

SEDIMENTOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA SECUENCIAL DE ALTA RESOLUCIÓN DE RESERVORIOS NO CONVENCIONALES DE ORIGEN DELTAICO DEL MIEMBRO PILMATUÉ (FORMACIÓN AGRIO, CUENCA NEUQUINA)

Ernesto Schwarz¹, Carlos A. Echevarria², Gonzalo D. Veiga¹

1: CIG (CONICET-UNLP), eschwarz@cig.museo.unlp.edu.ar, veiga@cig.museo.unlp.edu.ar

2: Pampa Energía S.A., carlosechevarria@pampaenergia.com

Palabras clave: Reservorios No Convencionales, Sistemas Deltaicos, Estratigrafía Secuencial de Alta Resolución, Yacimiento El Mangrullo, Miembro Pilmatué

ABSTRACT

Sedimentology and High-resolution Sequence Stratigraphy of Unconventional Deltaic Reservoirs of the Pilmatué Mb. (Agrío Fm., Neuquén Basin)

This contribution presents a facies, depositional and sequence-stratigraphic analysis of the upper half of the Pilmatué Member (Agrío Fm., Valanginian-Hauterivian) in the Mangrullo Field, located in central Neuquén Province, Argentina, in order to characterize siliciclastic unconventional (tight) reservoirs. For this study, 300 m of cores from four wells were described, subsequently integrated with their petrographic and petrophysic data, as well as with well-log suites from 17 wells. Twelve facies associations (FAs) were identified and interpreted in the unit that represents mainly delta plain, proximal delta-front and distal delta-front-prodelta settings of fluvio-dominated deltas, but also wave-influenced deposits of proximal delta-front to distal delta front-offshore were recognized. Vertical and lateral transitions of facies associations allowed for the identification of five depositional sequences (S-08, S-09, S-10, S-11, S-12) representing progradation of the entire deltaic system, which are bounded by regionally extensive transgressive surfaces. Internally, these sequences are composed of high-frequency sequences in which progradation distance and orientation, as well as facies belts can be quantitatively defined. Transgressive surfaces bounding both type of sequences are most commonly associated with thin, carbonate-rich intervals that are good correlation markers. Since 2015 the gas-bearing tight reservoirs of the Pilmatué Member are on production. The results of this study allowed for a detailed characterization of different sandstone-type reservoirs within a refined depositional and sequence-stratigraphic framework that helps defining better development strategies for the field.

INTRODUCCIÓN

El Miembro Inferior o Pilmatué de la Formación Agrío (Weaver 1931) constituye una potente sucesión de sedimentitas marinas con un amplio desarrollo areal dentro de la Cuenca Neuquina (Spalletti *et al.*, 2001). Esta unidad cretácica inferior ha sido estudiada en afloramientos de la Faja Plegada y Corrida del Agrío, particularmente desde Picún Leufú hasta la zona del río Agrío (Legarreta y Uliana 1991; Lazo 2007; Lazo *et al.*, 2009). En esta última región la unidad posee hasta

unos 650 m de potencia y está ampliamente dominada por fangolitas depositadas en ambientes de offshore (Lazo 2007; Schwarz y Veiga 2018).

Las características faciales, paleoambientales y secuenciales del Miembro Pilmatué al este de la Faja Plegada y Corrida son mucho menos conocidas debido a la relativa escasez de información de testigos de corona en el subsuelo en el Engolfamiento Neuquino. Hacia el extremo oriental de la cuenca, el registro equivalente estaría conformado por sucesiones continentales fluviales que corresponderían a la porción inferior de la Formación Centenario (Digregorio 1972). Sin embargo, las características de la transición entre las sedimentitas marinas distales de los afloramientos y los depósitos fluviales del margen oriental están lejos de haber sido comprendidas. En particular, no existe una descripción de detalle de los sistemas de transición entre ambos tipos de sucesiones, como sí existen para otras unidades silicoclásticas del Cretácico Temprano de la cuenca (e.g., Liberman *et al.*, 2014; Olivo *et al.*, 2016). Por su parte, recientes estudios sedimentológicos de detalle en otros sectores de afloramientos, permiten apreciar que el Miembro Pilmatué posee una alta variabilidad facial vertical y espacial (Veiga y Schwarz 2017; Schwarz *et al.*, 2018), lo cual sugiere el desarrollo de distintos tipos de sistemas de acumulación y configuraciones paleogeográficas para el intervalo Valanginiano-Hauteriviano de la Cuenca Neuquina.

En el Yacimiento El Mangrullo, ubicado en el sector occidental del Engolfamiento Neuquino (Fig. 1), la empresa Pampa Energía S.A. posee actualmente un desarrollo de gas tipo tight dentro de niveles del Miembro Pilmatué. La extracción de unos 300 m de testigos de coronas permitió reconocer un registro sedimentario ampliamente dominado por areniscas, acumuladas en sistemas transicionales. Este registro provee entonces la oportunidad de describir e interpretar en detalle los depósitos presentes, con el fin de caracterizar de manera más acabada los sistemas de acumulación y así lograr una mejor caracterización de los reservorios presentes.

De esta manera, los objetivos planteados en este trabajo sobre las sedimentitas del Miembro Pilmatué son: a) presentar un análisis de facies sobre testigos corona de la unidad para definir la influencia de diferentes procesos de transporte y acumulación; así como establecer las sucesiones verticales presentes a diferentes escalas; b) definir sistemas de acumulación que caracterizan a la unidad y su variabilidad vertical y lateral; c) reconocer superficies estratigráficas clave que permitan delimitar paquetes genéticamente relacionados y construir un esquema secuencial para el yacimiento; y d) vincular los modelos paleoambientales y secuenciales propuestos con la posible geometría, distribución y extensión de potenciales niveles reservorio para contribuir a generar modelados de reservorios más robustos.

El presente trabajo forma parte de un estudio de mayor envergadura llevado a cabo en conjunto con el Centro de Investigaciones Geológicas (UNLP-CONICET) durante los años 2014-2015, cuyos resultados se presentaron como informe interno de la actual empresa Pampa Energía S.A. (Schwarz y Veiga. 2015).

MARCO GEOLÓGICO Y ESTRATIGRÁFICO

La Cuenca Neuquina es considerada una cuenca de retroarco, desarrollada en el centro-oeste de la Argentina, cuyo relleno pertenece principalmente al lapso Jurásico-Cretácico (Howell *et al.*, 2005). Está limitada al oeste por el cordón andino y al este por el Bloque de la Sierra Pintada (noreste) y el Macizo Nordpatagónico (sureste, Fig. 1A). La Cuenca Neuquina se ha desarrollado como un depocentro sedimentario desde el Triásico superior al Paleoceno (Howell *et al.*, 2005).

El Miembro Pilmatué es una unidad muy conspicua del relleno mesozoico de la Cuenca Neuquina y es el intervalo estratigráfico inferior de los tres miembros constitutivos de la Formación Agrio (Fig. 1B). En la zona de afloramientos de la Faja Plegada y Corrida del Agrio el Miembro Pilmatué se compone esencialmente por potentes sucesiones marinas de grano fino (Spalletti *et al.* 2011). Su base está marcada por una superficie transgresiva que representa una súbita profundización con respecto a los depósitos marino-marginales y marinos someros que caracterizan al tope de la Formación Mulichinco en extensas áreas de la cuenca (Schwarz *et al.*, 2011). Por su parte, el límite superior de la unidad es una discordancia erosiva sobre la que se disponen los depósitos continentales del Miembro Avilé de la Formación Agrio (Fig. 1B). La edad de esta unidad es Valanginiano Tardío a Hauteriviano Temprano (Lazo *et al.*, 2009).

A gran escala, esta unidad fue caracterizada como formada por 3 a 4 sucesiones somerizantes de largo término, a partir de estudios que comprenden desde el sur de la Dorsal de Huincul hasta el sector central de la provincia del Neuquén (e.g., Legarreta y Gulisano 1989; Legarreta y Uliana 1991). Más recientemente, Schwarz *et al.*, (2018) describieron con mayor detalle la sucesión de esta unidad en el sector norte de Neuquén y definieron una serie de sucesiones progradantes que incluyen depósitos arenosos acumulados en ambientes relativamente someros, con dominio de procesos relacionados con olas de buen tiempo y tormentas, y alejados de descargas fluviales importantes. Por su parte Veiga y Schwarz (2017) analizaron un conjunto arenoso-bioclástico ubicado cerca de la base de la unidad y reconocieron procesos asociados a corrientes unidireccionales mareales. Estos recientes trabajos muestran la variabilidad de procesos y sistemas de acumulación que pueden estar registrados en esta unidad, que difícilmente pueden ser captados por mapas paleogeográficos que abarcan una gran escala temporal.

YACIMIENTO EL MANGRULLO

El Yacimiento El Mangrullo se encuentra en el sector central de la Cuenca Neuquina, unos 50 km al norte de la localidad de Cutral Co. Su ubicación coincide con el límite sur del Dorso de los Chihuidos, región donde las rocas generadoras clásicas (Los Molles y Vaca Muerta) están en ventana de generación de gas (Echevarria y Canosa 2017). Este yacimiento fue descubierto por YPF en el año 1973 con un pozo de gas en la Formación Tordillo, aunque recién a partir del 2000

comenzó su fase de desarrollo en niveles eólicos y fluviales de la Formación Mulichinco. Durante una reevaluación del potencial gasífero a lo largo del resto de la columna estratigráfica se identificó y se propuso explorar las posibilidades del Miembro Pilmatué (Echevarria 2013).

En 2013, con el pozo M.x-1015 se descubre gas seco dentro de esta unidad lográndose una producción de 250 Mm³/d, con una acumulada al presente de más de 200 MMm³ (Echevarria y Canosa 2017). En la actualidad la unidad se encuentra en pleno desarrollo con 10 pozos en producción. Según Echevarria y Canosa (2017) el entrapamiento podría ser combinado (estratigráfico, estructural, diagenético?), con una fase de remigración tardía pendiente arriba.

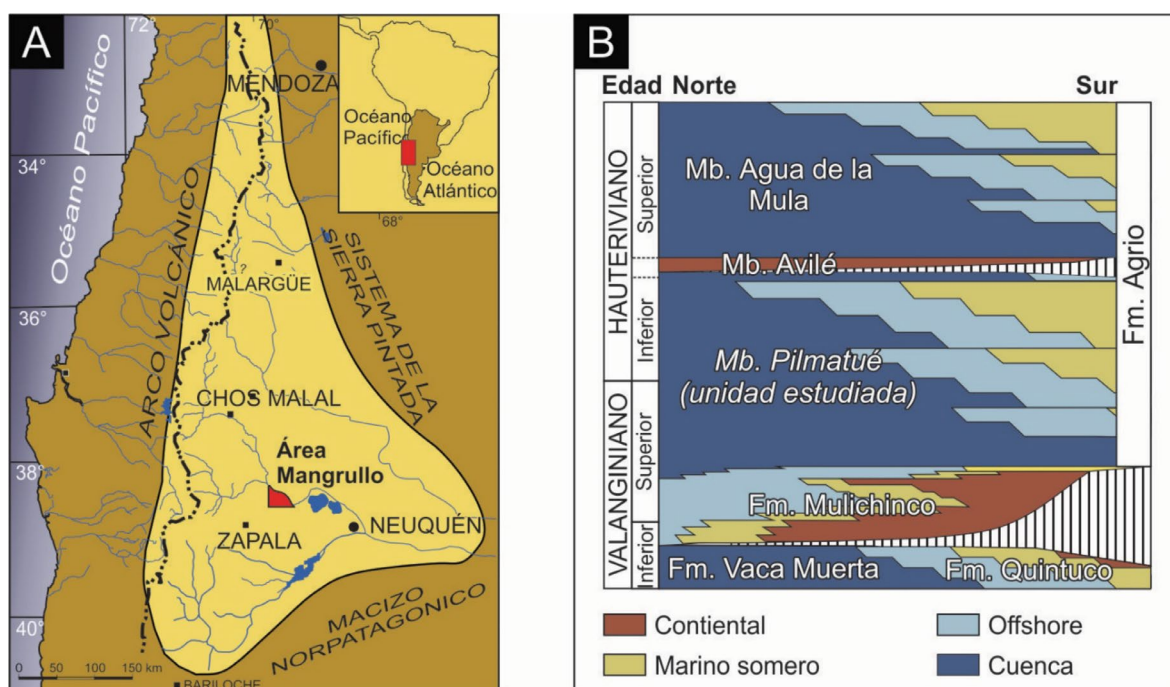


Figura 1. A) Mapa de ubicación. B) Cuadro cronoestratigráfico para el intervalo Valanginiano-Hauteriviano de afloramiento (ambas figuras modificadas de Veiga y Schwarz, 2017).

En el yacimiento, el Miembro Pilmatué de la Formación Agrio posee un límite neto sobre depósitos estuarinos del tope de la Formación Mulichinco (Olivo 2016) y un desarrollo vertical de unos 450 m de espesor (Fig. 3). El tramo basal de la unidad (unos 60 m de potencia), estaría conformado mayoritariamente por facies mixtas carbonáticas-silicoclásticas. El resto de la sucesión está compuesta por depósitos silicoclásticos entre los que dominan potentes paquetes de areniscas finas, intercalados con fangolitas subordinadas. Previamente a la adquisición de testigos de corona dentro de esta unidad, se habían definido 6 secuencias depositacionales (Echevarria y Canosa 2017, Fig. 3).

La base del Miembro Agua de la Mula es claramente identificable en perfiles eléctricos y sísmicamente dentro del yacimiento, ya que comienza con un paquete potente de fangolitas oscuras

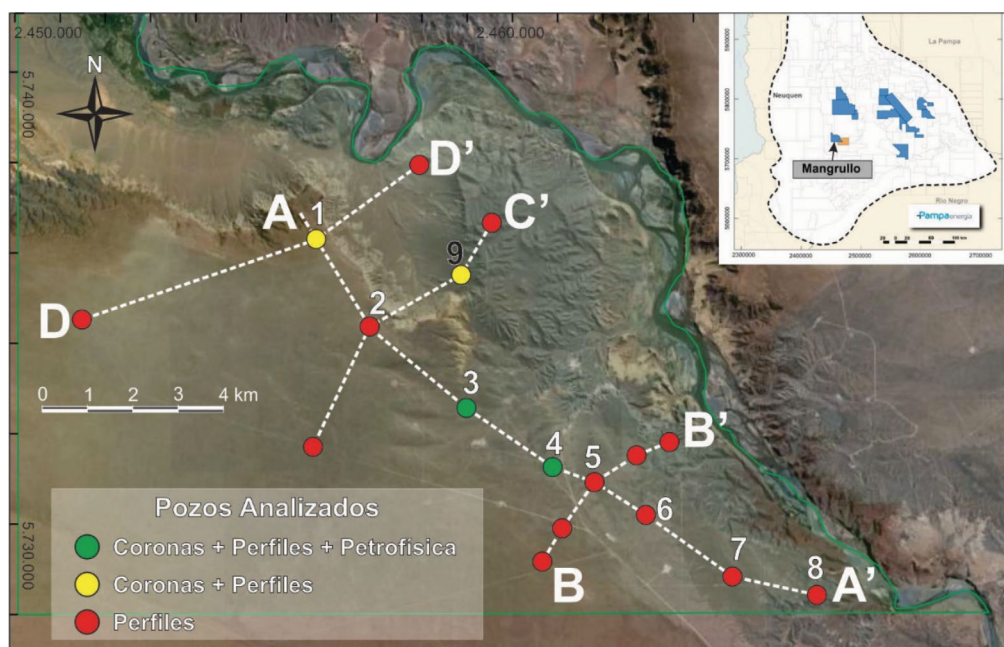


Figura 2. Mapa de detalle del área de estudio con la ubicación de los pozos utilizados en este trabajo y tipos de datos analizados para cada uno. A-A', B-B' etc. representan las trazas de las transectas de correlación construidas a partir de la integración de información analizada.

(Fig. 3). Este intervalo representa una súbita transgresión marina por arriba de depósitos arenosos previos. La corona del pozo 9, que atraviesa, este intervalo permite identificar un paquete de 5 m de potencia compuesto por areniscas medianas a gruesas entrecruzadas que se interpretan como facies continentales, y se asignan al Miembro Avilé de la Formación Agrio (Fig. 3). El paquete pelítico suprayacente funcionaría como sello regional para los reservorios del Miembro Pilmatué.

SETS DE DATOS Y METODOLOGÍA

El intervalo de estudio de este trabajo abarca los 200 m superiores de la unidad y comprende las secuencias S08, S10 y S12 (Fig. 3). Para la realización de este trabajo se contó con 310 m de testigos corona, provenientes de cuatro sondeos que se ubican aproximadamente en una transecta de unos 6 km de extensión en sentido SE-NO (Figs. 2, 3). Como complemento, se analizaron más de 450 datos de porosidad y permeabilidad de dos testigos corona, así como informes petrográficos de secciones delgadas. Asimismo, se contó con información de perfiles de pozo de 17 sondeos distribuidos en toda el área de interés (Fig. 2).

La primera etapa de este trabajo consistió en la descripción detallada (escala 1:10) de los testigos corona del Miembro Pilmatué. Luego se definieron facies y asociaciones de facies para el intervalo estudiado, y sobre la base de ellas, y sus relaciones verticales, se interpretaron los sistemas de acumulación. Posteriormente se extrapoló la información a pozos sin testigos de corona y se construyeron 4 transectas de correlación (Fig. 2). A partir de esta tarea, se pudo completar la

distribución de ambientes y subambientes de acumulación tanto espacial como verticalmente. Esto permitió reconocer superficies clave de distinta jerarquía y definir secuencias que conforman el esquema de evolución estratigráfica secuencial que se presenta en este trabajo. Sobre esta base, fue posible establecer la distribución, extensión y posición estratigráfica de las principales facies reservorio, generando de esta forma un modelo geológico más robusto para esta área de explotación.

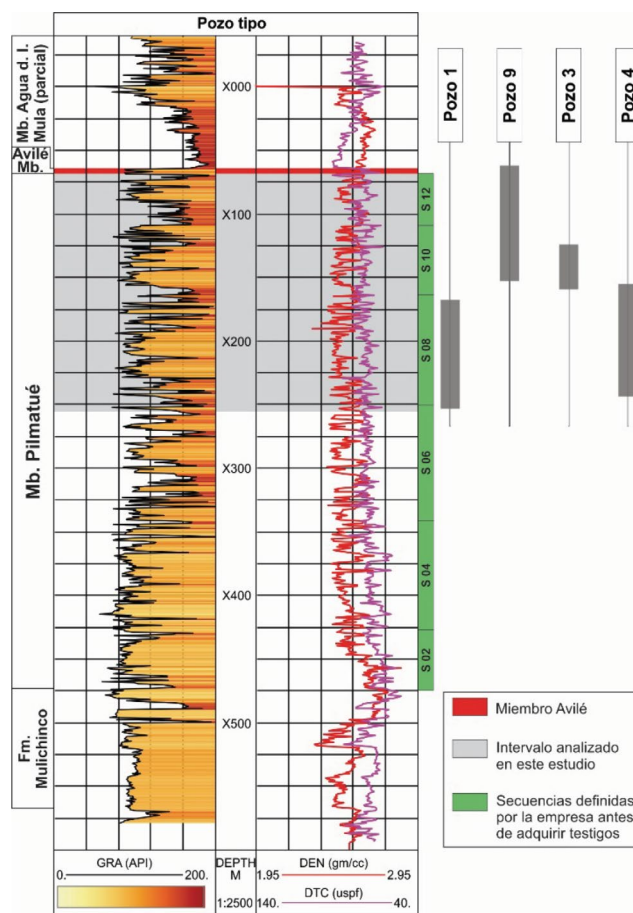
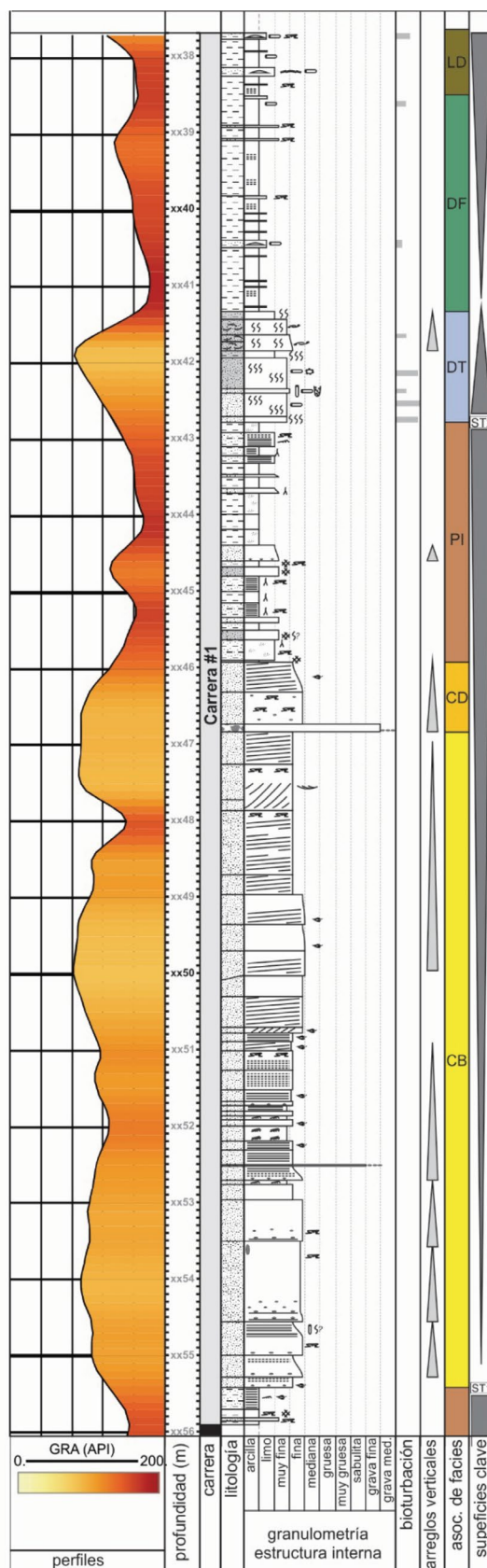
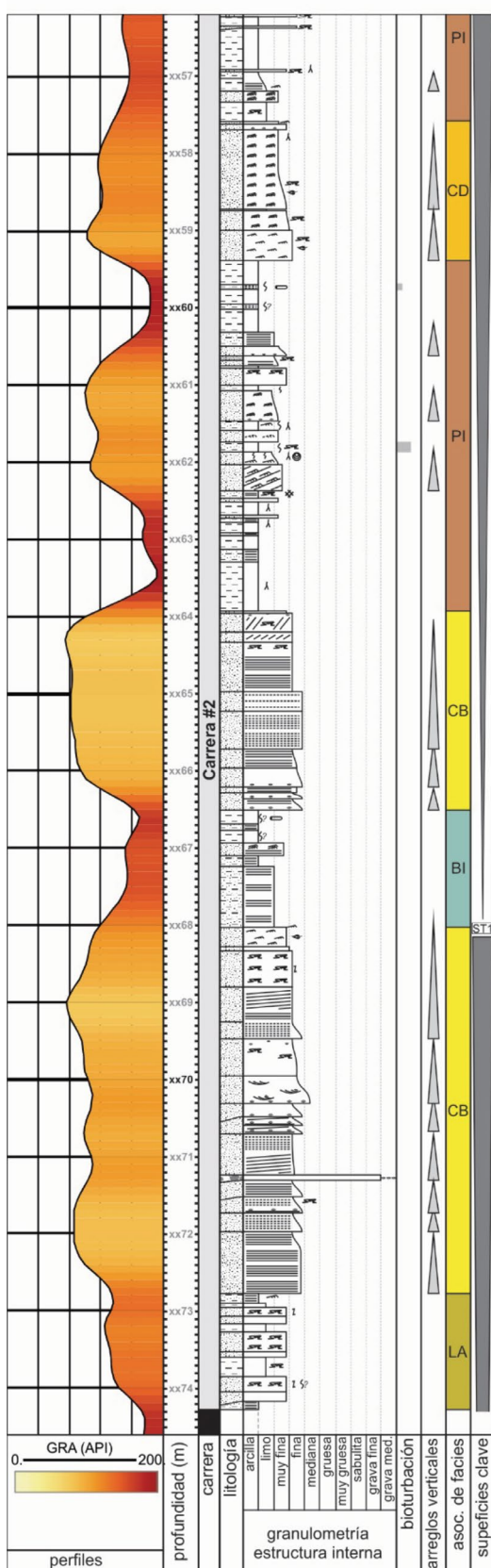


Figura 3. Registro de perfiles eléctricos y estratigrafía del intervalo Mulichinco-Agrio en el yacimiento El Mangrullo. Se indica la posición estratigráfica de los testigos de corona de los cuatros sondeos analizados.

ASOCIACIONES DE FACIES Y SISTEMAS DE ACUMULACIÓN

Se reconocieron 12 asociaciones de facies para el intervalo considerado del Mb. Pilmatué, las cuales estarían vinculadas casi en su totalidad al desarrollo de sistemas deltaicos (Tabla 1, Figs. 4-6). Dos asociaciones reflejan depositación en una planicie deltaica y cinco asociaciones representan un ambiente de frente deltaico con dominio de acción fluvial, desde condiciones proximales de barras de desembocadura hasta condiciones de frente deltaico distal y prodelta. En forma



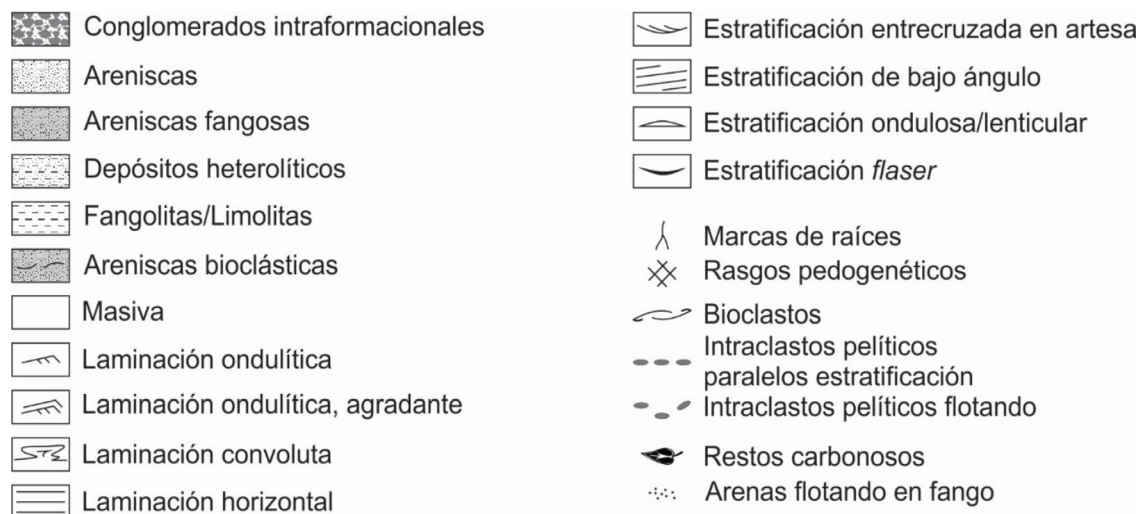


Figura 4. Página anterior: perfil columnar de testigo de Pozo 3 con facies, asociaciones de facies, tendencias verticales y superficies clave. Nótese la buena correlación entre las litofacies y la respuesta de rayos gamma. Esta página: referencias de los símbolos utilizados en el perfil columnar.

adicional, se reconocen cuatro asociaciones equivalentes al ambiente de frente deltaico anterior, pero que se habrían acumulado bajo condiciones de incremento de actividad de olas versus los procesos de descarga fluvial, es decir que representarían un frente deltaico con influencia de olas hasta su transición a condiciones de offshore (Fig. 6). Finalmente, se reconoció una asociación que se vincula con periodos transgresivos de diferente jerarquía dentro de la evolución deltaica.

Planicie Deltaica (CD, PI)

El ambiente de Planicie Deltaica está representado por las intercalaciones de paquetes gruesos granodecrecientes alojados entre depósitos finos abundantes (Fig. 4). La asociación de Canales Distributarios (CD) comprende mayormente conglomerados intraformacionales entrecruzados y areniscas muy finas a finas con laminación de bajo ángulo, en sucesiones granocrecientes con bases erosivas (Figs. 4,5). Las areniscas también pueden mostrar estratificación entrecruzada en artesa o deformación sinsedimentaria. El material carbonoso es abundante y la bioturbación nula a leve (Tabla 1). En la asociación de Planicies Interdistributarias (PI) dominan fangolitas y limolitas rojizas a verdosas con rasgos pedogenéticos (nódulos y slickensides), con subordinadas intervalos heterolíticos fangosos y arenosos laminados, y areniscas con óndulas de corrientes escalantes (Fig. 5). Son comunes las marcas de raíces y disturbación postdeposicional (Tabla 1) y también se distinguen granos de arena diseminados entre los fangos dominantes, a veces formando lentes irregulares (Fig. 5).

Interpretación. Los depósitos gruesos (CD) se interpretan como el relleno de los canales distributarios principales dentro de la planicie deltaica (Fig. 6). La sedimentación de arenas se

producía mayormente en condiciones de lecho plano, y en menor medida en fase de dunas tridimensionales. Los depósitos de fangolitas y limolitas (PI) representan la sedimentación fina de baja energía entre los canales distributarios. Estos sedimentos sufrían procesos pedogenéticos y colonización por organismos (vegetales y animales) cuando quedaban lejos del influjo de crecidas fluviales. Durante desbordamientos excepcionales o en regiones más cercanas a los canales, se registraban corrientes acuosas unidireccionales con migración y agradación de óndulas.

Frente Deltaico Proximal (CB, LA, BI)

Este sector del sistema deltaico está representado por las asociaciones de Complejos de Barras de Desembocadura (CB), Lóbulos Arenosos (LA) y Bahías Interdistributarias (BI). La asociación CB se caracteriza por la amalgamación de capas gradadas de areniscas finas masivas, con laminación horizontal a bajo ángulo o intensamente deformadas, donde abundan estructuras en plato, laminación convoluta y chimeneas de escape de fluidos (Figs. 4, 5). En menor medida se registran capas de areniscas entrecruzadas y conglomerados intraformacionales cuyas bases son erosivas. La asociación Lóbulos Arenosos se encuentra conformada por capas de areniscas muy finas con laminación horizontal o estratificación entrecruzada monticular (tipo hummocky), entre las cuales intercalan niveles heterolíticos arenosos subordinados (Figs. 4, 5). Aquí la deformación sinsedimentaria es moderada a localmente intensa, generalmente de pequeña escala (estructura en platos). En estas dos asociaciones los restos carbonosos son frecuentes y la bioturbación es leve (Tabla 1), dominada por Ophiomorpha y Skolithos. La asociación Bahías Interdistributarias es poco frecuente y se encuentra compuesta por fangolitas laminadas gris oscuro y paquetes heterolíticos fangosos o arenosos, con estructuras laminadas o lentiformes (Fig. 5, Tabla 1). Las limolitas y areniscas muy finas en los intervalos heterolíticos pueden ser gradadas o portar laminación entrecruzada por óndulas de olas o corriente. La intensidad de bioturbación es nula a leve, y dominan Teichichnus y Planolites.

Interpretación. La asociación CB se interpreta como el producto de complejos barras de desembocadura formando complejos arenosos con fuerte amalgamación lateral y vertical, en la transición entre las planicies y los frentes deltaicos (Fig. 6). Los flujos eran mayormente densos y producían acumulación por decantación desde una suspensión o por tracción en régimen de lecho plano (símil divisiones Ta-Tb de Bouma). La capacidad de erosión inicial de algunos flujos podría estar vinculada al grado de confinamiento y la posición en la transición entre los canales y las áreas menos confinadas. La asociación LA refleja las regiones más externas de las barras de desembocadura, tanto lateralmente como en sentido distal, en donde aún dominaba la sedimentación de arenas durante periodos de importante descarga fluvial, así como decantación de fangos en otros intervalos de tiempo. Allí la sedimentación arenosa se relacionaba mayormente con corrientes de turbidez de variable densidad, aunque existían procesos de retrabajo por flujos

Asociación de facies	Litología	Estructuras de depositación y deformación	Estructuras biogénicas	Interpretación
<i>Canales distributarios (CD)</i>	Conglomerados de intraclastos pelíticos y areniscas finas	Laminación paralela y de bajo ángulo dominante, subordinada en artesa. Deformación frecuente	Bioturbación leve o ausente, material carbonoso escaso	Relleno de canales distributarios
<i>Planicies Interdistributarias (PI)</i>	Fangolitas y limolitas finas, intervalos heterolíticos fangosos laminados y areniscas subordinados	Moteados, estructuras <i>blocky</i> , <i>slickensides</i> y arenas dispersas en fangos. Laminación de corriente y óndulas escalantes en areniscas	Bioturbación leve o ausente, tubos meniscados, marcas de raíces, material carbonoso escaso.	Sedimentación por desbordamiento en planicies deltaicas, desarrollo de incipiente de suelos
<i>Complejos de Barras de Desembocadura (CB)</i>	Areniscas finas a muy finas, subordinados conglomerados de intraclastos	Gradación normal, laminación paralela y de bajo ángulo. Deformación intensa y muy frecuente	Bioturbación leve o ausente, material carbonoso común	Barras subáneas asociadas a descarga fluvial, formando complejos en frente deltaico proximal.
<i>Lóbulos arenosos (LA)</i>	Areniscas muy finas en capas 0.20 - 0.80 cm y heterolíticos arenosos subordinados	Laminación paralela y entrecruzada de óndulas de corriente, laminación monticular subordinada. Deformación frecuente	Bioturbación leve o ausente, localmente intensa, material carbonoso común	Flujos gravitatorios de sedimentos no confinados en los sectores externos de frente deltaico proximal
<i>Bahías Interdistributarias (BI)</i>	Dominan fangolitas oscuras y heterolíticos fangosos, arenosos subordinados	Laminación paralela en fangos, gradación normal en limos, laminación entrecruzada de corriente u ola en arenas. Deformación poco frecuente	Bioturbación leve o ausente, material carbonoso poco común	Decantación desde suspensión en aguas salobres de zonas entre lóbulos; retrabajo por olas
<i>Lóbulos Distales (DL)</i>	Intervalos heterolíticos arenosos, capas de areniscas subordinadas (< 0.30 m)	Masiva en fangos, laminación paralela u entrecruzada de corriente en arenas, subordinada laminación entrecruzada monticular. Deformación frecuente	Bioturbación moderada a intensa en heterolíticos, menor en capas de arenas	Flujos gravitatorios de sedimentos diluidos alternando con decantación en frente deltaico proximal, acción subordinada de flujos combinados
<i>Depósitos Finos de Prodelta (DF)</i>	Fangolitas, con intervalos heterolíticos fangosos subordinados	Laminación paralela o masiva en fangos y limos. Deformación frecuente. Paquetes rotados	Bioturbación leve o ausente en fangos, variable en heterolíticos	Decantación de fangos e infrecuente depositación a partir de flujos diluidos unidireccionales en prodelta
<i>Complejos de Barras de Desembocadura con influencia de olas (CBw)</i>	Areniscas muy finas	Masividad por bioturbación, relictos de estratificación entrecruzada monticular y laminación paralela	Bioturbación intensa a total	Acumulación relacionada con olas de tormentas y buen tiempo, sumado a extensa modificación biogénica en frente deltaico proximal
<i>Lóbulos arenosos con influencia de olas (LAW)</i>	Areniscas fangosas e intervalos heterolíticos arenosos lentiformes	Masividad por bioturbación, relictos de laminación entrecruzada de óndulas de olas y monticular	Bioturbación intensa a total en areniscas fangosas, moderada en heterolíticos; bioclastos y material carbonoso poco común	Acumulación relacionada con olas de tormentas y buen tiempo, sumado a extensa modificación biogénica en porciones intermedias de frente deltaico
<i>Lóbulos distales con influencia de olas (LDw)</i>	Limolitas y limolitas fangosas, intervalos heterolíticos fangosos y areniscas subordinados.	Laminación paralela o masiva en fangos, óndulas de ola en limolitas y areniscas. Deformación poco frecuente.	Bioturbación intensa a total en limolitas fangosas, moderada en heterolíticos	Decantación de fangos e infrecuente depositación a partir de flujos relacionados con relación de tormentas en sectores distales de frente deltaico
<i>Depósitos de Offshore (DO)</i>	Fangolitas negras a gris oscuras, limolitas subordinadas	Masiva	Bioturbación difícil de cuantificar; bioclastos de bivalvos frecuentes	Decantación de fangos en sustratos bien oxigenados de offshore
<i>Depósitos Transgresivos (DT)</i>	Areniscas muy finas y areniscas fangosas esqueléticas, fangolitas arenosas subordinadas	Moteado por bioturbación	Bioturbación intensa a total; bioclastos de bivalvos frecuentes con variable fragmentación	Baja tasa de sedimentación en sustratos marinos bien oxigenados durante fenómenos de transgresión

Tabla 1. Descripción e interpretación de las asociaciones de facies reconocidas en el Mb. Pilmatué.

unidireccionales combinados con componente oscilatoria. En conjunto estos procesos generaban cuerpos discontinuos, posiblemente con forma lobulada en planta. La intensa deformación en todos los sectores del frente deltaico se relacionaría con altas tasas de sedimentación y pendientes inestables. Por su parte, se infiere que la asociación BI representaría acumulación subácuea de baja energía, lateralmente a las zonas de transición entre los canales distributarios y los complejos de barras de desembocadura (Fig. 6). Allí predominaba la decantación a partir de plumas hipopícnicas.

Frente Deltaico Distal - Prodelta (LD, DF)

Este sector del sistema deltaico con predominio de la descarga fluvial se encuentra representado por las asociaciones de Lóbulos Distales (LD) y Depósitos Finos de Prodelta (DF). En la asociación LD alternan paquetes heterolíticos arenosos y fangosos lentiformes, con intercalaciones subordinadas de areniscas con laminación horizontal o monticular (HCS) y topes ondulosos (Fig. 5). La bioturbación es moderada a intensa en los paquetes heterolíticos y leve en las areniscas (Tabla 1). En el primer caso la icnofábrica más común se asocia a una suite residente (con dominio de *Phycosiphon*, *Planolites*, *Palaeophycus*, *Teichichnus* y *Thalassinoides*), en tanto en las areniscas se reconoce una asociación icnológica de oportunistas (*Ophiomorpha*, *Skolithos*, *Asterosoma* y *Teichichnus*). En la asociación DF dominan las fangolitas laminadas o masivas, con participación minoritaria de niveles heterolíticos fangosos (Figs. 4, 5). La bioturbación es leve en las primeras y algo más intensa en los segundos (Tabla 1). Raramente se reconocen fragmentos esqueléticos de bivalvos y es común la laminación convoluta así, como paquetes de fangolitas anómalamente inclinados.

Interpretación. La asociación de facies LD se interpreta como el producto de acumulación en los sectores externos del frente deltaico, es decir en una posición distal y lateral a los lóbulos arenosos (Fig. 6). En estos sectores dominaban los procesos de decantación a partir de suspensiones en fondos con intensa colonización infaunal. De manera recurrente se producían delgadas acumulaciones de limos y arenas, probablemente generadas por las fracciones distales de corrientes de fondo diluidas (unidireccionales o combinadas). Asociado a los eventos arenosos más importantes también se producía una colonización oportunista de corta duración que rápidamente desaparecía al comenzar nuevamente la sedimentación fangosa. Por su parte, la asociación DF refleja un ambiente de prodelta (Fig. 6) donde predominaban procesos de decantación desde suspensiones, sobre sustratos fangosos cuyas condiciones no favorecían la colonización infaunal. Fenómenos de colapso gravitacional podrían haber sido comunes en estos ambientes.

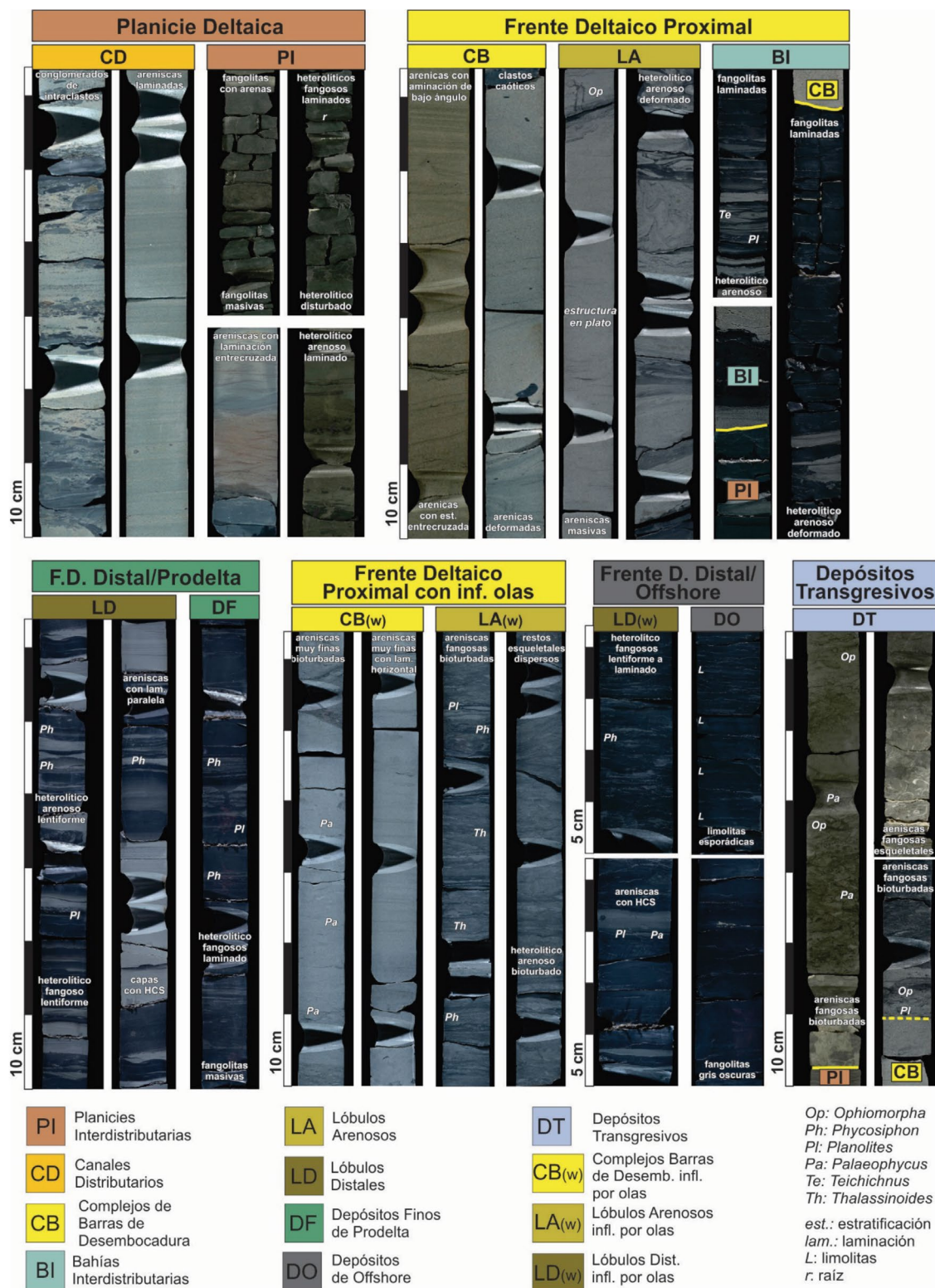


Figura 5. Ilustraciones de testigos de corona mostrando atributos de las asociaciones de facies reconocidas. Sobre los testigos se indican las facies predominantes.

Frente deltaico con influencia de olas - Offshore (CBw, LAw, LDw, DO)

En el intervalo superior del testigo de corona del pozo 9 (Fig. 3) se reconocieron un grupo de depósitos que registran condiciones paleoambientales similares a las inferidas para las asociaciones de facies de frente deltaico con dominio fluvial, pero con una amplio dominio de estructuras que indican procesos asociados mayormente a flujos oscilatorios y a corrientes de relajación de tormentas (Tabla 1, Fig. 5). Estos depósitos intercalan con la asociación CB y las asociaciones de planicie deltaica (PI y CD), por lo que se infiere que perduran las condiciones de ambiente deltaico en este último tramo de la unidad, pero con modificaciones en los procesos dominantes.

La asociación Complejos de Barras de Desembocadura influenciadas por olas (CBw) se compone de areniscas muy finas con intensa bioturbación y esporádica preservación de laminación de bajo ángulo a monticular, con una icnofábrica dominante de *Palaeohphycus* (Fig. 5). La asociación Lóbulos Arenosos influenciados por olas (LAw) comprende areniscas fangosas (i.e., abundante fango diseminado) con intensa bioturbación y una alta diversidad de trazas fósiles, así como niveles heterolíticos arenosos con estratificación ondulosa a flaser, en donde las capas de areniscas son gradadas y poseen estratificación o laminación entrecruzada monticular (Tabla 1, Fig. 5). En LAw son también comunes los fragmentos esqueléticos y se observa un pasaje gradual a los depósitos de CBw.

Interpretación. En conjunto estas dos asociaciones se interpretan como el producto de acumulación en sectores de un frente deltaico proximal con baja influencia de la descarga fluvial (Fig. 6). Aquí el transporte y la sedimentación estarían asociados a corrientes combinadas a oscilatorias, probablemente relacionadas con episodios de relajación de tormentas. Durante los periodos de buen tiempo, condiciones marinas relativamente normales (sin el stress generado por la descarga fluvial) permitiría una extensa colonización infaunal y retrabajo biogénico de los sedimentos. Los depósitos de complejos de barras serían relativamente elongados, en tanto los más distales podrían tener formas más lenticulares.

La asociación Lóbulos Distales influenciados por olas (LDw) se compone mayoritariamente de fangolitas oscuras masivas a laminadas e intervalos heterolíticos fangosos lentiformes (Fig. 5), con esporádicas areniscas muy finas en capas delgadas. En los intervalos heterolíticos la bioturbación es intensa y diversa (Tabla 1). Por su parte, la asociación Depósitos de Offshore (DO) comprende fangolitas negras masivas, con delgadas capas de limolitas gruesas a finas (Fig. 5). Ocasionalmente presenta niveles con concentración de fragmentos esqueléticos, algunos de los cuales muestran baja fragmentación. Es común observar sucesiones verticales granocrecientes que incluyen a las asociaciones DO, LDw y LAw.

Interpretación. La asociación LDw representa sedimentación mayormente por decantación de fangos, con limos que podrían provenir del mismo origen, o bien ser la expresión más distal de flujos asociados a tormentas o fenómenos de re-suspensión. Al igual que en la asociación

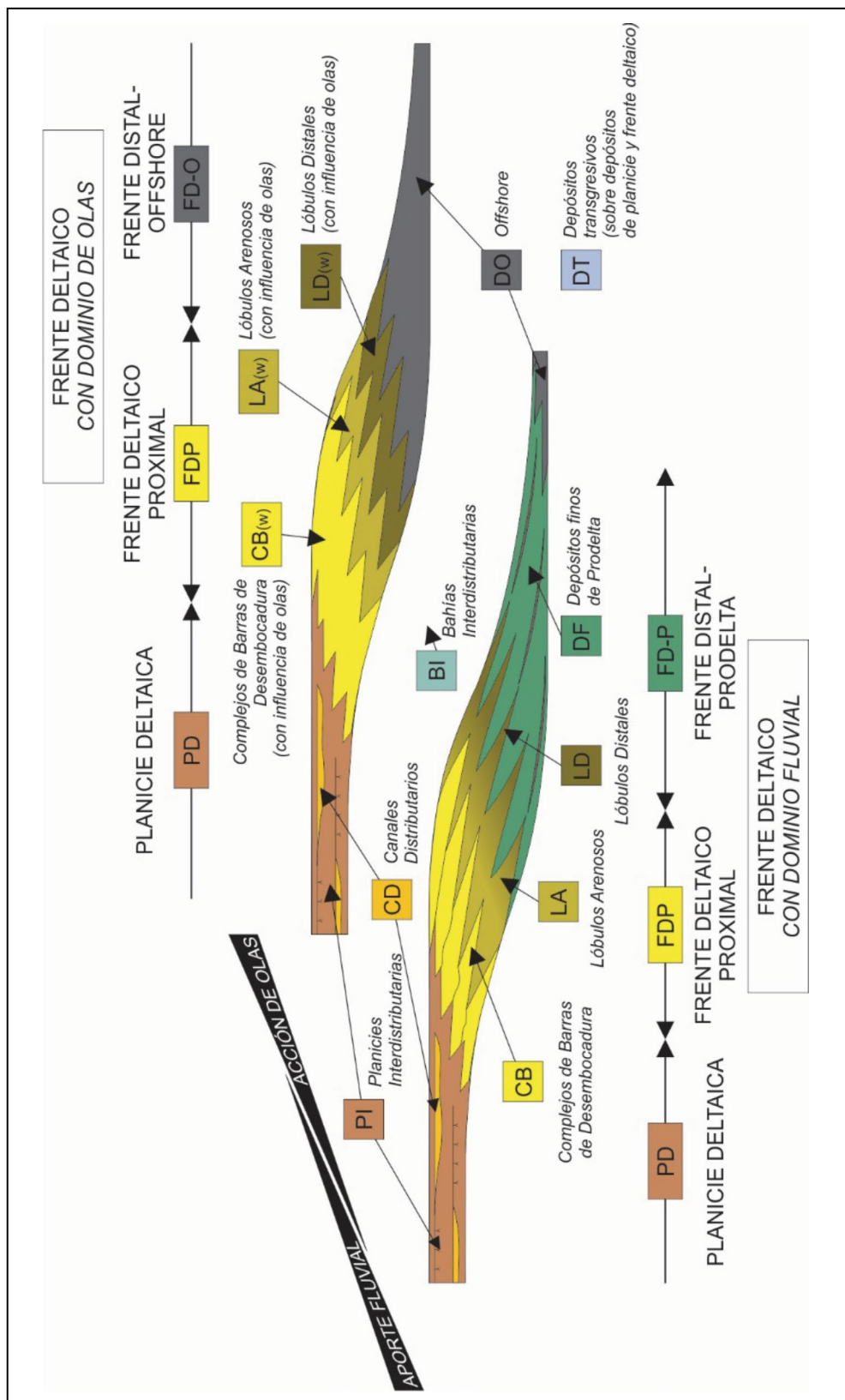


Figura 6. Representación esquemática de los sistemas de acumulación deltaicos interpretados para el intervalo de estudio en el Miembro Pilmatué en el yacimiento El Mangrullo, con la distribución espacial de las asociaciones de facies reconocidas.

LAw la intensa bioturbación sugiere sustratos estables y favorables para una amplia colonización bentónica. Debido a sus características y relaciones verticales se interpreta que la asociación LDw representa las porciones distales del frente deltaico con dominio de olas (Fig. 6). Finalmente, la asociación DO refleja las condiciones de acumulación marinas más distales halladas para el Miembro Pilmatué en el intervalo estudiado. La sedimentación estaría relacionada exclusivamente con procesos de decantación en un ambiente permanente de offshore. Estos ambientes también podrían estar presentes más allá de las condiciones de prodelta de los deltas fluvio-dominados (Fig. 6).

ANÁLISIS SECUENCIAL

Para la definición de las principales unidades genéticas y la interpretación de las superficies limitantes, se realizó primero un análisis de la información vertical (1D) y luego espacial (3D). Los testigos de corona muestran sucesiones somerizantes que involucran distintas asociaciones de facies y de distintas escalas verticales (Figs. 4, 7). Las superficies entre dichos ciclos somerizantes representan profundizaciones relativas del sistema depositacional, por lo que se interpretan como superficies transgresivas. En función de la dislocación vertical de facies a través de estas superficies (profundización), pueden establecerse un orden jerárquico en el análisis vertical. La mínima dislocación estaría dada cuando se ponen en contacto depósitos de un mismo sector del sistema deltaico, por ejemplo depósitos de BI arriba de CB dentro del frente deltaico proximal, o de DO por arriba de LDw en el frente deltaico distal (Fig. 7A). En un siguiente orden de jerarquía pueden ponerse en contacto depósitos de sectores adyacentes del sistema sedimentario, por ejemplo facies de frente deltaico arriba de depósitos de planicie deltaica (Fig. 7B,C), o facies de frente deltaico distal-prodelta sobre facies del frente deltaico proximal. La máxima dislocación de facies se da cuando los depósitos de prodelta u offshore apoyan por arriba de facies de planicie (Fig. 7C). Estas superficies transgresivas sugieren el mayor desplazamiento continente adentro de la línea de costa.

Las superficies de jerarquía intermedia y mayor están estrechamente asociadas con los depósitos de la asociación Depósitos Transgresivos (DT). Éstos se caracterizan por areniscas muy finas y areniscas fangosas con intensa bioturbación y concentración de fragmentos esqueléticos de tamaño grava (Fig. 5). Si bien estas sedimentitas son similares a las descritas en las asociaciones CBw y LAw, el rasgo más distinto de estos depósitos es que aparecen en forma abrupta sobre un gran número de otras asociaciones proximales y desarrollan sucesiones granodecrecientes (Fig. 4). Además su contenido carbonático les brinda una respuesta particular en los perfiles eléctricos.

Si bien este primer análisis es indispensable como primera aproximación, para magnificar de mejor manera el grado de dislocación a través de una superficie transgresiva, es necesario realizar además un análisis en el sentido paralelo a la profundización del sistema de acumulación (Schwarz *et al.*, 2018). Con este propósito se construyeron cuatro transectas principales de

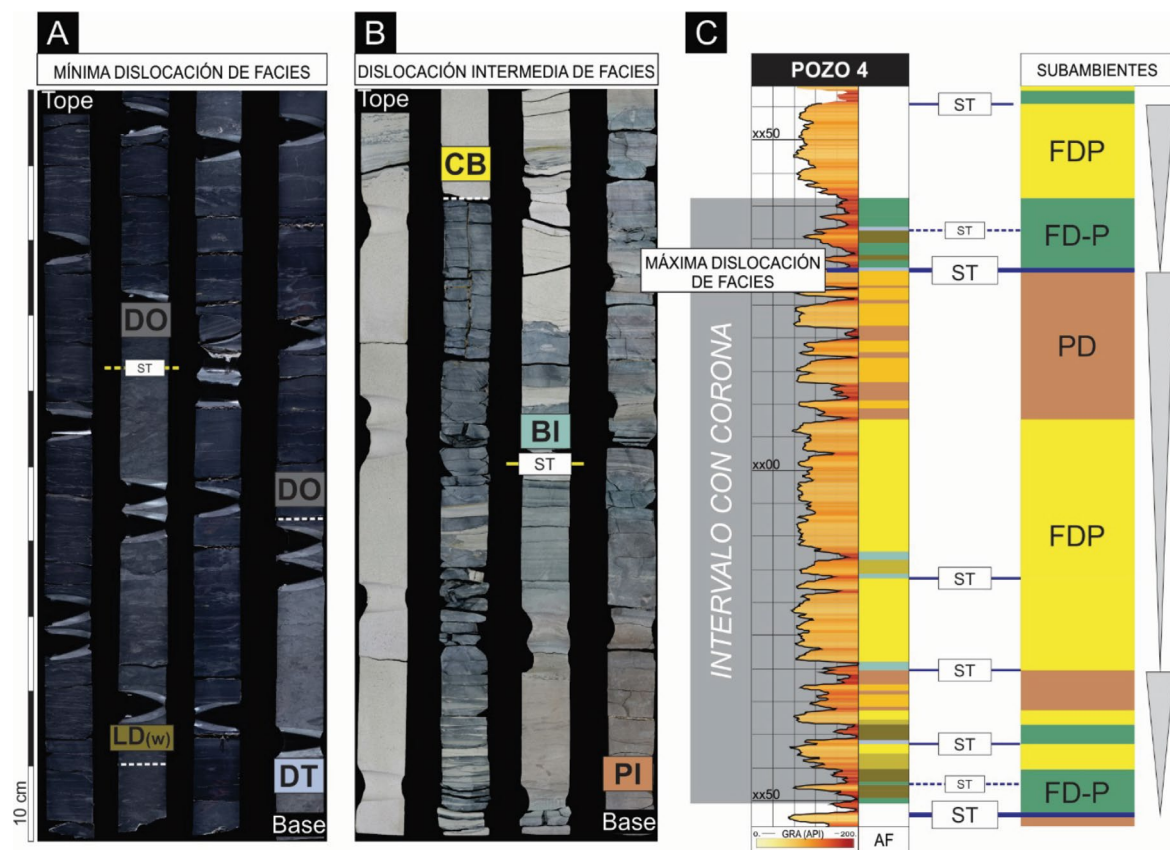


Figura 7. Ejemplos de jerarquías de superficies transgresivas según el grado de dislocación vertical de facies.

correlación cubriendo el área de interés (Fig. 2). Sobre la base de la buena correspondencia entre facies sedimentarias y perfiles eléctricos (Figs. 4, 7), en cada uno de los sondeos se interpretaron los subambientes principales y luego se correlacionaron regionalmente las distintas superficies identificadas (Fig. 8). Integrando el análisis 1D y 3D se definieron finalmente tres tipos de superficies transgresivas.

Superficies Transgresivas ST-0. Estas superficies poseen una mínima dislocación de facies en algún sector del área de estudio (es decir separan depósitos dentro de una misma porción del sistema), y una dislocación intermedia en el resto del yacimiento.

Superficies Transgresivas ST-1. Estas superficies poseen una dislocación intermedia de facies en gran parte del área de estudio (es decir separan depósitos de dos subambientes adyacentes) y una dislocación mínima en el resto del yacimiento.

Superficies Transgresivas ST-2. Estas superficies poseen una máxima dislocación de facies en gran parte del área de estudio (es decir separan depósitos de dos subambientes no adyacentes) y sólo una dislocación intermedia en regiones muy reducidas, generalmente en los sectores más distales del sistema (e.g., ST2 entre Secuencias S-11 y S12).

EVOLUCIÓN SECUENCIAL Y PALEOAMBIENTAL

El análisis secuencial descripto permitió reconocer cinco secuencias principales limitadas por superficies transgresivas ST-2. Siguiendo la nomenclatura propuesta originalmente por la empresa (Echavarria 2013) se denominan aquí como S-08, S-09, S-10, S-11 y S-12. Estas secuencias representan episodios de progradación de todo el sistema deltaico, desde condiciones de prodelta/offshore hasta ambientes de planicie deltaica (Figs. 7, 8). En la secuencia S-12 estos últimos están ausentes, pero ello se podría deber al efecto de erosión a la discontinuidad subaérea relacionada con la base del Miembro Avilé (Fig. 8).

Estas secuencias poseen espesores variables entre 15 y 90 m y están conformadas internamente por sucesiones progradantes de menor escala, separadas por superficies transgresivas de tipo ST-1 o ST-0. Las reconstrucciones paleogeográficas para cada secuencia y sus ciclos menores (Fig. 8) permiten apreciar una polaridad de progradación dominante desde el sureste al noroeste (Fig. 9), con algunos ciclos orientados más este-oeste e inclusive noreste-suroeste. No sólo la orientación sino la magnitud de la progradación puede ser estimada dentro de secuencias individuales, a partir del reconocimiento de límites entre fajas de facies (siguiendo la metodología Schwarz *et al.*, 2018). Valores de progradación de 14 km fueron calculados mediante esta metodología (Fig. 9), que en algunos casos podrían exceder los 20 km. La orientación y magnitud de la progradación en cada secuencia de orden menor, en combinación con los datos de ancho de fajas de facies poseen vital impacto a la hora de comprender reservorios a escala de secuencias internas (ver siguiente capítulo).

La evolución paleoambiental general muestra un predominio de sistemas deltaicos con dominio fluvial en las secuencias S08, S09, y S10 (Fig. 8). En ellas predominan ampliamente las asociaciones de frente deltaico proximal (CB y LA), constituyendo paquetes arenosos de hasta 30 m de potencia. En cambio, en las secuencias superiores los depósitos de frente deltaico corresponden mayormente a asociaciones con amplio dominio de procesos de olas (CBw y LAw) y dentro de las secuencias su participación en volumen disminuye, ya que existen amplios intervalos dominados por depósitos finos de frente deltaico distal y offshore (LDw y DO, Fig. 8). Esta evolución vertical sugiere que la relación entre el aporte sedimentario y los procesos de retrabajo marino se habría modificado en el tiempo.

CARACTERIZACIÓN DE RESERVORIOS

Los resultados del análisis facial, paleoambiental y secuencial del Miembro Pilmatué en el yacimiento El Mangrullo presentado en este trabajo poseen significativas implicancias para la caracterización de reservorios. En primer lugar, fue posible reconocer distintos tipos de reservorios en función de su ubicación en determinados subambientes de los sistemas deltaicos. Estos

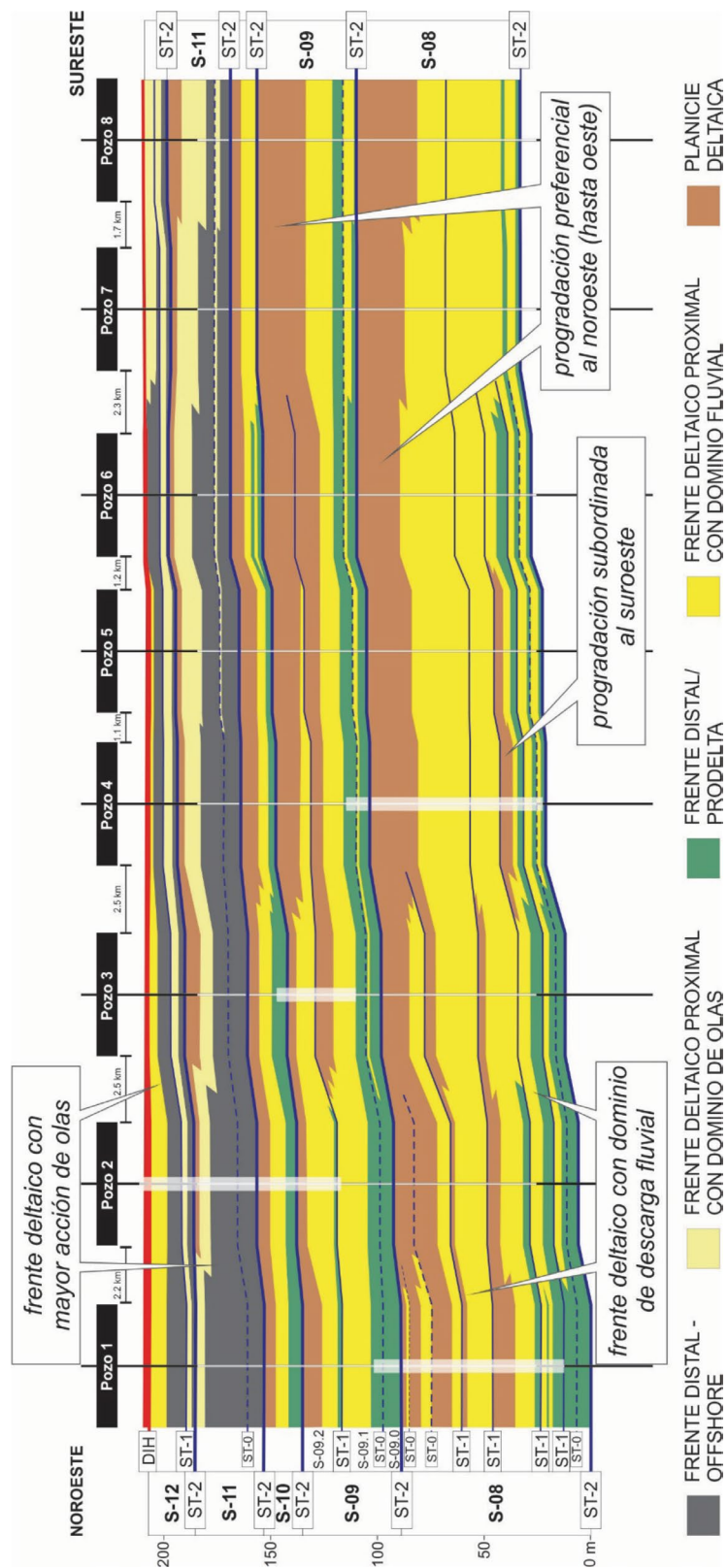


Figura 8. Análisis estratigráfico secuencial del Miembro Pilmatué. ST-0, ST-1 y ST-2 indican superficies transgresivas de distinta jerarquía. DIH: Discordancia intra-Hauteriviana. Ubicación de sondeos en Figura 2.

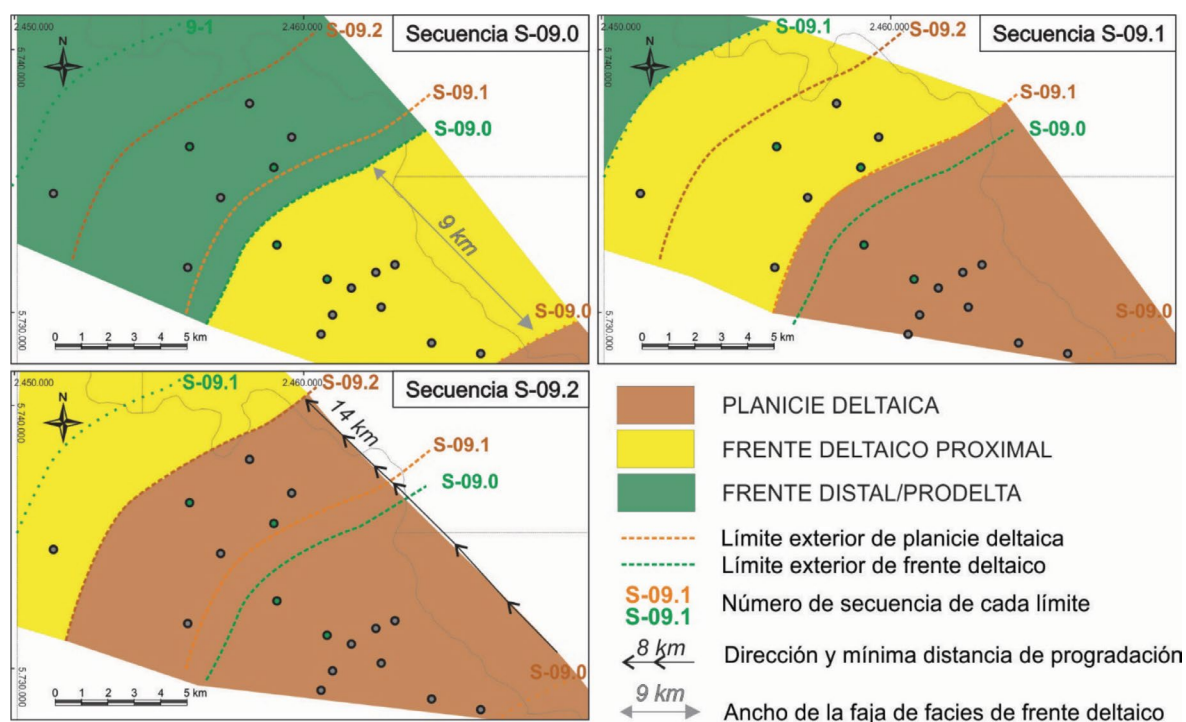


Figura 9. Reconstrucción paleogeográfica de un sistema deltaico dominado por aporte fluvial (Secuencia 09) del Miembro Pilmatué. Se indica la distribución de ambientes, dirección y distancia de progradación y ancho de fajas de facies.

reservorios difieren en su geometría, orientación, dimensiones y texturas dominantes, así como en grados de heterogeneidad interna y conectividad (Fig. 10). Los reservorios correspondientes a la asociación de Complejos de Barras de Desembocadura (CB) de la parte proximal del frente deltaico dominado por descarga fluvial, poseen la mayor conectividad y volumen neto de arenas, con una relación net-to-gross que es cercana a 1, y relativa baja heterogeneidad interna. Algunos cuerpos arenosos con estas características pueden alcanzar 30 m de potencia y extensiones de hasta 10 km de ancho en sentido del rumbo deposicional (Fig. 8). En las Secuencias S11 y S12 también se registran posibles reservorios arenosos vinculados con los Complejos de Barras de Desembocadura influenciadas por olas (CBw). Estos poseen relativa baja heterogeneidad interna y buena conectividad lateral, y se dispondrían en cuerpos elongados paralelos a la línea de costa. Sin embargo, en comparación con unidades más antiguas, la contribución volumétrica de arenas de frente deltaico es significativamente menor en estas dos últimas secuencias.

Por su parte, los reservorios asociados a los Canales Distributarios (CD), si bien texturalmente son algo más gruesos que los del frente deltaico proximal, tendrían dimensiones más pequeñas y menor conectividad lateral que aquellos (Fig. 10), ya que se encuentran comunmente separados por importantes espesores de finos de planicie deltaica (Fig. 4). Estos reservorios se dispondrían perpendiculares a los anteriormente descriptos y estarían presentes en todas las secuencias. Finalmente, los reservorios hacia las porciones distales del sistema de acumulación estarían vinculados con los depósitos de Lóbulos Distales (LD, Fig. 10) y Lóbulos Distales influenciados

por olas (LDw). Estos reservorios tienen una baja relación net-to-gross y texturas areno fangosas, lo que probablemente genera los menores volúmenes netos de arena y una alta heterogeneidad interna.

En forma adicional, la reconstrucción de las historias de progradación de cada una de las secuencias menores reconocidas a partir del análisis secuencial de alta resolución permite mejorar la predicción sobre la distribución geográfica de los tipos de reservorios reconocidos. Por ejemplo la historia de progradación reconstruida para las tres secuencias menores dentro de la Secuencia S-09 (Fig. 9) indica que en el estadio estratigráfico inicial (S-09.0) los reservorios dentro de la extensión del yacimiento serían del tipo Complejos de Barras de Desembocadura y Lóbulos Distales, en tanto para el estadio final (S-09.2), el yacimiento comprendería sólo reservorios del tipo Canales Distributarios (Fig. 10). De esta manera es posible generar una caracterización de reservorios más ajustada por niveles estratigráficos, que permita eventualmente comprender con mejor precisión distintas unidades de flujo dentro de las secuencias mayores.

Todos los elementos aquí mencionados son fácilmente incorporables a modelados numéricos que permitan generar mejores estrategias de producción en estos reservorios no convencionales (tight) silicoclásticos.

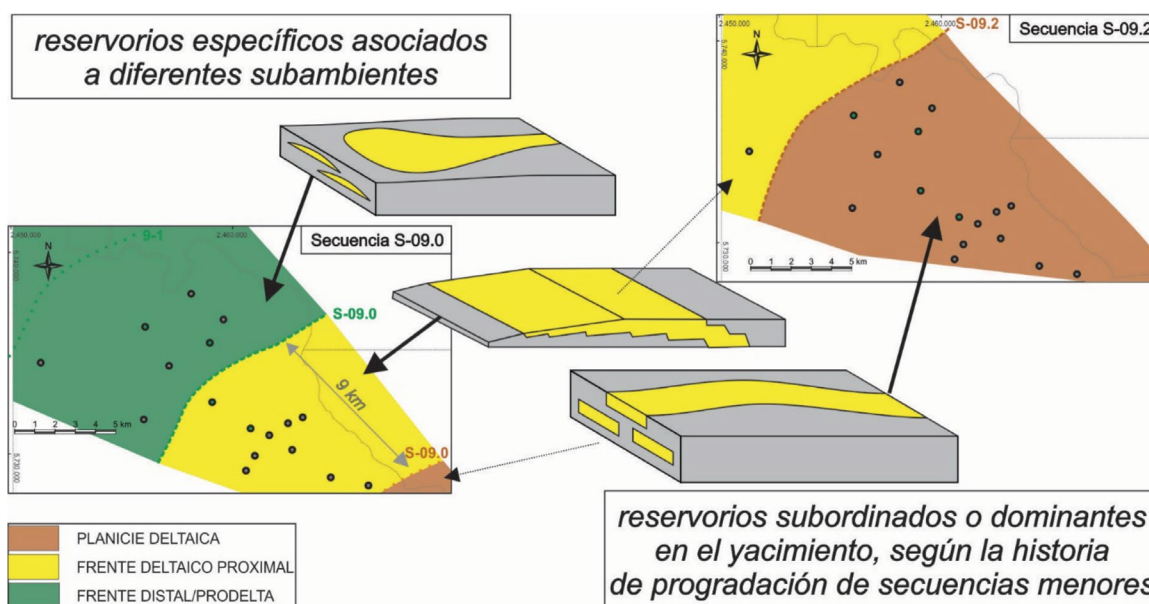


Figura 10. Tipos principales de reservorios arenosos según los distintos submbientes deltaicos reconocidos y su extensión dentro del yacimiento en función de las historias de progradación reconstruidas para las secuencias menores.

CONCLUSIONES

Un estudio facial, paleoambiental y secuencial de la mitad superior del Miembro Pilmatué en el yacimiento El Mangrullo, a partir de un registro continuo de testigos corona y su integración con perfiles de pozo, permitió describir en detalle e interpretar depósitos desarrollados en un ambiente deltaico.

Se reconocieron facies de planicie deltaica, frente deltaico proximal y frente deltaico distal-prodelta de deltas con predominio de descarga fluvial, así también como se reconocieron depósitos de frente deltaico proximal y frente-deltaico distal-offshore con dominio de acción de olas que se registran principalmente en la parte superior de la unidad.

Se identificaron cinco secuencias principales que representan fenómenos de progradación de largo término, desde subambientes de prodelta u offshore hasta subambientes de planicie deltaica. Estas secuencias mayores están limitadas por superficies transgresivas que se identifican en toda la extensión del yacimiento y que representan una significativa profundización de los sistemas de acumulación (ST-2).

En las tres secuencias más antiguas prevalece el desarrollo de frentes deltaicos con dominio fluvial en tanto en las dos más jóvenes habrían prevalecido frentes deltaicos con acción de olas.

Internamente estas cinco secuencias se componen de secuencias menores (limitadas por superficies transgresivas de menor extensión regional), en las que pueden reconstruirse las direcciones y magnitudes de progradación, así como los anchos de los subambientes principales.

Se reconocieron distintos tipos de reservorios arenosos en función de su ubicación en el sistema de acumulación, con características distintivas de geometría, disposición, conectividad, heterogeneidad interna y dimensiones. También pudo cuantificarse la proporción de tipos de reservorios dentro de las secuencias menores.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Pampa Energía S.A. por el apoyo y datos brindados que permitieron la publicación del presente estudio. A los revisores S. Galeazzi y C. Zavala por la lectura crítica del trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Echevarria, C., 2013, "Posibilidades exploratorias de bajo riesgo en el Mangrullo, Fm. Agrio, Miembro Pilmatué", Pampa Energía (inédito).
- Echevarria, C. y C. Canosa, 2017, "Hallazgo de hidrocarburos en campos maduros: Miembro Pilmatué, Formación Agrio, yacimiento Mangrullo, Cuenca Neuquina", XX Congreso Geológico Argentino, Simposio 4 Prospección y desarrollo de yacimientos convencionales y no convencionales y desarrollo en campos maduros, p. 25-26, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Howell, J.A., E. Schwarz, L.A. Spalletti y G.D. Veiga, 2005, "The Neuquén Basin: an Overview". en G. Veiga, L., Spalletti, J.A., Howell y E. Schwarz (eds.), The Neuquén Basin, Argentina: a case study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics, Geological Society of London, Special Publications 252, p. 1-14.
- Lazo, D.G., 2007, "Análisis de biofacies y cambios relativos del nivel del mar en el Miembro Pilmatué de la Formación Agrio, Cretácico Inferior de cuenca Neuquina, Argentina", Ameghiniana, N° 44, p. 73-89.

- Lazo, D.G., A. Concheyro, E.G. Ottone, M.V. Guler y M.B. Aguirre-Urreta, 2009, "Bioestratigrafía integrada de la Formación Agrio en su localidad tipo, Cretácico Temprano de la Cuenca Neuquina", *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, N° 65, p. 322-341.
- Legarreta, L. y C.A. Gulisano, 1989, "Análisis estratigráfico secuencial de la Cuenca Neuquina (Triásico superior-Terciario inferior), en G. Chebli y L. Spalletti (eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas, Serie Correlación Geológica* 6, p. 221-243.
- Legarreta, L. y M.A. Uliana 1991. Jurassic-Cretaceous marine oscillations and geometry of backarc basin fill, central Argentine Andes. En D.I. Macdonald (Eds.), *Sedimentation, Tectonics and Eustasy. Sea level Changes at Active Plate Margins*. IAS Special Publication 12, p. 429-450.
- Liberman, A., E. Schwarz y G.D. Veiga, 2014, "Caracterización paleoambiental y secuencial de reservorios de la Formación Mulichinco en el yacimiento Aguada del Chivato (sector nororiental de Cuenca Neuquina, Argentina): su contribución para el desarrollo de un campo aún inmaduro", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 351-373. Mendoza, Argentina.
- Olivo, M.S. 2016, "Análisis sedimentológico y estratigráfico secuencial de los sistemas fluviales y eólicos del Valanginiano en el sector central de la Provincia de Neuquén, Cuenca Neuquina, Argentina", Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad de La Plata, 234 p. (inédito).
- Olivo, M.S., E. Schwarz y G.D. Veiga, 2016, "Modelo de acumulación y evolución secuencial del intervalo cuspidal de la Formación Quintuco en su área tipo: implicancias para las reconstrucciones paleogeográficas del margen austral de la Cuenca Neuquina durante el Valanginiano", *Andean Geology*, N° 43, p. 215-239.
- Schwarz, E. y G.D. Veiga, 2015, "Análisis Paleoambiental y Estratigráfico Secuencial del Miembro Pilmatué en el Yacimiento El Mangrullo (Provincia del Neuquén), Informe de Segunda Fase, Informe preparado para Petrobras Energía S.A. (Inédito), 42 p.
- Schwarz, E. y G.D. Veiga, 2018, "Estudio sedimentológico e interpretación paleoambiental del Miembro Pilmatué en afloramientos de la Sierra de la Vaca Muerta y Anticlinal del Agrio (Provincia del Neuquén)", Informe preparado para Pampa Energía S.A. (Inédito), 51 p.
- Schwarz, E., L.A. Spalletti y G.D. Veiga, 2011, "La Formación Mulichinco (Valanginiano)", en H. Leanza, J. Vallés, C. Arregui, y J.C. Danieli (eds.), *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*, pp. 131-144.
- Schwarz, E., G.D. Veiga, G. Álvarez Trentini, M.F. Isla, y L.A. Spalletti, L.A., 2018, "Expanding the spectrum of shallow-marine, mixed carbonate-siliciclastic systems: processes, facies distribution, and depositional controls of a siliciclastic-dominated example", *Sedimentology*, DOI: 10.1111/sed.12438.
- Spalletti, L.A., G.D. Veiga y E. Schwarz, 2011, "La Formación Agrio (Cretácico Temprano)" en H. Leanza, J. Vallés, C. Arregui, y J.C. Danieli (eds.), *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén*, pp. 145-160.

- Veiga, G.D. y E. Schwarz, 2017, "Facies characterization and sequential evolution of an ancient offshore dunefield in a semi-enclosed sea: Neuquén Basin, Argentina", *Geo-Marine Letters*, N° 37, p. 411-426.
- Weaver, V., 1931, "Palaeontology of the Jurassic and Cretaceous central Argentina". University of Washington, Memoir, Seattle, 496 p.



**10° CONGRESO DE
EXPLORACIÓN Y
DESARROLLO DE
HIDROCARBUROS**

**Energía y Sociedad
aliados inseparables
Mendoza 2018**