

10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos
Sesiones Generales: "Energía y Sociedad, aliados inseparables"

LA FORMACIÓN LOMA MONTOSA EN EL BORDE NORORIENTAL DE LA CUENCA NEUQUINA: ANÁLISIS SECUENCIAL, CARACTERIZACIÓN PALEOAMBIENTAL Y PROSPECTIVIDAD REMANENTE

Juan Francisco Pedro Iñigo¹, Renzo Vargas¹, Eugenia Novara¹, Diego Martín Pereira¹, Ernesto Schwarz²

1: Pluspetrol, jinigo@pluspetrol.net, rvargas01@pluspetrol.net, mnovara@pluspetrol.net, mpereira@pluspetrol.net

2: Centro de Investigaciones Geológicas (CONICET-UNLP), eschwarz@cig.museo.unlp.edu.ar

Palabras clave: Plataforma Nororiental Neuquina, Discordancia Intravalanginiana, rampa mixta carbonática-silicoclástica

ABSTRACT

The understanding of stratigraphic frameworks and paleoenvironmental models constitute a key element to improve both exploration and development of oil and gas fields. A methodology that extended through a broad scale of analyses, going from regional seismic interpretation, to well log interpretation, and core and cutting characterization, allowed us to assign a carbonate-siliciclastic interval in the NE of the Neuquen Basin Platform to Intramalmic-Intravalanginian ages; additionally, this interval was defined as part of Loma Montosa Fm. The interpretation of facies associations both from core and cutting, and its vertical arrangement were used to define depositional trends, main stratigraphic surfaces, and finally develop an environmental evolution model of this cycle. The Loma Montosa Fm. in the studied zone is limited in its base by a regional transgressive surface and in its top by the Intravalanginian unconformity; at least two transgressive and one regressive lower hierarchy surfaces were also defined within this cycle. The carbonate-siliciclastic sequence assigned in this work to Loma Montosa is interpreted as a ramp or mixed shoreface with a very low structural gradient, in which grainstone deposits are defined as high energy coastal environments and could constitute a potential reservoir if adequate stimulation is applied. This would comprise a new play prospectable in a regional scale.

INTRODUCCIÓN

La definición de apropiados marcos estratigráficos y secuenciales en cuencas productivas constituye una herramienta fundamental para la exploración y desarrollo de yacimientos de hidrocarburos, en especial de aquellos con elevada madurez. En el tren productivo Río Colorado (TPRC) de la plataforma Nororiental de la Cuenca Neuquina (Fig. 1) los depósitos marinos ubicados entre el tope de la Formación Tordillo y la base de la Formación Centenario (Fig. 2) carecían de estudios sedimentológicos y secuenciales de detalle, que permitiesen comprender cómo se relacionan con la columna estratigráfica reconocida hacia zonas interiores o laterales de

la cuenca. Este intervalo de 150 m de espesor conformado por depósitos mixtos carbonáticos-silicoclásticos han sido asignados alternativamente a la Formación Mulichinco (Rincón *et al.*, 2014), y a facies correspondientes a la Formación Loma Montosa en sectores cercanos (Manestar *et al.*, 2014).

A fin de realizar una caracterización integral de este intervalo, se definieron los siguientes objetivos: asignar edad y nombre formacional al intervalo estudiado; realizar una interpretación secuencial y una caracterización paleoambiental del mismo; y en última instancia definir los plays que comprende y su potencial hidrocarburífero remanente. Esto se realizó mediante un estudio en distintas escalas de análisis, desde la sísmica regional, pasando por la correlación de perfiles de pozo y yendo hasta el detalle del estudio sedimentológico en coronas y el análisis de cutting.

En primer lugar, en base al análisis sobre sísmica regional se estableció la relación cronoestratigráfica del intervalo estudiado con unidades temporalmente equivalentes en posiciones más internas de la cuenca, a fin de definir la edad del mismo. Adicionalmente, de acuerdo a sus características faciales y estratigráficas, se le asignó un nombre formacional enmarcándolo dentro de las unidades ya definidas en la Cuenca Neuquina. Un tercer paso del estudio consistió en definir las principales superficies estratigráficas internas y la evolución secuencial del intervalo analizado. Finalmente, se generó un modelo paleoambiental que permitirá mejorar la predicción

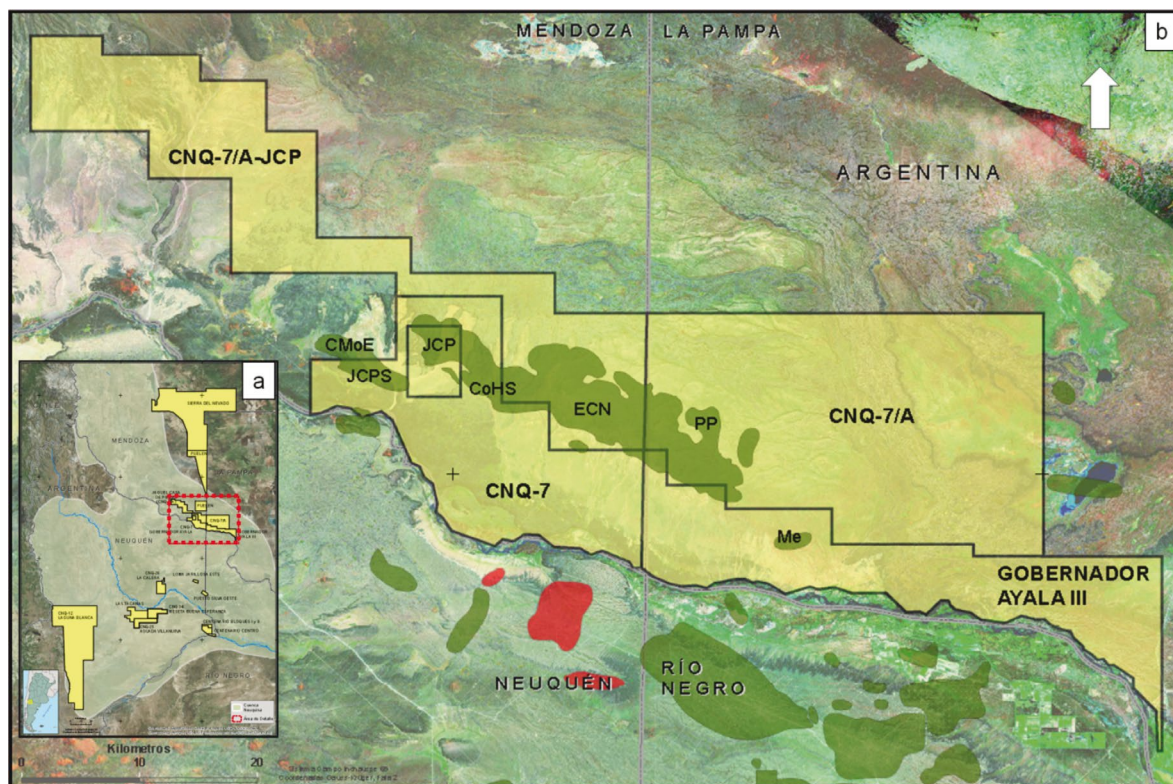


Figura 1. a. Ubicación de bloques con participación de Pluspetrol en la Cuenca Neuquina. b. Detalle de los bloques que componen el TPRC y yacimientos existentes (Mendieta, Puesto Pinto, El Corcobo Norte, Cerro Huanul Sur, Jagüel Casa de Piedra y Jagüel Casa de Piedra Sur). También se indican acumulaciones /yacimientos de gas y petróleo al S del Río Colorado.

y disminuir la incertidumbre sobre la distribución espacial y vertical de facies con características de reservorio, su génesis, su posible geometría, orientación preferencial y grado de heterogeneidad. Este conjunto de trabajos permitió asignar los plays potenciales para la secuencia analizada en la zona de estudio, así como su prospectividad remanente.

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina se encuentra ubicada en el O de Argentina, limitada al S por el Macizo Norpatagónico, al NE por la Sierra Pintada y al O por la Cordillera de Los Andes; presenta una geometría triangular y posee una secuencia Mesozoica-Cenozoica de al menos 7 km de espesor (Vergani *et al.*, 1995). Exhibe distintos estilos estructurales asociados a una compleja historia geológica, controlada por la sobreimposición de tres cuencas con mecanismos de subsidencia diferentes; iniciando como una cuenca de tipo rift en el Triásico medio-Jurásico inferior, para luego evolucionar a una cuenca de trasarco desde el Jurásico inferior al Cretácico, y finalizando en una cuenca de antepaís desde el Cretácico superior a la actualidad (Howell *et al.*, 2005). Esta evolución

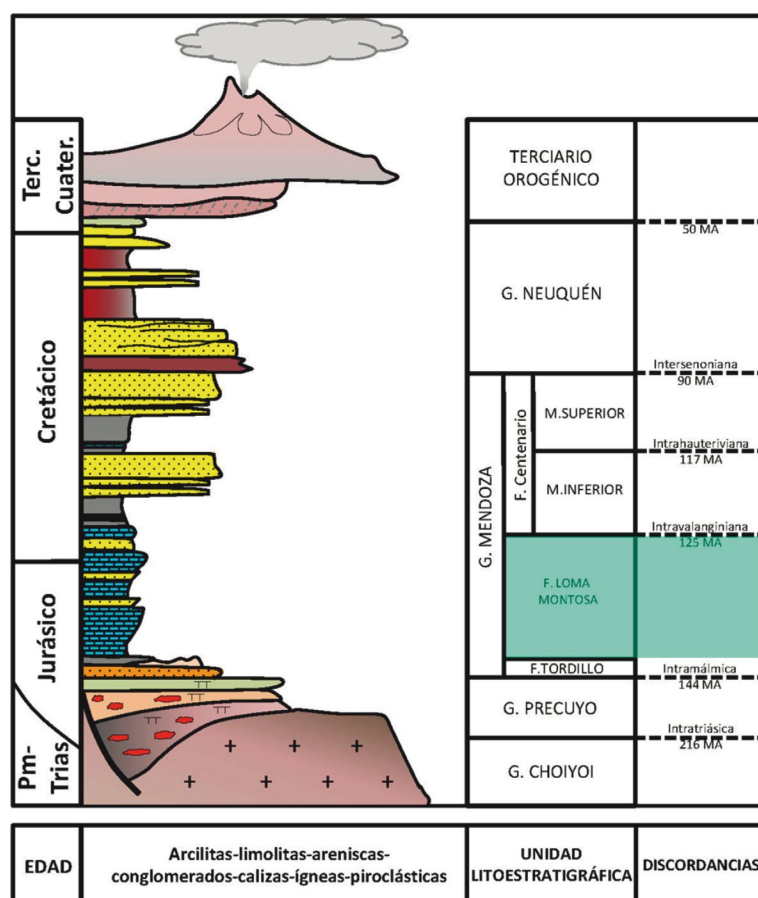


Figura 2. Columna Estratigráfica de la zona del TPRC. Se destaca en verde el intervalo objetivo de este trabajo. Modificado de Brisson, 1996.

que se extiende por un período de 220 M.a desde el Mesozoico al Cenozoico, queda representada en el registro estratigráfico de la zona de estudio. Sin embargo, debido a su posición marginal en la cuenca, el TPRC presenta una columna sedimentaria de espesor acotado por erosión o no depositación; es así que el intervalo Mesozoico-Cenozoico quedó representado por un espesor máximo de 1000m, sin considerar el relleno inicial Triásico de los hemigrábenes de la cuenca tipo rift (Fig. 2). Para un mayor detalle respecto de la columna sedimentaria y las unidades formacionales presentes en el área de estudio se recomienda consultar a Cevallos *et al.*, de 2011.

El TPRC se encuentra ubicado en el borde NE de la Cuenca Neuquina y comprende tanto el SE de la Provincia de Mendoza (bloques CNQ7 y JCP), como el SO de la Provincia de La Pampa (bloques GAIH y CNQ7A) de la República Argentina, inmediatamente al NE del Río Colorado (Fig. 1). Este “pool” de yacimientos descubierto por Petroandina S.A. en 2004 y posteriormente explorado y desarrollado por Pluspetrol S.A. desde 2010, se ubica en la unidad morfoestructural de la Plataforma Neuquina. Estos yacimientos mayormente productivos de la Fm. Centenario, constituyen uno de los descubrimientos de hidrocarburos convencionales de Argentina más importante en los últimos 15 años, ya que poseen un volumen de Petróleo Original In Situ (POIS) por encima de los 700 MMBO y un volumen Estimado Final Recuperable (EUR por sus siglas en inglés) cercano a 260 MMBO. Cabe destacar que el intervalo analizado en este trabajo alberga a la fecha un porcentaje mínimo de este volumen. Se considera que la madurez exploratoria de este pool de yacimientos es alta, dada por la existencia de más de 1200 pozos perforados en la zona. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de información existente, los modelos deposicionales y las principales superficies estratigráficas para las distintas unidades de la columna sedimentaria aún no han sido completamente comprendidos. Si bien no se espera alcanzar volúmenes de hidrocarburos recuperables cercanos a los de la Fm. Centenario, para los reservorios presentes en el ciclo carbonático-silicoclástico aquí analizado (debido a la naturaleza de los reservorios que lo componen), su potencial no había sido debidamente definido y su prospectividad remanente ameritaba un estudio de mayor detalle.

Desde el punto de vista estructural, la zona del TPRC se ubica en el área de influencia de importantes lineamientos de carácter regional tales como Cortadera y Río Colorado, orientados en dirección NO-SE y vinculados probablemente a discontinuidades mayores en el

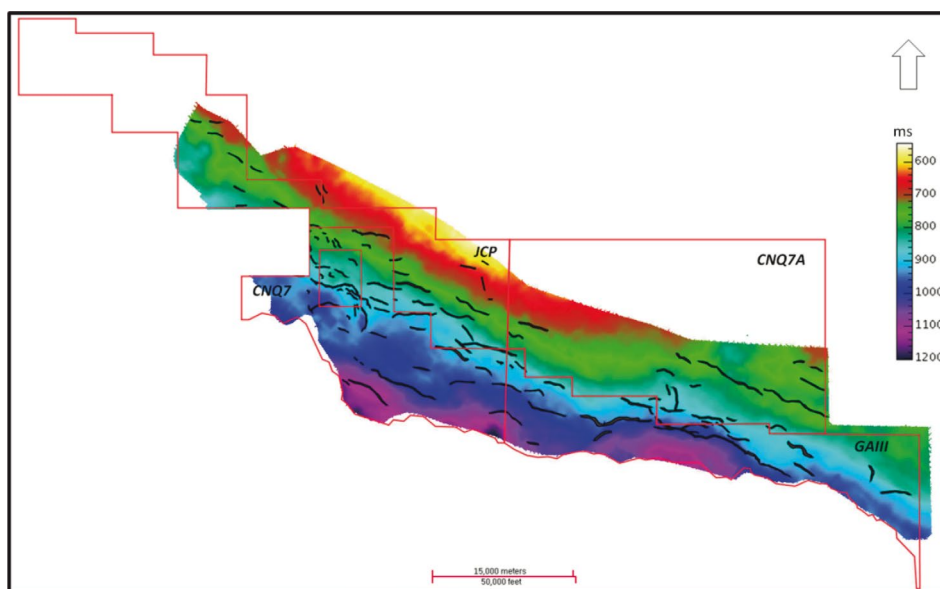


Figura 3. Mapa TWT al Techo del Gr. Precuyo dentro del ámbito del TPRC. Se destaca la geometría homoclinal de los estratos y la orientación principal de las fallas con rumbo ONO-ESE.

basamento. La Figura 3 constituye un mapa isócrono al tope del Gr. Precuyo (o discordancia Intraliásica) interpretado en el cubo sísmico PSTM correspondiente al TPRC. Se observa en el mismo un carácter estructural relativamente simple, dado por una pendiente homoclinal que sube hacia el N-NNE, afectada por la presencia de múltiples fallas de basamento orientadas mayormente según la dirección NO-SE. En la zona del TPRC, luego del estadio de rift, la actividad tectónica fue acotada debido a su posición marginal en la cuenca. La subsidencia termal a escala regional y la compactación diferencial a escala local parecen ser los principales mecanismos generadores de espacio de acomodación.

Sin embargo, la existencia de fallas normales afectando toda la columna sedimentaria, el desplazamiento de las crestas de los anticlinales someros respecto de los altos de basamento y la interpretación de estructuras de inversión tectónica en el S de los bloques, hacen pensar en una historia estructural bastante más compleja de lo que se ha considerado hasta la fecha. Adicionalmente, debe destacarse la existencia de fallas transversales al sistema principal de hemigrábenes, que se piensa originalmente debían estar asociadas a rampas de relevo entre hemigrábenes triásicos, pero que posteriormente habrían sido reactivadas como fallas de desplazamiento de rumbo. Se interpreta que éstas ejercen un control sobre la orientación de las discordancias y probablemente también sobre la distribución de los paleoambientes y sobre las acumulaciones hidrocarburíferas.

MACROESCALA: METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Metodología

Como se mencionó previamente, se utilizó una aproximación de múltiples escalas de trabajo que permitió caracterizar de manera más detallada el intervalo de estudio. Una primera aproximación desde la escala regional estuvo dada por la integración de sísmica regional interpretada y calibrada con datos de pozos, cuyo objetivo fue redefinir los límites estratigráficos en el área de estudio, asignar un rango de edades relativas y ajustar la columna estratigráfica del área a la estratigrafía formal definida para estos sectores del subsuelo de la Cuenca Neuquina. La información se obtuvo a través de la adquisición (compra) e interpretación de datos públicos de la provincia de Neuquén (Fig. 4) y permitió definir el marco cronoestratigráfico en posiciones más internas de la Cuenca Neuquina (yacimientos Puesto Hernández, Desfiladero Bayo, Chihuido de la Sierra Negra, etc), e integrarlo con el borde NE de la misma. Estos datos totalizan aproximadamente unos 3130 km² de información de subsuelo distribuida en 5 cubos de carácter regional (Fig. 4). También se utilizó sísmica proveniente de líneas 2D como complemento de la información de los cubos 3D.

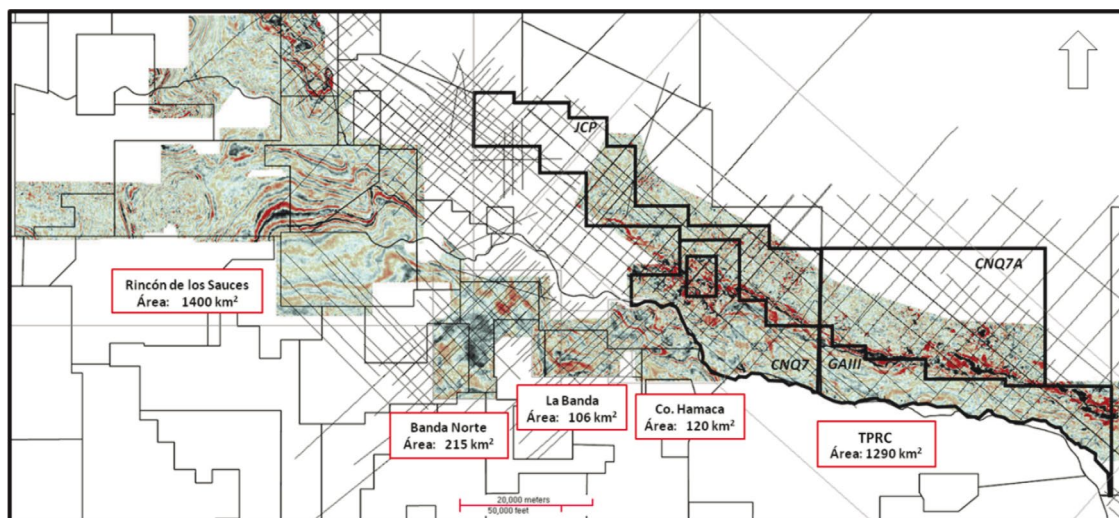


Figura 4. Conjunto de Time slices entre 800 ms mostrando la distribución de información sísmica 3D disponible y líneas 2D adquiridas a la Provincia de Neuquén.

En base a la interpretación de secciones sísmicas regionales y utilizando información pública de pozos, integrados a los datos presentes en Río Colorado, se lograron definir las principales relaciones entre las unidades que componen el registro geológico en este sector de la cuenca, identificando terminaciones y geometrías de traslape, truncación y acunamiento, entre otras. La Figura 5 muestra una transecta sísmica compuesta que une todos los cubos interpretados en sentido aproximado O-E. Se interpretaron y mapearon las discordancias Intraliásica (Jurásico), Intracaloviana (Jurásico), Intramálmica (Jurásico), Intravalanginiana (Cretácico), Intrahauteriviana (Cretácico) e Intersenoniana (Cretácico). También se interpretaron los topes correspondientes a las Formaciones Lotena+La Manga (Jurásico), Tordillo (Jurásico), Vaca Muerta+Loma Montosa (Jurásico-Cretácico), Mulichinco (Cretácico) y el Mb. La Tosca (Cretácico) (Fig. 5).

Se logró una interpretación regional consistente que muestra la somerización de todas las unidades interpretadas en dirección NE y el hundimiento hacia el SO (Fig. 6). Adicionalmente, se observa la disminución de espesor de las unidades del Jurásico y Cretácico hacia el borde de cuenca ubicado al E, es decir, hacia la posición del TPRC (Fig. 5). Esto se debe a dos factores principales, en primer lugar hacia el E se encontraban los límites depositacionales para estas unidades debido a topografías elevadas relativas, y en segundo lugar a la erosión de las mismas hacia el E, verificándose allí el apilamiento de las distintas discordancias.

En los 3130 Km² interpretados, sólo las discordancias Intraliásica, Intrahauteriviana e Intersenoniana están presentes en la totalidad de los datos utilizados. Le siguen en extensión, considerando el borde de cuenca ubicado al NE, el tope de la Formación Tordillo y la discordancia Intravalanginiana. Ambas superficies culminan en relación de onlap contra el tope del Gr. Precuyo dentro del TPRC (Fig. 5). El resto de las superficies interpretadas poseen una distribución espacial más acotada debido a que terminan o son erosionadas, en torno a una línea imaginaria en el sector

N del Bloque Cerro Hamaca, inmediatamente al SO del bloque CNQ7, que estaría relacionada con el lineamiento Río Colorado. La Figura 6 muestra mapas isócronos TWT de las superficies interpretadas más relevantes para este trabajo.

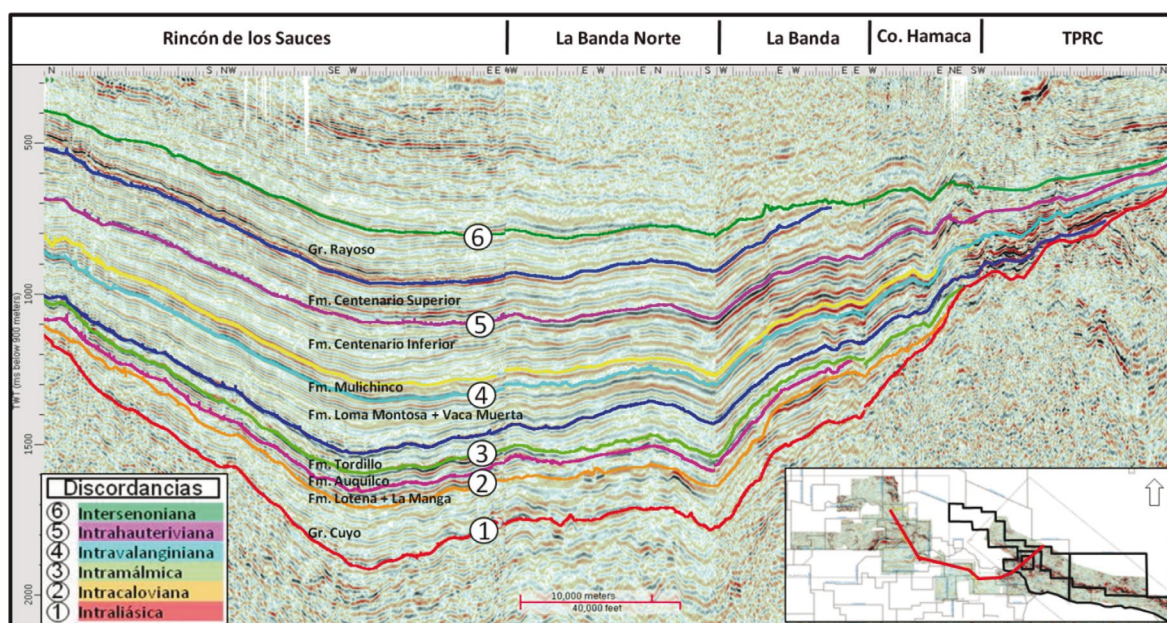


Figura 5. Transecta arbitraria regional que muestra la extensión y distribución de los horizontes y discordancias interpretadas.

Una sección por pozos orientada según la dirección aproximada SO-NE muestra el mismo arreglo general (Fig. 7), ya que se observa que en la posición aproximada del lineamiento Río Colorado se erosionan o se acúan los Grupos Cuyo y Lotena y la Fm. Rayoso, evidenciando que el mismo ha ejercido un importante control durante la evolución geológica del área.

Resultados

Como corolario de este enfoque de escala regional, pudo definirse la posición estratigráfica relativa del intervalo silicoclástico-carbonático de 150 m estudiado. El mismo se ubicaría en el TPRC entre el horizonte correspondiente al techo de la Fm. Tordillo y el horizonte correspondiente a la discordancia Intravalanginiana. Debe ser entonces, asignado totalmente al Grupo Mendoza Inferior (Gulisano *et al.*, 1984), el cual abarca en sectores más profundos de la cuenca, el período Tithoniano-Valanginiano Temprano (Gulisano *et al.*, 1984; Leanza *et al.*, 2011). Dada esta asignación temporal y por las características litológicas de los depósitos, este intervalo puede ser definido en la región del TPRC, como Formación Loma Montosa (Digregorio, 1972).

Esto difiere respecto de trabajos previos que asignaban este intervalo a un período de tiempo más extenso, ya que se consideraba la porción superior del mismo como correspondiente a la Fm.

Mulichinco (Rincón *et al.*, 2014). Esta nueva interpretación propone el acuñamiento de dicha unidad contra el tope de la Formación Loma Montosa en la zona de Cerro Hamaca (Fig. 8). Si bien la interpretación de los datos sísmicos permite suponer al lineamiento del Río Colorado

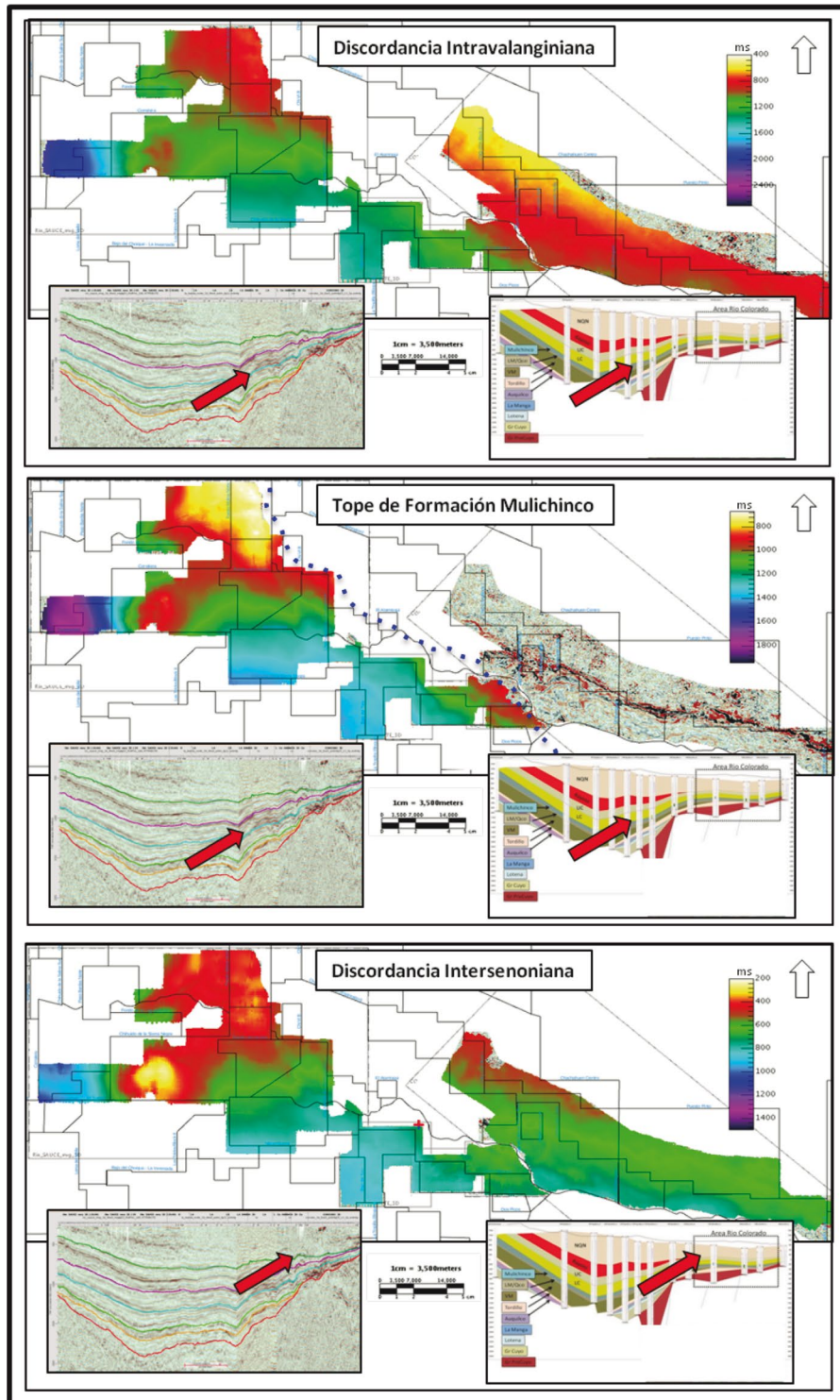


Figura 6. Mapas isócronos TWT para las discordancias y horizontes interpretados más relevantes en este trabajo.

cómo límite depositacional de la Fm. Mulichinco, en base a correlaciones regionales de pozo, se plantea una incertidumbre respecto de este punto, para la zona del Yacimiento Mendieta (Pereira y Vargas, 2017).

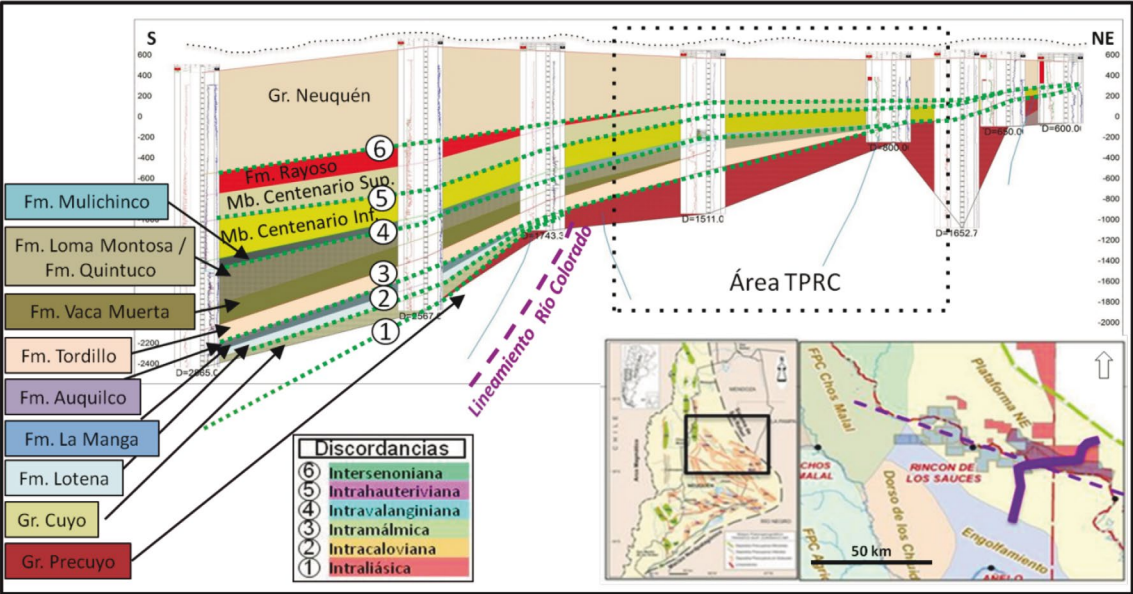


Figura 7. Correlación regional SO-NE estructural. Se destaca la presencia del lineamiento Río Colorado como control de la distribución de las unidades de edad Jurásica.

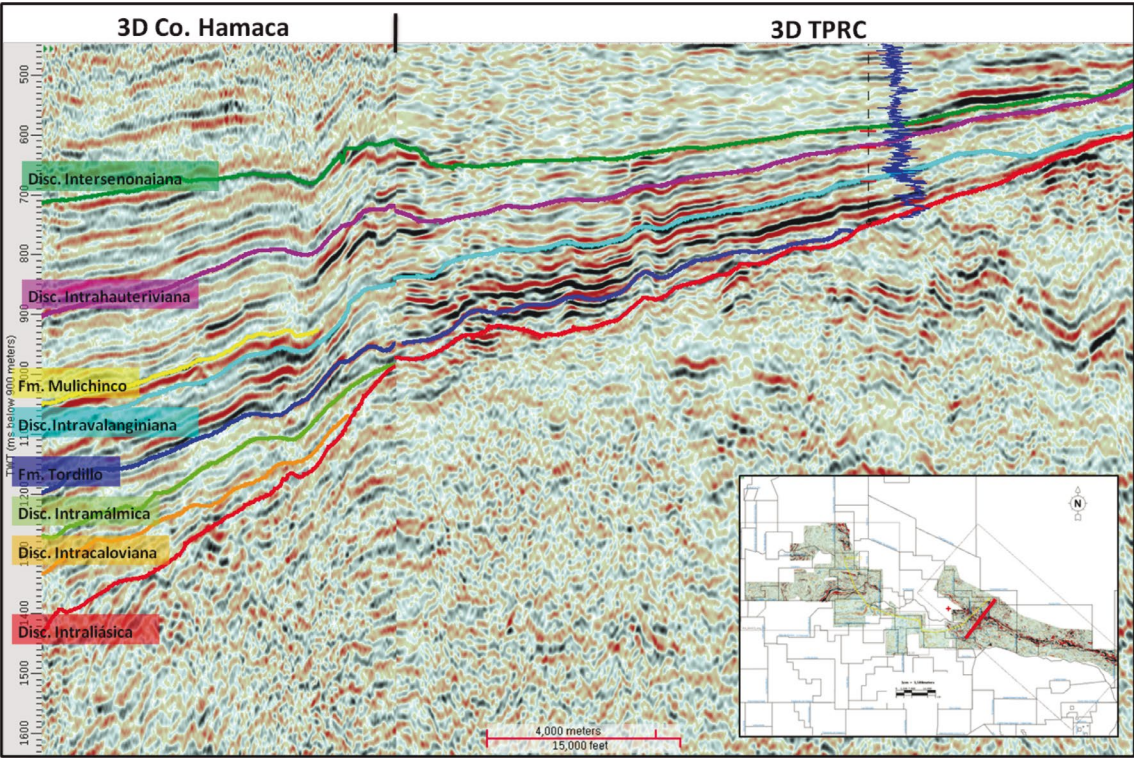


Figura 8. Sección sísmica arbitraria 3D SO-NE desde Cerro Hamaca hasta Río Colorado (Corcoba), mostrando el acúñamiento de los depósitos de la Fm. Mulichinco en relación de onlap con la discordancia Intravalanginiana.

A fin de confirmar la correlación aquí establecida, se realizó un análisis de mapas de isoespesor sísmico o isocronopáquicos. Un primer ejercicio consistió en generar un isocronopáquico de la Formación Loma Montosa (Fig. 9a) y otro correspondiente al intervalo entre la Discordancia Intravalanginiana y la Intraliásica (Fig. 9b). Ambos muestran una distribución coherente de espesores sísmicos que permite interpretar un acuñaamiento hacia el NE. Contrariamente, si se intenta definir la existencia de la Fm. Mulichinco hacia el NE del Río Colorado, se observa una anomalía de espesores sísmicos para la misma ya que habría una disminución progresiva de espesor hasta la posición del Yacimiento Cerro Hamaca, y luego se observaría un incremento anómalo de espesor en la zona del TPRC (Fig. 9c).

MESOESCALA Y MICROESCALA: METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Metodología

Una vez realizada la asignación estratigráfica, se procedió a la caracterización sedimentológica de los depósitos pertenecientes a la Formación Loma Montosa. En primer lugar, se realizó un estudio sedimentológico sobre los testigos corona de los sondeos LPO.x-1 (La Pista Oeste) y Me-1007 (Mendieta). Se llevó a cabo una descripción detallada de la textura, composición, estructuras sedimentarias (primarias y secundarias) y estructuras biogénicas. Adicionalmente, dado el carácter mixto o híbrido (silicoclástico/carbonático) de muchas de las rocas presentes en la sucesión analizada, fue necesario considerar descripciones petrográficas y cuantificaciones composicionales de láminas delgadas realizadas por LCV (2014) y Petrel (2008).

En base a esta información, se desarrolló un análisis de facies y sucesiones verticales de asociaciones de facies. Sin embargo, debe destacarse que la información disponible de coronas, para este intervalo, se encuentra acotada tanto areal como verticalmente. Es por esto que se integró la misma con perfiles de pozo y recortes de perforación. En primer lugar, se realizó una correlación entre asociaciones de facies y perfiles en los pozos con testigo corona, y una exhaustiva revisión de la descripción de cutting, abarcando el intervalo comprendido entre la discordancia Intramálmica hasta el techo del Mb. Inferior de la Fm. Centenario según interpretación sísmica. Posteriormente, se extendió el análisis de la descripción de cutting y perfiles a 55 sondeos dentro del área de estudio (Fig. 10). Esto fue complementado con las interpretaciones de imágenes resistivas de pozo disponibles, para los intervalos con y sin coronas. Finalmente, se confeccionaron mapas de distribución de facies de cutting para subciclos de sedimentación de carácter semiregional.

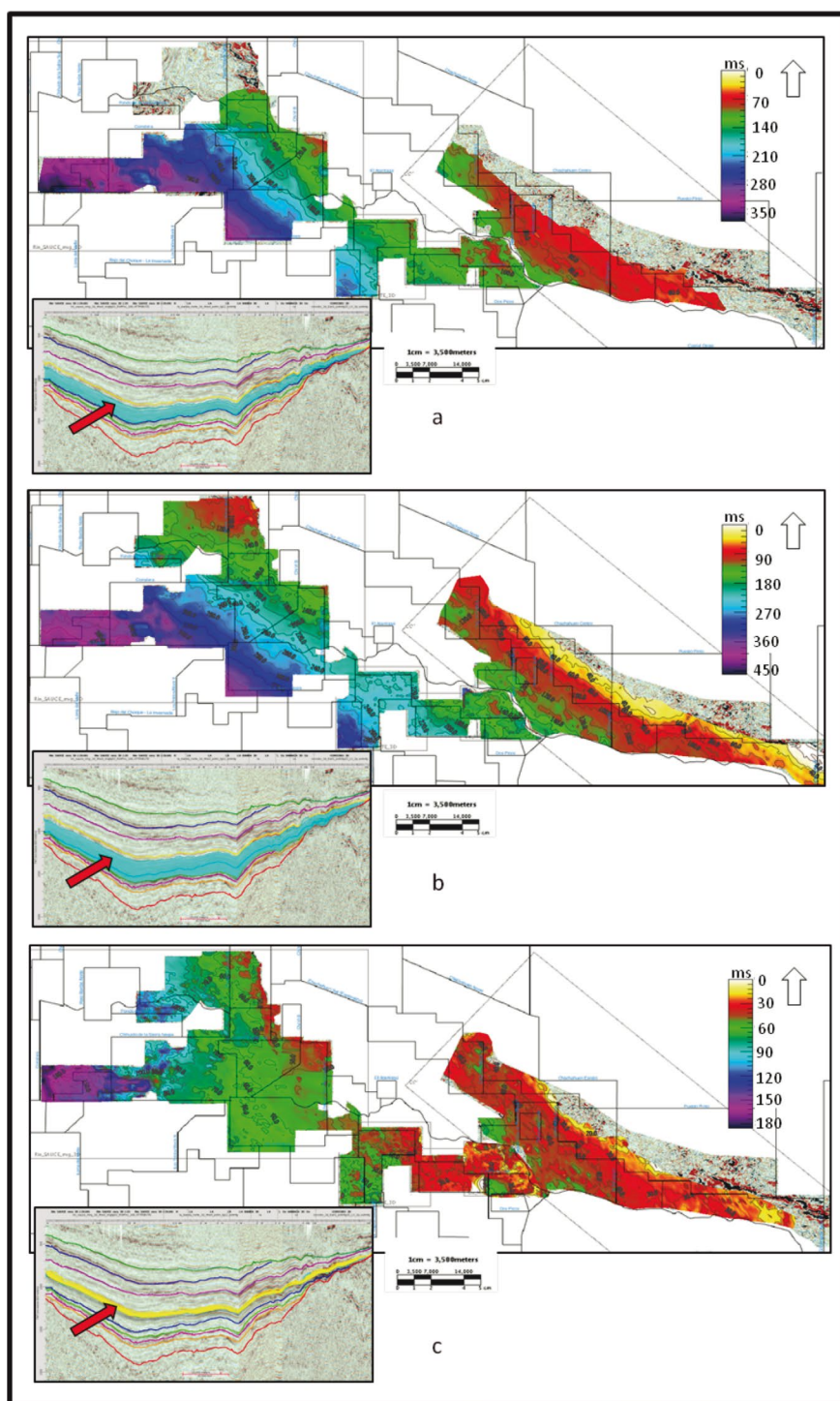


Figura 9. a. Mapa isocronopáquico para la Fm. Loma Montosa. b. Mapa Isocronopáquico entre la Discordancia Intravallangina e Intraliásica. c. Mapa isocronopáquico para la Fm. Mulichinco donde se observa la anomalía de espesor si se considera la existencia de la Fm. Mulichinco más allá del lineamiento del Río Colorado. Los colores fríos indican espesores máximos y los cálidos espesores mínimos.

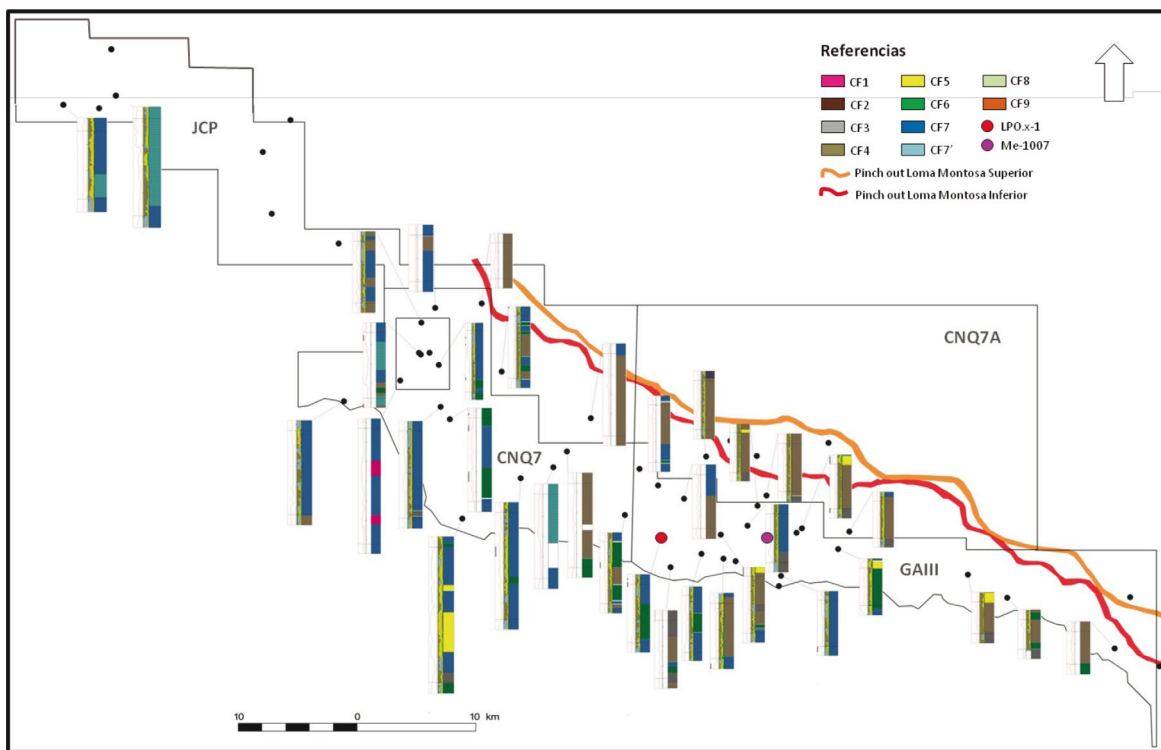


Figura 10. Mapa de pozos utilizados en el análisis. Se muestran a modo de ejemplo las facies de cutting y los perfiles para el intervalo inmediatamente por debajo de la discordancia Intravalanginiana.

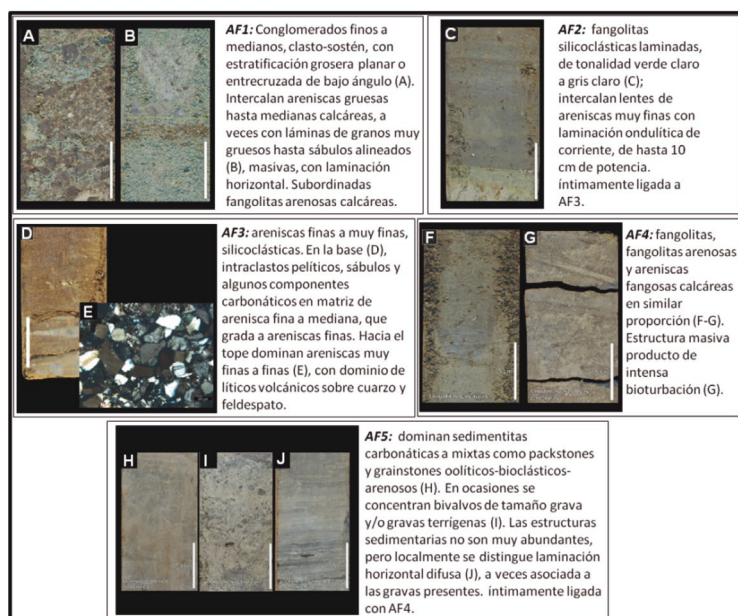


Figura 11. Asociaciones de facies de coronas definidas en los pozos Me-1007 y LPO.x-1. La barra blanca representa 5 cm.

CF1	Tobas, tobas arcillosas, arcilitas tobáceas subordinadas
CF2	Conglomerados y areniscas conglomerádicas rojo grisáceo-castaño rojizo, subordinadas arcilitas-limoarcilitas
CF3	Calizas finas (mud/wackestone), areniscas conglomerádicas, conglomerados (gris) y limoarcilitas
CF4	Conglomerados (gris), areniscas cong., areniscas M-G (gris claro) y arcilitas verdes
CF5	Areniscas finas a muy finas silicoclásticas, subordinadas fangolitas silicoclásticas
CF6	Limoarcilitas, arcilitas y fangolitas arenosas, areniscas finas calcáreas
CF7	Calizas gruesas dominantes (pack/grainstones), subord. conglomerados, areniscas calcáreas y limoarcilitas
CF7'	Areniscas calcáreas dominantes
CF8	Limoarcilitas y areniscas arcillosas verde, subord. areniscas F-MF y yeso /anhidrita
CF9	Limoarcilitas y arcilitas, verde pálido o castaño rojizas, subord. areniscas arcillosas y areniscas F-MF
CF10	Areniscas M-F o areniscas arcillosas (F-MF) gris claro, con limoarcilitas y arcilitas

Figura 12. Asociaciones de facies definidas en base a cutting

Resultados

Caracterización y Distribución de facies

Las asociaciones de facies en base a datos de corona pueden ser resumidas en 5 grupos (Fig. 11). Por su parte, en base al análisis del cutting, se definieron 10 asociaciones de facies de cutting (CF1 a CF10) (Fig. 12).

El ciclo estudiado fue dividido en dos intervalos estratigráficos discretos limitados por una superficie de carácter semiregional fácilmente identificable en perfiles y en sísmica. Por perfiles eléctricos este límite queda evidenciado por una marcada deflexión (incrementando la profundidad) a litologías “más limpias” en los perfiles SP y GR y hacia valores de mayor resistividad. A su vez sísmicamente el límite entre estos dos intervalos puede ser seguido a nivel regional como se mencionó previamente y coincide con un máximo de amplitud (Fig. 14). Esta superficie se trunca en relación de onlap contra el techo del Gr. Precuyo. Los dos ciclos que separa la mencionada superficie se designaron informalmente Loma Montosa Inferior y Loma Montosa Superior.

Loma Montosa Inferior

La Formación Loma Montosa es considerada contemporánea, en parte, de las Formaciones Vaca Muerta y Quintuco (Olmos y Sommerfeld, 2005; Leanza *et al.*, 2011), y se define a partir del primer registro de estratos de origen marino. En la zona de estudio, la base de dicha unidad está

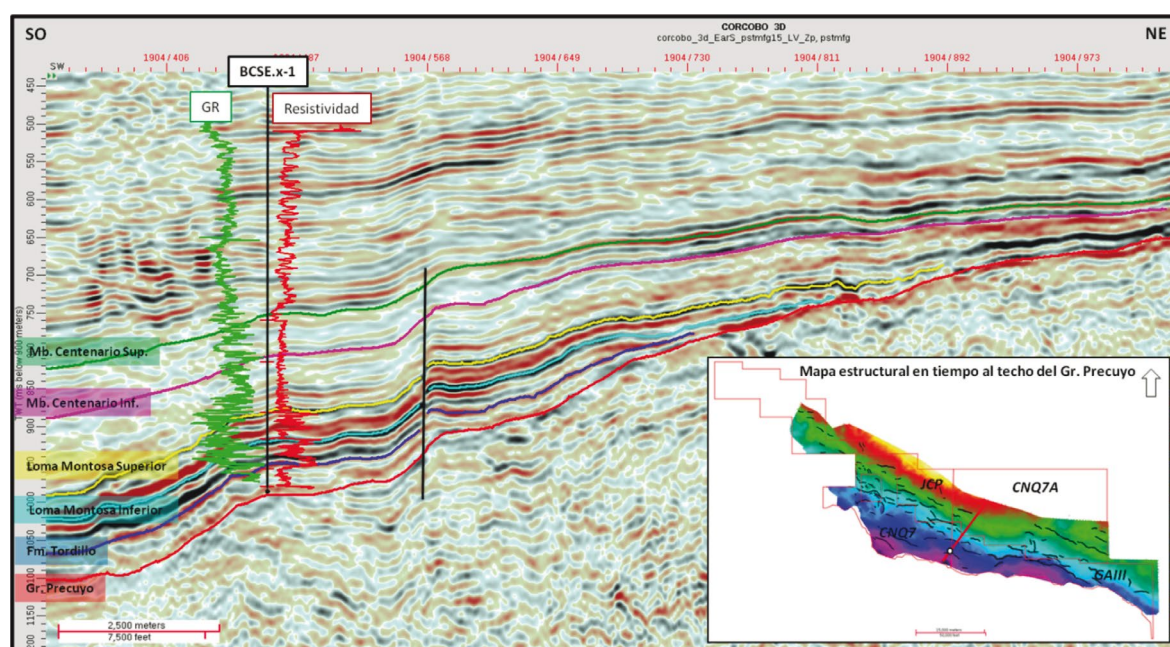


Figura 13. Inline del cubo PSTM del TPRC mostrando las superficies principales interpretadas y la extensión de los intervalos denominados Loma Montosa Superior e Inferior. Adicionalmente se muestra el pozo BCSE, donde los perfiles GR y resistividad muestran claramente los límites de estas subunidades.

dada por la primera aparición de calizas de grano fino y areniscas calcáreas subordinadas (CF3), o en su defecto, de conglomerados y areniscas con afinidad carbonática (CF4), que sobreyacen a conglomerados y areniscas conglomerádicas rojizos con subordinadas fangolitas asignadas a la Fm. Tordillo (CF2).

La unidad se adelgaza sustancialmente hacia el NE (Fig. 14 A-A'), con máximos espesores en la zona de estudio inmediatamente al N del Río Colorado con valores cercanos a 200 m, disminuyendo a espesores mínimos (< 20 m) en pozos al N del área de estudio, para finalmente acuñarse por onlap en el sector más septentrional de los bloques que conforman el TPRC.

Se observa la ausencia de la porción basal de esta unidad en el SE del bloque GAIII donde la misma no se habría depositado (Fig. 14 B-B'). El espesamiento de la secuencia en dirección OSO y la orientación del límite de onlap paralelo a la orientación del Río Colorado (Fig. 15) explican el mayor espesor de este intervalo en los pozos ubicados al SO del bloque CNQ7.

El análisis de facies por cutting dentro de Loma Montosa Inferior permitió definir una distribución espacial y secuencial. La sección basal presenta dos fajas de facies con características distintivas: una zona N con orientación ONO-ESE conformada predominantemente por las asociaciones CF3 y CF4, y una zona S en la cual se registra un predominio de la asociación de packstones y grainstones CF7 (Fig. 16a). La porción superior muestra tres zonas: una al N

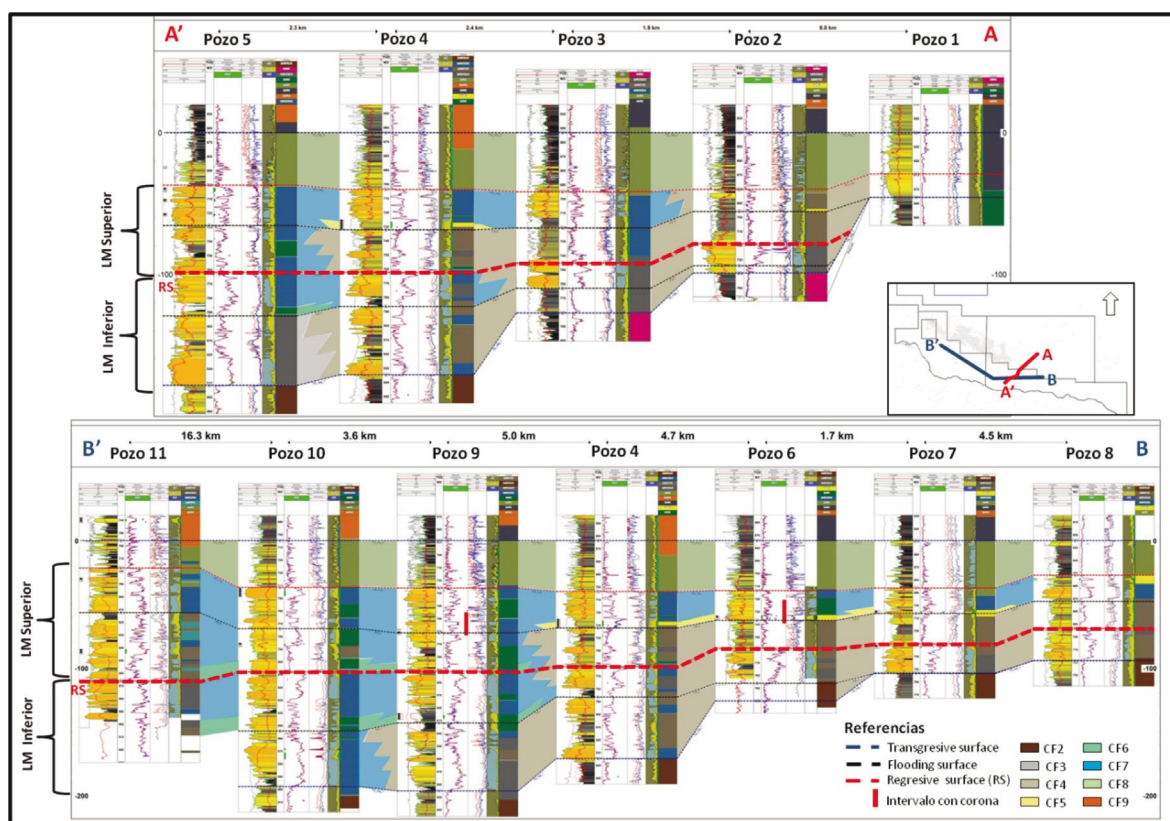


Figura 14. Corte estratigráfico por pozos nivelado a un marker interno del Mb. Inferior de la Fm. Centenario. Se muestra distribución de espesores, arreglo de facies de cutting y evolución secuencial.

dominada por las asociaciones CF3 y CF4, una intermedia representada por la asociación CF7, y finalmente, una al S-SO que se encuentra compuesta por una alternancia de asociaciones CF6 y CF7 (Fig. 16b).

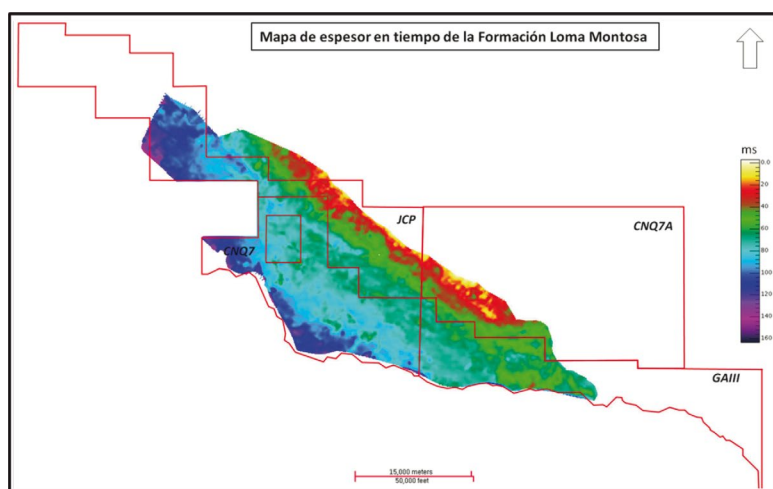


Figura 15. Mapa de espesor para Loma Montosa dentro del TPRC. Se destaca el aumento de espesor de la secuencia hacia el SO.

Sobre la base de la distribución de asociaciones de facies por cutting se definieron dos escenarios de sedimentación para el intervalo Loma Montosa Inferior. Un primer estadio donde en los sectores N y centro dominarían los depósitos de la asociación CF3 y CF4, es decir posibles condiciones de alta energía en ambientes costeros alternado con sedimentación carbonática de baja energía y hacia el O predominarían condiciones marinas someras mixtas a carbonáticas (CF7). El segundo estadio estaría limitado por una superficie de inundación en su base y caracterizado por una expansión del ámbito de acumulación, donde se reconocen las tres fajas de facies previamente mencionadas.

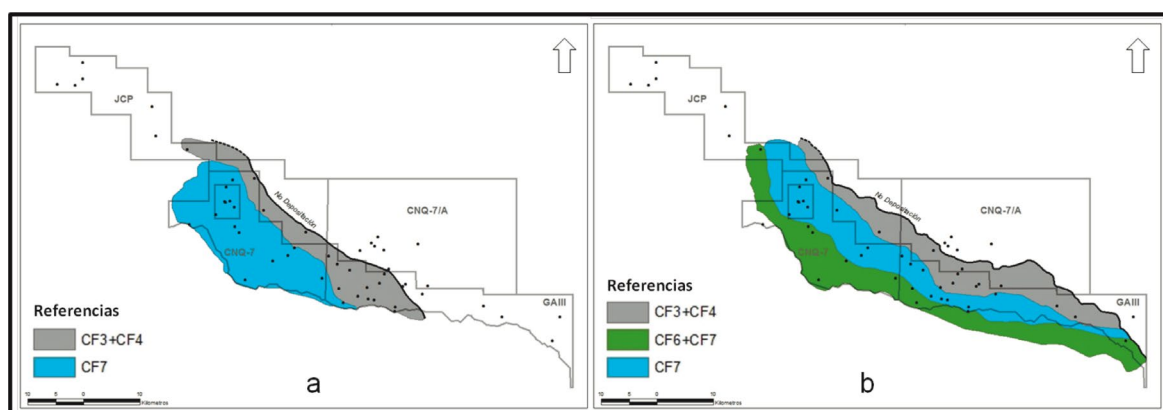


Figura 16. a: Mapa de facies de cutting para el ciclo basal de Loma Montosa Inferior. b: Mapa de facies de cutting para el ciclo cuspidal de Loma Montosa Inferior

Loma Montosa Superior

En los bloques que constituyen el TPRC la base de este intervalo estratigráfico se define por información sísmica, aunque también presenta expresiones características en facies y registros de pozos. En algunos casos este límite podría representar un pasaje de la asociación CF3 a CF4, que representaría un incremento en la proporción de facies con dominio de componentes silicoclásticos respecto de material carbonático, pero en otros casos dicho límite quedaría dentro de intervalos asignados a la asociación de facies por cutting CF4 (Fig. 14). Por otra parte, hacia los sectores suroccidentales del área de estudio, la base de la unidad correspondería aproximadamente con una superposición entre intervalos dominados por la asociación CF7 (Fig. 14), ya registrada en el infrayacente Loma Montosa Inferior.

Por lo tanto, este límite no viene asociado en ningún sector del área de estudio a una reorganización de los sistemas de acumulación correlacionable con un brusco descenso relativo del nivel de base, como habría de esperarse si este intervalo se correspondiera temporalmente con la Formación Mulichinco (Schwarz *et al.*, 2011, 2014). Se interpreta entonces a este nivel como una superficie regresiva de menor jerarquía. Significativamente, en el Yacimiento Señal Picada, ubicado inmediatamente al S del Río Colorado, la Formación Loma Montosa también ha sido dividida en dos intervalos estratigráficos principales y el límite entre ellos fue interpretado como una posible superficie regresiva (Manestar *et al.*, 2014). Sin embargo, estudios sísmicos y sedimentológicos adicionales son necesarios a fin de establecer correlaciones más ajustadas entre ambas regiones.

El ciclo Loma Montosa Superior presenta un espesor que varía desde valores menores a 20 m en el sector NE, hasta valores próximos a los 100 m en el extremo opuesto del TPRC (Fig. 14). En el sector N, la porción basal presenta un predominio de facies CF4 que prevalecen en la mitad superior, a excepción de la zona del Yacimiento Mendieta, donde se destaca la presencia de areniscas cuarzosas correspondientes a la asociación de facies CF5, equivalente a la AF3 de coronas. La porción central de los bloques presenta grainstones y packstones oolíticos correspondientes a la CF7, que posee una distribución NO-SE y que grada hacia el S a facies CF6 y CF7 (Fig. 17a). La porción superior de este intervalo marca una expansión de las facies CF7 y CF6 hacia el N y, como se mencionó previamente, un sector N donde prevalecen las asociaciones CF4 y CF5 (Fig. 17b).

La configuración paleoambiental del intervalo Loma Montosa Superior, inferida sobre la base de la distribución vertical y lateral de las asociaciones de facies por cutting y testigos de corona, muestra tres momentos claves de su evolución. El primer estadio correspondería a una somerización leve con respecto a la situación del tope de Loma Montosa Inferior y el sistema habría comenzado a progradar ligeramente mar adentro (Fig. 14). Posteriormente habría existido otra inundación relativa. En este nuevo escenario luego de la transgresión, se habrían configurado condiciones costeras diferentes, con la aparición de material silicoclástico dominante en el E del

área de estudio (Fig. 17a), que habría desencadenado la acumulación de los cuerpos arenosos correspondientes a los reservorios productivos del Yacimiento Mendieta (Rincón, *et al.*, 2014). Hacia el NO, el ambiente costero habría tenido las mismas condiciones que en el estadio anterior. Por su parte, la configuración final de Loma Montosa Superior habría estado caracterizada por una amplia región dominada por un ambiente marino somero, predominantemente mixto y sólo las porciones más proximales ubicadas en el extremo N, habrían quedado en condiciones de ambiente costero (Fig. 14).

El contacto superior de la Formación Loma Montosa, representa un cambio vertical abrupto de facies en toda el área de estudio, ya que inmediatamente por arriba de esta unidad se registra una sucesión caracterizada por facies silicoclásticas pelíticas rojizas con intercalaciones de yeso/anhidrita (Schwarz, 2015). Si bien es difícil realizar una asignación paleoambiental, estos depósitos sugieren un ambiente predominantemente subaéreo, tal vez vinculado a un medio marino no muy distante. Similar interpretación se propuso para sectores de Cerro Huanul Sur (Veiga y Schwarz, 2010) y el yacimiento Señal Picada (Manestar *et al.*, 2014) para la base del Mb. Centenario Inferior.

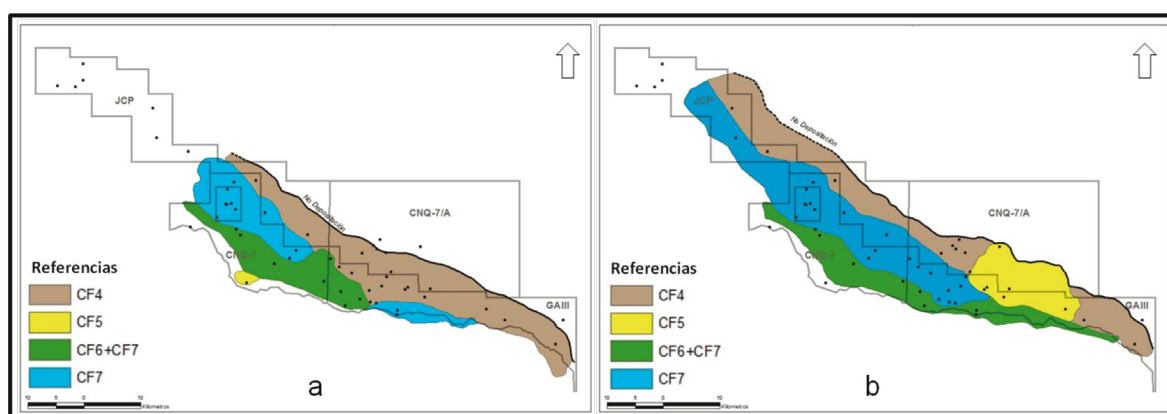


Figura 17. a: Mapa de facies de cutting para el ciclo basal de Loma Montosa Superior. b: Mapa de facies de cutting para el ciclo cuspidal de Loma Montosa Superior.

ANÁLISIS DE INTEGRACIÓN DE ESCALAS

El análisis integral de los resultados obtenidos en las tres escalas de trabajo abordadas en este estudio (macro, meso y micro), permitió arribar a una interpretación secuencial y paleoambiental del intervalo definido como Formación Loma Montosa en los bloques del TPRC. Adicionalmente, se discutió el potencial prospectivo remanente para esta unidad.

Evolución secuencial

El análisis integral de la información de testigos de corona, la descripción de cutting, perfiles e información sísmica, permitió reconocer una evolución secuencial unificada para toda el área de

estudio. El ciclo de sedimentación asignado en este trabajo a la Formación Loma Montosa, estaría limitado en su base por una superficie transgresiva regional y representaría el equivalente parcial de las unidades Quintuco y Vaca Muerta de otros sectores internos de la cuenca. Esta superficie basal finaliza en el sector N y NE de los bloques en relación de onlap sobre depósitos del Gr. Precuyo. Al menos una superficie regresiva y dos superficies transgresivas de menor jerarquía o superficies de inundación podrían definirse adicionalmente dentro del ciclo Loma Montosa. La superficie regresiva definida dentro del área de estudio correspondería aproximadamente con el límite entre Loma Montosa Inferior y Superior. Por su parte las superficies transgresivas, la primera dentro de Loma Montosa Inferior y la segunda dentro de Loma Montosa Superior, habrían generado expansiones del ámbito de sedimentación y profundización en forma relativa. Cabe destacar que hacia el N y NE la base de este ciclo y los subciclos internos se harían cada vez más jóvenes, posiblemente por yuxtaposición de distintas superficies de inundación de distinta jerarquía.

Por encima del ciclo de sedimentación Loma Montosa, se produce una fuerte reconfiguración paleogeográfica. El ciclo de sedimentación que la suprayace se encuentra limitado por una discordancia de carácter regional. La interpretación paleoambiental sugiere extensos ambientes marinos someros mixtos a carbonáticos que habrían quedado expuestos en forma subaérea, ya que por encima se acumularon depósitos silicoclásticos finos con evaporitas, interpretados en forma genérica como de ambientes continentales, posiblemente asociados lateralmente con un medio marino. La ausencia de este tipo de depósitos en el ciclo de sedimentación subyacente, y el cambio deposicional abrupto hacen pensar en un límite regresivo de carácter regional. En función de la evolución secuencial del Grupo Mendoza en otras regiones de la cuenca (Leanza *et al.*, 2011; Schwarz *et al.*, 2011), esta superficie regresiva podría ser un candidato para representar el descenso relativo del nivel del mar del Valanginiano Temprano, durante el cual extensas áreas de la plataforma marina previa quedaron expuestas. Dado el carácter marginal de los bloques que constituyen el TPRC dentro de la cuenca, la acumulación de las sedimentitas continentales finas del Centenario “basal” muy probablemente no se correlacione directamente con la Fm. Mulichinco depositada hacia sectores internos, sino que este intervalo podría haberse formado hacia los estadios póstumos de la cuña de mar bajo, o bien en el inicio de la transgresión de largo término subsecuente, la cual eventualmente permitiría la acumulación de sedimentitas marinas profundas en el centro de cuenca.

Interpretación Paleoambiental

En base a las asociaciones de facies definidas, las superficies que las delimitan y sus diseños internos, se asocia al intervalo estudiado con sistemas de acumulación mixtos, de rampa o shoreface mixtos. En dichos sistemas, coexisten procesos de aporte y sedimentación terrígena en forma simultánea con procesos de producción y acumulación carbonática (Mount, 1984). A

partir del análisis de sísmica 3D y de estudios regionales previos (e.g. Legarreta y Uliana, 1991), se observa que las geometrías son de muy bajo ángulo ($< 1^\circ$), consistentes con el desarrollo de una rampa o shoreface mixto.

Los sistemas de rampas como el que aquí se interpreta presentan fajas relativamente paralelas a la línea de costa como las aquí observadas (Tucker *et al.*, 1993; Wright y Burchette, 1996). Adicionalmente, la mezcla de materiales es relativamente eficiente (homogénea) en todo su desarrollo, debido a la falta de una barrera eficaz para la exportación de sedimentos silicoclásticos hacia condiciones de costa afuera.

En ese contexto, los conglomerados finos a medianos, clasto sostén, correspondientes a la asociación de facies de corona AF1 y CF4/CF3 de cutting, sugieren un dominio de corrientes acuosas poco canalizadas, unidireccionales, de alta capacidad de carga y selección. Se interpreta que esta asociación representa condiciones de ambiente marino de playa a muy somero, sujeto a la acción de olas de buen tiempo. Facies similares, denominadas “conglomerados calcáreos” por Olmos y Sommerfeld (2005), fueron interpretados en sucesiones de la Formación Loma Montosa en el yacimiento Medanito. En esa localidad, los “conglomerados calcáreos” rematan sucesiones somerizantes y gradan desde facies carbonáticas a mixtas acumuladas en sectores más distales de rampa interna. Conglomerados calcáreos también se han descripto dentro de la Fm. Loma Montosa, en el Yacimiento Señal Picada (Manestar *et al.*, 2014). Allí también se encontrarían asociados a los topes de sucesiones somerizantes y representarían condiciones marinas costeras de alta energía.

Por su parte las fangolitas arenosas y areniscas fangosas calcáreas de las asociaciones AF4 y CF6 de corona y cutting respectivamente, reconocidas en este estudio se interpretan como el resultado de la acumulación en condiciones dominantes de transición entre offshore y shoreface de dicho sistema mixto (Fig. 18).

La asociación de facies AF5 de corona, equivalente a CF7 en cutting, se habría acumulado en la región del shoreface de este sistema (Fig. 18). En este sentido, la acumulación de packstones y grainstones oolíticos-bioclásticos-arenosos se habrían formado bajo la influencia de corrientes asociadas al oleaje, e.g. longitudinales y de retorno, donde la proporción de componentes silicoclásticos varía ampliamente desde grainstones con sólo 25% de granos terrígenos, hasta packstone-grainstones con hasta 50% de dichos granos, mostrando una amplia variabilidad en la mezcla de componentes.

En las rampas con acumulaciones carbonáticas a mixtas como la aquí propuesta, es común el desarrollo de regiones de albufera relativamente angostas y someras (Tucker *et al.*, 1993; Wright y Burchette, 1996). Hacia el sector continental del ámbito de albufera, la llegada de material silicoclástico (fango y arena) transportado por canales terminales costeros rápidamente se acumula generando depósitos con mayor proporción relativa de terrígenos. En este contexto, las areniscas silicoclásticas, muy finas a finas y con predominio de líticas volcánicas (40-50%),

sobre cuarzo y feldespato (LCV, 2014), de la asociación de facies de corona AF3 y CF5 de cutting, corresponderían a los sectores más internos del sistema mixto (Fig. 18). La asociación AF3, podría entonces constituir el resultado de la acumulación en los sectores terminales de un canal costero entrando en una albufera. Estos cuerpos canalizados poseen carga mixta (arenas y fangos), y al desembocar en la albufera producen acumulaciones arenosas enriquecidas en silicoclásticos en forma de lóbulos, cuyo material es luego parcialmente retrabajado para formar playas lineales. En posiciones más profundas, en las barras asociadas a la rampa somera o shoreface mixto, se registra la máxima energía de olas y por lo tanto se suele concentrar la mayor proporción de componentes carbonáticos y la menor proporción de fango. Los sistemas mixtos actuales de baja pendiente que se desarrollan en algunas regiones del nordeste brasileño podrían utilizarse como análogos para la caracterización de esta zona (Fig. 19).



Figura 19. Imagen satelital (tomada de Google Earth) de un sector de la costa actual del N del estado de Alagoas (Brasil). Se caracteriza por un sistema mixto con aporte de material terrígeno desde el continente y producción carbonática en sectores de alta energía (rampa somera/shoreface). El material silicoclástico se concentra cerca de la costa, pero debido a la ausencia de una barrera efectiva también es exportado en proporciones menores hacia zonas más distales (transición al offshore).

Potencial Hidrocarburífero

Desde el punto de vista del potencial hidrocarburífero, la unidad Loma Montosa en el TPRC presenta un play comprobado y delimitado en el Yacimiento Mendieta, que a la fecha lleva acumulados 27 Mm3 (miles) con 5 pozos en producción. Una caracterización detallada del mismo puede encontrarse en el trabajo de Rincón *et al.*, 2014. Si bien la interpretación paleoambiental y la asignación de los horizontes productivos difiere a lo establecido en este trabajo, el mismo presenta una descripción detallada del Yacimiento. La posibilidad de encontrar facies reservorio, similares a las de Mendieta, en otras posiciones del TPRC queda supeditada a la definición más precisa de una potencial paleo línea de costa irregular, que permita encontrar la entrada de arenas como las

desarrolladas en el Yacimiento Mendieta. Sin embargo, de acuerdo a lo observado en este trabajo, el sector NO de los bloques estudiados correspondería a una profundización del sistema con facies marinas extendiéndose a sectores más septentrionales.

Alternativamente, se considera un nuevo play que correspondería a facies carbonáticas de alta energía dadas por grainstones y packstones correspondientes a un ambiente de rampa somera, y que con una adecuada estimulación podrían constituir un reservorio productivo. Un ejemplo de esto se encuentra en los pozos BCSE.x-1 (Barda Cortada Sureste), ECo.a-2 (El Corcobo) y ElCo.x-1 (El Complejo) todos correspondientes al bloque CNQ7. Si bien las porosidades de los mismos son bajas, con valores no mayores a 10% de acuerdo a la interpretación petrofísica, la estimulación mediante fracturas de tamaño limitado (350 bolsas) han demostrado que potencialmente podrían alcanzarse productividades de hasta 25 m³/d de petróleo. Estudios adicionales deben ser realizados a fin de definir si el entrapamiento corresponde a trampas estructurales, como se observa en BCSE.x-1 y ECo.a-2, o a una potencial variación lateral de facies, donde el entrapamiento estaría asociado a variaciones en la porosidad, sea de origen primario o por diagénesis (ElCo.x-1). Este segundo caso sería mucho más interesante desde el punto de vista prospectivo, ya que la extensión potencial del recurso podría abarcar gran parte de los bloques que constituyen el TPRC. De acuerdo a los resultados presentados en este trabajo, ambos plays quedarían enmarcados dentro del intervalo estratigráfico Loma Montosa Superior (Fig. 14).

CONCLUSIONES

En base a un estudio que abarcó múltiples escalas de trabajo y metodologías se logró definir, dentro del marco cronoestratigráfico de la Cuenca Neuquina, un intervalo de sedimentación carbonático-silicoclástico en la zona del TPRC; asignándole a este una edad Tithoniana-Valanginiana y correlacionándolo litoestratigráficamente con los depósitos de la Fm. Loma Montosa. Adicionalmente, se interpretó un modelo de rampa mixta para este ciclo. La caracterización de facies, su interpretación paleoambiental, así como su evolución vertical y distribución geográfica resultaron de gran importancia para evaluar y definir el potencial hidrocarburífero remanente de este intervalo. Si bien cada unidad sedimentaria presenta desafíos particulares desde el punto de vista de la exploración de hidrocarburos, se destaca que el enfoque multiescala aquí presentado constituye una metodología de trabajo sólida, que permite arribar a mejores modelos geológicos para la definición de nuevos plays en zonas exploratorias tanto inmaduras como maduras. Particularmente para los bloques que integran el TPRC, la implementación de esta metodología permitió definir un nuevo play para la unidad Loma Montosa, asociado a reservorios carbonáticos gruesos de alta energía. El mismo podría involucrar un área considerable para la continuación de la exploración en el borde de la Cuenca Neuquina.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a Pluspetrol S.A., YPF S.A, Pampa Energía S.A. y Enarsa S.A. por autorizar la publicación; a Ignacio Cambón por la lectura crítica del manuscrito; a María Silvia Castro por la ayuda con las imágenes; y a Carlos Arregui y Osvaldo Carbone por sus comentarios para mejorar el trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Cevallos, M.F., Vaamonde, D., Rivero, M., Rojas, C., Kim, H.J., Galarza, T. y Legarreta, P., 2011. Exploración y desarrollo del tren de petróleo pesado del Río Colorado, margen nororiental de la Cuenca Neuquina. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, IAPG, 2011, p. 27-52.
- Digregorio, J. H., 1972. En: Leanza, A. F. (Ed.). Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias., pp. 439-505. Córdoba.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A.R., Digregorio, R.E., 1984. Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano-Valanginiense (Formaciones Vaca Muerta, Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la provincia de Neuquén. En: Actas del IX Congreso Geológico Argentino, Bariloche 1, 221-235.
- Howell, J.A., Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Veiga, G.D., 2005. The Neuquén Basin: an Overview. En: The Neuquén Basin, Argentina: a case study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics (Eds. Veiga, G., Spalletti, L., Howell, J. A. and Schwarz, E.), Geological Society of London, Special Publications, v. 252, pp. 1-14.
- LCV, 2014. Estudio sedimentológico, petrográfico, diagenético, mineralógico, de MEB y bioestratigráfico. Buenos Aires, Informe Interno Pluspetrol.
- 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, pp. 429-450.
- Leanza, H.A., Sattler, F., Martinez, R.S. y Carbone, O., 2011. La Formación Vaca Muerta y equivalentes (Jurásico Tardío-Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Relatorio Evolución paleoambiental y análisis secuencial del Grupo Mendoza en GA III (La Pampa) - Ernesto Schwarz 55 del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén (Eds. Leanza, H., Vallés, J., Arregui, C. y Danieli, J.C.). Capítulo 11, pp. 113-129.
- Manestar, G., Thompson, A., Gómez Rivarola, L., Mykietiuik, K., 2014. Reservoir Characterization and Estimating EOR Potential with a Sector Model Simulation of Señal Picada, a Large Mature Field in Argentina. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, SPE 169367. Maracaibo, Venezuela
- Mount, J.F., 1984. The mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. Geology, 12, pp. 432-435.

- Olmos, M. y Sommerfeld, V., 2005. Trampas características de la Formación Quintuco en la región de la Plataforma nororiental de la Cuenca Neuquina. En: Kozlowski, E. Vergani, G. & Boll, A. (Eds.): Las trampas de hidrocarburos en las Cuencas productivas de Argentina. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas, pp. 225-237. Mar del Plata.
- Pereira, D. M., Vargas Oviedo, R. A., 2017. Interpretación Regional Sísmico-estratigráfica de la Plataforma Nororiental (PN) Neuquina y análisis de la Formación Mulichinco. Informe Interno de Pluspetrol.
- Petrel Robertson Consulting Ltd., 2008. Report Petro Andina well: La Pista Oeste, La Pampa, PAR. LP.LPO.x-1. Informe Interno de Pluspetrol (Inédito). 7 pp. Buenos Aires.
- Rincón, M.F., Gutiérrez, R., Kim, H.J., Muzzio, M.E., 2014. Descubrimiento del yacimiento Mendieta e interpretación paleoambiental de la Formación Mulichinco en el borde noreste de la Cuenca Neuquina. En: Trabajos Técnicos del IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, pp. 49-69. Mendoza, Argentina.
- Schwarz, E., Spalletti, L.A. y Veiga, G.D., 2011. La Formación Mulichinco (Valanginiano). En: Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la provincia del Neuquén (Eds. Leanza, H., Vallés, J., Arregui, C. y Danieli, J.C.). Capítulo 12, pp. 131-144.
- Schwarz, E., Veiga, G.D., Spalletti, L.A., 2014. High-frequency Carbonate-Siliciclastic Interactions in Siliciclastic-Dominated Systems: Distinguishing between Coeval and Reciprocal Sedimentation in a Lower Cretaceous Epeiric Sea. 2014 AAPG/SEPM Annual Convention and Exhibition, formato digital. Houston, USA.
- Schwarz, E., 2015. Evolución Paleoambiental y Análisis Secuencial de la sucesión Loma Montosa-“Mulichinco”-Centenario Inferior en el Bloque Gobernador Ayala III (Provincia de La Pampa). Informe Interno de Pluspetrol (Inédito). 69 pp.
- Spalletti, L., Franzese, J., Matheos, S. y Schwarz, E., 2000. Sequence stratigraphy of a tidally dominated carbonate-siliciclastic ramp, the Tithonian of the southern Neuquen Basin, Argentina, *Journal of the Geological Society, London*, v. 157, pp.433-446.
- Tucker, M.E., F. Calvet y D. Hunt, 1993. Sequence stratigraphy of carbonate ramps: systems tracts, models and application to the Muschelkalk carbonate platforms of eastern Spain. En H.W. Posamentier, C.P. Summerhayes, B.U. Haq y G.P. Allen (Eds.), *Sequence stratigraphy and facies associations*. International Association of Sedimentologists, Special Publication 18, p. 397-415.
- Veiga, G.D. y Schwarz, E., 2010. Paleoenvironmental and sequence-stratigraphic characterization of the Loma Montosa and Lower Centenario Formations (Well CoHS-53), Northeastern Neuquén Basin, Argentina. Informe preparado para Petro Andina Resources Inc. (Inédito). 26 pp.
- Vergani, G.D., A.J. Tankard, H.J. Belotti y H.J. Welsink, 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En A.J. Tankard, R.S. Soruco, y H.J. Welsink (Eds.), *Petroleum Basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists, Special Publication 62:383-402. Tulsa.
- Wright, V.P. y T.P. Burchette, 1996. Shallow-water carbonate environments. En H.G. Reading (Ed.), *Sedimentary Environments: processes, facies and stratigraphy*, 3rd. Blackwell Science, Oxford, 325-391 pp.

