Superior-Terciario Inferior)". En Chebli, G.A. y Spalletti, L.A. (eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas*. Simposio Cuencas Sedimentarias Argentinas, Serie Correlación Geológica 6: 221-243, Tucumán.
23. Marlats, A., L. Tórtora y M.L. Rodríguez Schelotto, 2014, *Sedimentologic Study of the Vaca Muerta Formation in The El Trapial field*. Informe inédito.
24. Mitchum, R.M. y M. Uliana, 1985, *Seismic stratigraphy of carbonate depositional sequences, Upper Jurassic-Lower Cretaceous, Neuquén Basin, Argentina*. En Berg, B.R. y Woolverton, D.G. (eds.) *Seismic Stratigraphy 2. An integrated approach to hydrocarbon analysis*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 39: 255-83, Tulsa.
25. Rodríguez, N., P.R. Cobbold, H. Løseth y G.Ruffet, 2009, *Widespread bedding-parallel veins of fibrous calcite ("beef") in a mature source rock (Vaca Muerta Fm, Neuquén Basin, Argentina): evidence for overpressure and horizontal compression*. *Journal Geological Society*, London, 166 (4), 695-709, doi 10.1144/0016-76492008-111.
26. Sales, T., A. Giusiano, N. Gutiérrez Schimdt, J. Alonso y O. Muñoz, 2014, Análisis estratigráfico secuencial para la evaluación de reservorios tipo *shale* de la Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina, Argentina. En: Actas del XIX Congreso Geológico Argentino (Eds. Martino, Lira, Guerreschi, Baldo, Franzese, Krohling, Manassero, Ortega, Pinotti.), p. 623-624. Córdoba, Argentina.
27. Weaver, C., 1931, *Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina*. Memoir University of Washington 1, 469 p., Seattle.