

Premio *Luis Alberto Rey* al mejor Trabajo Técnico del VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos

Análisis estratigráfico de alta frecuencia del límite kimmeridgiano-tithoniano en el subsuelo de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina

Por **Martín F. Cevallos**, Petro Andina Ltd

Introducción

El área del presente trabajo abarca la región central de la Dorsal de Huincul y las regiones al sur de la misma, desde Anticlinal Campamento al oeste hasta Bajo Baguales al este, y desde meseta Buena Esperanza al norte hasta cerro Vagón al sur. Temporalmente se focaliza al límite kimmeridgiano-tithoniano, donde se dan una serie de eventos claves para el sistema petrolero Vaca Muerta.

Se define una serie de superficies claves, que en la Dorsal de Huincul se aproximan haciendo muy compleja su discriminación. Las superficies definidas permiten caracterizar e interpretar la génesis de las unidades que limitan.

La sucesión de facies y las geometrías de los cortejos sedimentarios permiten inferir una evolución estratigráfica par-

ticular, ocasionada por la inundación rápida de la cuenca. Se presentará una analogía con el caso de la ingresión marina al mar Negro (7150 años antes del presente), que registró un ascenso de nivel lacustre a marino de 120m en un lapso de tres años (Ryan y Pittman, 1998). En ambos casos, el cortejo sedimentario transgresivo es donde se registran las mayores diferencias con los modelos clásicos (Vail, 1987), por lo que se presentará un modelo estratigráfico secuencial alternativo.

Antecedentes

El carácter anormal de los cortejos sedimentarios de la formación Vaca Muerta se visualizaron tempranamente (Groeber, 1918). Mutti *et al.* (1994) generan un modelo estratigráfico

secuencial alternativo al clásico (Vail, 1987; Van Wagoner *et al.*, 1990) que describe el efecto del arco magmático occidental en la relación entre la cuenca y el mar abierto. En este modelo, los depósitos de nivel bajo son exclusivamente continentales, *total lowstands*, y cubren abruptamente los depósitos marinos que suelen culminar con evaporitas. Las inundaciones marinas subsiguientes son tan rápidas que no generan migración de facies, y el mar alcanza sin transición las posiciones marginales de la cuenca, sin mostrar relaciones de traslape (*onlaps*) sobre los depósitos de nivel bajo. Posteriormente, Legarreta (2001 y 2002) describe los cuatro episodios de *total lowstands* en la cuenca, a los que llama eventos de desecación total, y sus posteriores inundaciones rápidas (figura 1). El autor desarrolla modelos

de mayor detalle en eventos cretácicos y presenta mapas con la extensión areal de los cortejos sedimentarios de cada evento. En Boll y Valencio (1996) se presenta un análisis estratigráfico detallado del intervalo kimmeridgiano-tithoniano en la región oriental de la Dorsal de Huincul (con foco en el área Los Bastos). En el citado trabajo se aplican conceptos de estratigrafía secuencial clásica (Vail 1987; Van Wagoner *et al.*, 1990) y se interpreta una arena transgresiva basal como base de la formación Vaca Muerta.

Marco tectónico

Durante el Triásico Superior-Jurásico Inferior, en la Dorsal de Huincul se desarrollaron una serie de depocentros elongados en dirección OSO-ENE y E-O, con bordes "más activos" al sur que corresponden al *rift* inicial de la cuenca (Uliana *et al.*, 1989; Vergani *et al.*, 1995; Gómez Omil *et al.*, 2002). Se pueden describir dos sistemas de fallas maestras. Uno de ellos se habría alineado a los yacimientos cerro Bandera, Loma Negra, Guanaco Huincul-Octógono. El otro se ubicaría más al sur, aflorando en cerro Granito y continuando en dirección E-O Divisadero-Barda Colorada Este, Ranquilco Norte, Puesto Touquet, presentando expresión superficial en casi

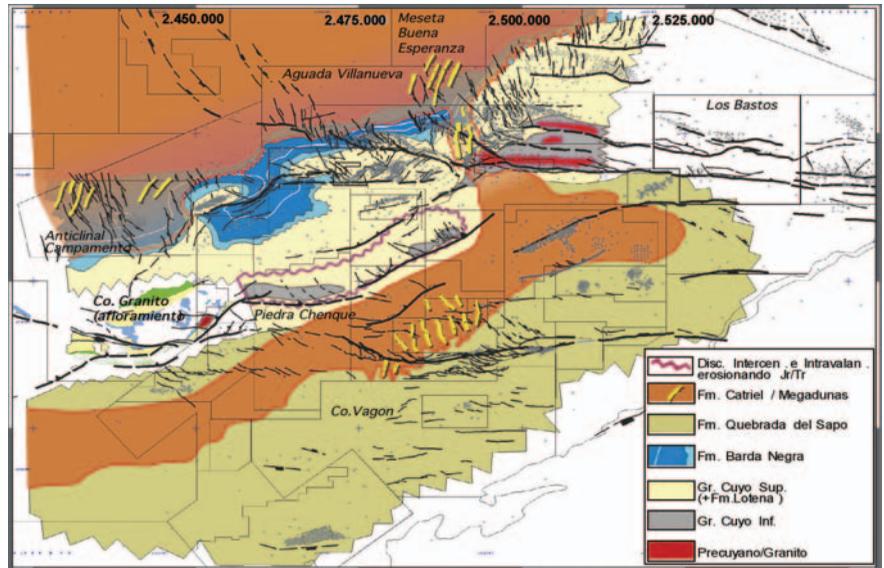


Figura 2. Mapa de subafloramiento debajo de la inundación tithoniana.

toda su traza (falla del Divisadero). Este sistema generó el depocentro más espeso del Grupo Cuyo inferior (Gómez Omil *et al.*, 2002 y Veiga *et al.*, 2002). Ambos sistemas tienden a coalescer en la zona de Bajo Baguales y de ahí continúan paralelos y a veces amalgamados hacia el este-sureste, donde se definen como fallas de Challacó y Huincul (Mosquera, 2002). En esta etapa predominantemente distensiva se alternan eventos compresivos que generan discordancias erosivas y rellenos sintectónicos dentro de los depocentros (Ploszkiewicz *et al.*, 1984; Vergani *et al.*, 1995; Cruz *et al.*, 2002; Gómez Omil *et al.*, 2002; Mosquera, 2002). Esto se interpreta como fases de inversión incipientes y/o efectos de una fase transensiva regional que localmente produce fajas compresivas en zonas de acomodación. En el Jurásico superior domina la compresión con empuje oblicuo-transpresión-, la cual perdura hasta el Cretácico Superior. Estos episodios invierten los depocentros de los Grupos Precuyano y Cuyo, con desplazamientos horizontales dextrógiros y verticales de vergencia dominante al sur y sureste. Diversos aportes describen las evidencias de la deformación Jurásica-Cretácica en la región (Bettini, 1984; Zavala 1993; Vergani *et al.*, 1995; Zavala y González, 2001; Freire *et al.*, 2002, entre otros). Si bien estos episodios de transpresión comenzaron en el Jurásico Inferior (Vergani *et al.*, 1995; Gómez Omil *et al.*, 2002; Mosquera, 2002), el clímax se produce recién en el

kimmeridgiano. La discordancia intramálmica muestra en varias localidades niveles de erosión muy profundos, incluso llegando a obliterar por completo al Grupo Cuyo (Bajo Baguales, Dadín, cerro Granito, figura 2). El epicentro de los eventos Cretácicos subsiguientes, con picos de actividad en el Valanginiano y Cenomaniano, se desplazó gradualmente hacia el sur. La discordancia intravalanginiana 126Ma (Gulisano, 1983) tiene su mayor expresión en la zona de Bajo Baguales, donde erosiona hasta términos basales del Grupo Cuyo Inferior y granitos Prejurásicos. Durante la transpresión cenomaniana se invierten principalmente los depocentros jurásicos más australes, formando una serie de estructuras anticlinales desde Co. Granito, Divisadero, Ranquilco Norte, Puesto Touquet. La discordancia intracenomaniana (94Ma, Keidel, 1925) sobre este tren de estructuras erosiona todo el Grupo Mendoza y el Grupo Cuyo Superior (figura 2). Ambos picos cretácicos de inversión coexisten con estructuras distensivas a lo largo de todo el flanco norte de la Dorsal, arreglos locales de tipo *pull-apart* y mediciones de desplazamientos horizontales de uno y hasta más de dos kilómetros. La presencia coetánea de estas estructuras distensivas que flanquean la región invertida, no podría ser explicada con una compresión norte-sur, por ello se habla de inversión transpresiva. La migración al sur de los episodios de inversión fueron la clave para que las estructuras y los

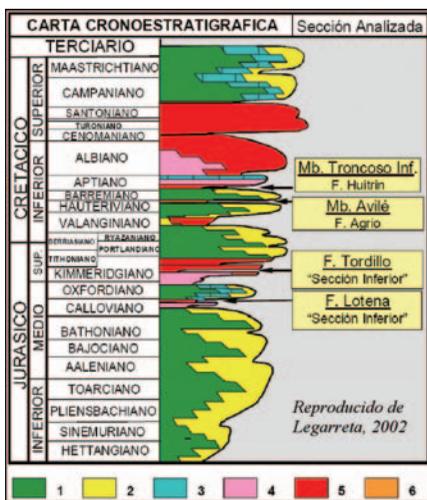


Figura 1. Carta cronoestratigráfica reproducida de Legarreta (2002) ubicando los eventos de desecación de la Cuenca Neuquina. (1) Cuenca interior a costa afuera. (2) Plataforma a litoral y no marino. (3) Carbonatos de plataforma. (4) Evaporitas. (5) Fluvial y eólico. (6) Barreal.

arreglos estratigráficos del Jurásico y Cretácico Inferior se preservaran en la extensa zona de acumulaciones de hidrocarburo en reservorios "pretithonianos", adosados al flanco norte del "eje jurásico" de la Dorsal de Huincul.

Marco estratigráfico

La estratigrafía de la Cuenca Neuquina ha sido intensamente estudiada. Se hará una breve reseña sobre la estratigrafía local (Dorsal de Huincul y margen sur de la cuenca), restringida temporalmente al intervalo discutido en el presente trabajo, es decir, desde el calloviano al tithoniano. Para más detalles se refiere a la bibliografía específica más reciente (Legarreta y Gulisano, 1989; Zavala, 1993; Gulisano y Gutiérrez Pleimling, 1994; Legarreta y Uliana, 1996; Limeres, 1996; Zavala y Freije, 2002; Gómez Omil *et al.*, 2002).

Los eventos del Jurásico Superior-Cretácico Inferior tienen gran expresión en sectores al norte de la Dorsal de Huincul, pero a medida que nos acercamos a ella, las superficies limitantes tienden a coalescer (figura 3). Principalmente en el kimmeridgiano se produjo la mayor supresión de la columna jurásica por la truncación de las formaciones Barda Negra, Lotena y Lajas a medida que nos acercamos a la Dorsal desde el norte (figuras 3 y 4). A su vez, las unidades continentales que suceden a este evento de erosión regional (discordancia intramálmica) están escasamente representadas en la Dorsal de Huincul, acentuando la pérdida de columna estratigráfica. El presente trabajo se enfoca entre la discordancia intramálmica y la superficie de máxima inundación tithoniana. El relleno posdiscordancia intramálmica corresponde a una sucesión continental relacionada al levantamiento regional por compresión/transpresión y la regresión total del mar en la cuenca englobados dentro de la formación Tordillo ("Total Lowstand System Track", Mutti *et al.* 1994). Su base es claramente erosiva en los paleoaltos jurásicos y hacia el centro de cuenca erosiona sutilmente o es paraconcordante a la formación Auquilco (figuras 2 y 5). Los productos de la erosión se asocian principalmente a las secciones aluviales y fluviales de las formaciones Sierras Blancas (plata-

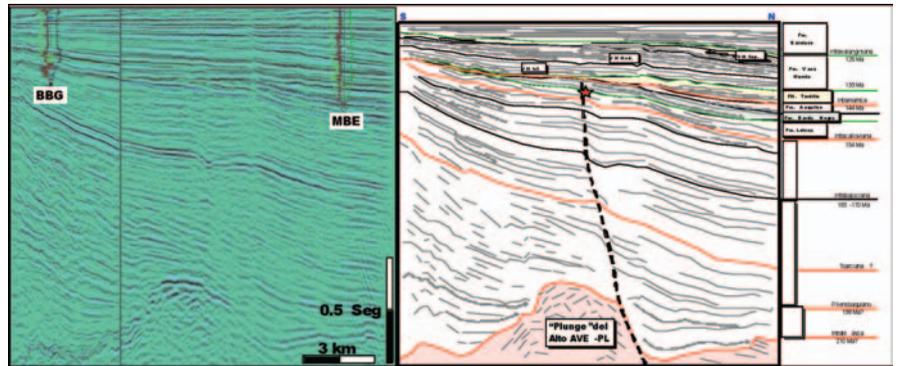


Figura 3. Línea sísmica N-S nivelada en la formación Quintuco, desde Al norte de la dorsal hasta meseta Buena Esperanza. La sección calloviana-kimmeridgiana está bien desarrollada al norte y, hacia el sur, las superficies limitantes se juxtaponen dejando relictos erosivos y sedimentarios.

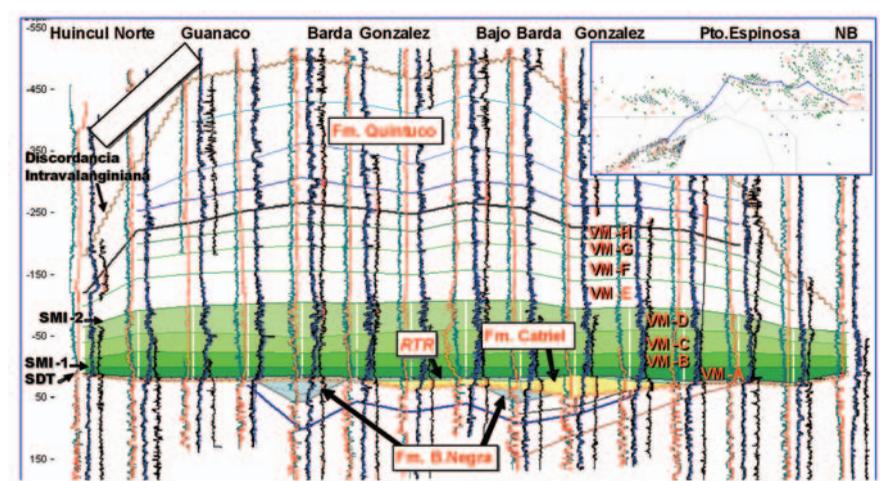


Figura 4. Sección de correlación aplanada a la máxima inundación de formación Vaca Muerta (SMI-1). Se destaca el carácter erosivo de la disc. intramálmica (SDT) y la presencia discontinua de la formación Catriel. Los extremos de la sección son las posiciones más próximas a la Dorsal de Huincul, nótese cómo la discordancia intravalanginiana se aproxima a la SDT.

forma NE) y Quebrada del Sapo (al sur de la Dorsal de Huincul). En la región al norte de la Dorsal de Huincul, donde las cuencas hídricas eran más restringidas, se desarrollan pobre facies fluviales efímeras, eólicas y de playa lacustre (Mb. Rojo, Marchese, 1971). Los sistemas eólicos se expanden y desarrollan potentes secciones eólicas (i.e. formación Sierras Blancas en Loma

La Lata) que, hacia el este, suelen interdigitarse y traslapar a los términos fluvio/aluviales. Finalmente, las eolianitas alcanzan una máxima expansión desarrollando un espesor uniforme en gran parte de la cuenca, base neta y un área de acumulación que transgrede los límites de las unidades continentales previas (excepto en el margen sur de la cuenca).

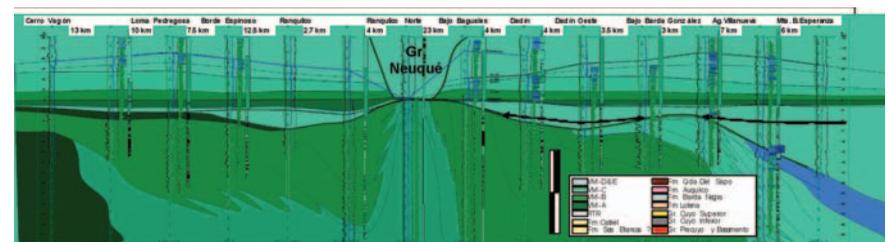


Figura 5. Sección de correlación regional (100km) nivelada a la máxima inundación de la formación Vaca Muerta (SMI-1). Los pozos se presentan equidistantes (tener en cuenta la distancia indicada). Los pozos al norte de la Dorsal de Huincul fueron arbitrariamente elegidos sobre relictos de la formación Catriel para mostrar la expansión de su área de acumulación. Por ello el adelgazamiento de la RTR y VM-A respecto de las posiciones al sur. Véase más referencias en el texto.

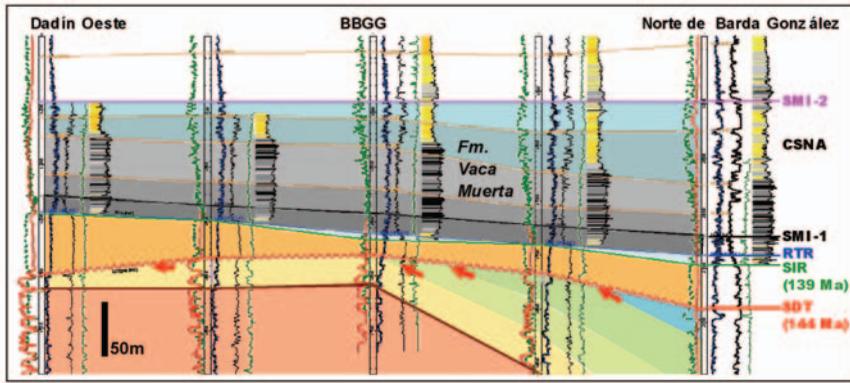


Figura 6. Sección estratigráfica sur-norte (aprox. 5km). La curva sombreada es DSR1: índice de COT a partir de perfiles (ecuaciones de Meyer *et al.*, 1984), los sombreados grises representan las zonas más ricas. Nótese el espesor uniforme que presenta la sección basal de Vaca Muerta y cómo el residuo de transgresión se ajusta al paleorelieve de las dunas sin erosionarlas. Véanse más referencias en el texto.

La inundación tithoniana encontró una cuenca dominada por mares de arena que fueron cubiertos sin transición por depósitos marinos de aguas profundas correspondientes a la formación Vaca Muerta. Se desarrollan unos 200m de espesor compuesto por margas bituminosas y calizas que conforman la roca madre de mejor calidad y productividad de la cuenca (Villar *et al.*, 1998; Legarreta *et al.*, 1999). Su intervalo basal, de entre 20 y 40m, está compuesto por arcillas negras calcáreas que se interpretan como depósitos de mar profundo (alrededor de 200m, Mitchum y Uliana, 1985). Las secuencias subsiguientes muestran claros arreglos progradantes de somerización, granando desde margas a calizas hacia el

tope y predominando las calizas en las secuencias más jóvenes (Mitchum y Uliana, 1985).

Sobre la formación Vaca Muerta sucede la formación Quintuco, mayormente compuesta por calizas. En conjunto con la formación Vaca Muerta alcanzan los 500m de espesor, hacia el sur es erosionada por la discordancia intravalanginiana 126Ma y, más al sur, la discordancia intercenomaniana 94Ma (figura 4) hasta desaparecer. Los depósitos continentales de la formación Centenario y Grupo Neuquén sobreyacen a las unidades antes mencionadas y presentan altas relaciones arena/arcilla y espesores en conjunto de más de 1000m.

mental del kimmeridgiano, que sucedió a las evaporitas de los últimos estadios de desecación marina. Su base se interpreta y correlaciona como la superficie de desecación total -SDT- (siguiendo conceptos de Mutti *et al.*, 1994 y Legarreta, 2002). Si bien el CSNBT está bien representado en posiciones internas de la cuenca (más de 300m de espesor), en la región analizada dominó la erosión y *by pass*, por lo que sólo se han preservado relictos sedimentarios, principalmente eólicos (figuras 2, 10 y 11). Tradicionalmente se engloba a esta secuencia en la formación Tordillo (Groeber, 1946; Arregui, 1993), que es una unidad litoestratigráfica muy variada que ha sido subdividida con diversos criterios (Marchese, 1971; Digregorio, 1972; Muñoz *et al.*, 1984; Maretto *et al.*, 2002). Se describen las unidades litoestratigráficas correlacionables en el área estudiada; sin embargo, sería conveniente elevar a la formación Tordillo a la categoría de grupo, conteniendo a las unidades formacionales y a los miembros descritos a continuación.

Miembro Rojo (Muñoz *et al.*, 1984; Maretto *et al.*, 2002) corresponde al depósito basal de formación Tordillo, compuesto por limoarcilitas y areniscas predominantemente rojizas. Está presente en posiciones internas como meseta Buena Esperanza y Aguada Villanueva, y está compuesto por depósitos fluviales efímeros, eólicos y de playas lacustres. Sísmicamente muestra relaciones de traslape (*onlap*) sobre la SDT (figuras 3 y 5) que, en general sobreyacen a la formación Auquileo. Posiblemente represente el estadio en que la erosión en la Dorsal de Huincul estuvo más activa pero con un área de drenaje limitada y sistemas fluviales poco eficientes.

Formación Sierras Blancas (Digregorio, 1972; Marchese, 1971): no se trata en detalle, sólo se refieren algunas observaciones e interpretaciones sobre el área tratada. Para mayores detalles de los avances recientes en su conocimiento se sugiere consultar a Fernández *et al.* (2002) y Maretto *et al.* (2002), en especial en zonas fuera del área tratada. Presenta facies predominantemente eólicas en las áreas al norte de la Dorsal de Huincul y fluvioaluviales en la plataforma nororiental, las regiones orientales y sur de la Dorsal de Huincul (considerando como correlativa la for-

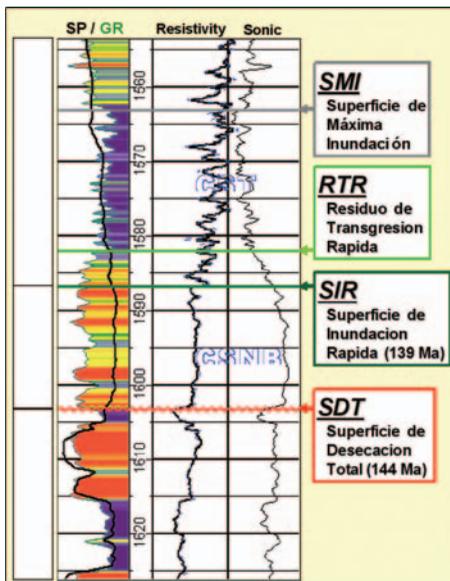


Figura 7. Pozo tipo. Las superficies indicadas fueron los marcadores eléctricos con los que se inició el análisis. Véase el texto para mayores referencias.

Análisis estratigráfico de alta frecuencia

Se definen las unidades y superficies limitantes que sobreyacen a los reservorios de la formación Lotena, sumando espesores conjuntos de entre 20 y 60m. En la figura 7 se muestran las cuatro superficies con las que se inició el análisis y a lo largo del presente aporte se intenta explicar la interpretación propuesta en la citada figura. En ocasiones las unidades limitadas presentan gran variación de espesores en áreas restringidas (figura 8) pero son correlacionables regionalmente (figura 9).

Cortejo Sedimentario de Nivel Bajo Total (CSNBT)

Su base se define por el inicio de la sedimentación exclusivamente conti-

mación Quebrada del Sapo). Es un prolífico reservorio gasífero (i.e. eólico del yacimiento Loma La Lata) y petrolífero (i.e. aluviales de Medanito-25 de Mayo; Arregui, 1993; Mareto *et al.*, 2002). Se diferencian claramente dos unidades eólicas: una más espesa que sobreyace al Mb. Rojo, con predominio de láminas de arena (*sand sheets*), y otra superior con predominio de dunas. La unidad eólica inferior se correlaciona en el presente trabajo a la formación Sierras Blancas. Si bien se suele utilizar como criterio de correlación su calidad como reservorio y en el área de estudio no se detectan reservorios comerciales en esta unidad, las correlaciones eléctricas, los perfiles de buzamiento y los espesores permiten su correlación desde el área Loma La Lata. Presenta una relación paraconcordante con el Miembro Rojo y luego de traslape sobre la SDT cuando éste no está presente (además en Loma La Lata se detectan discordancias erosivas internas, Fernández *et al.*, 2002). Esto se aprecia tanto en sísmica como en correlaciones de pozo (figuras 2 y 5). La formación Sierras Blancas rara

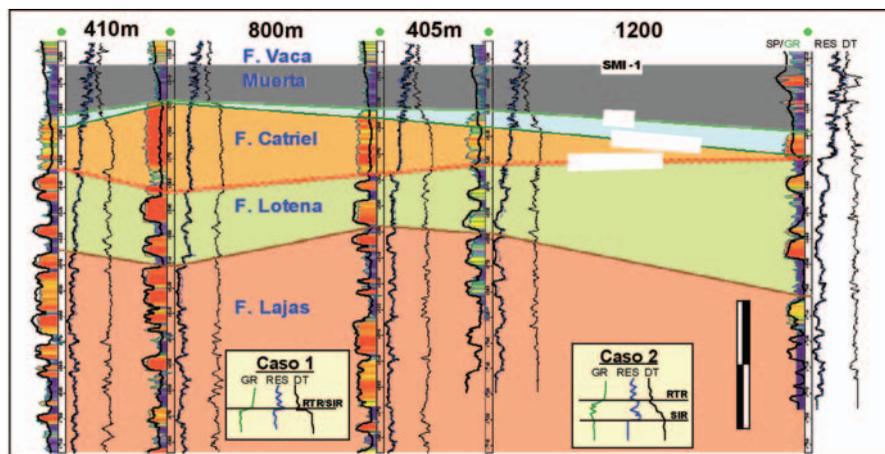


Figura 8. Sección estratigráfica en el campo BBG, Nótese las variaciones de espesor en tan corta distancia. El caso 1 se da rara vez cuando la formación Catriel presenta un incremento de espesor muy marcado. El caso 2 es lo más frecuente en la Dorsal de Huincul.

vez está presente más allá de la truncación de la formación Barda Negra, por lo que se infiere un control paleotopográfico y erosivo sobre su área de acumulación.

Formación Quebrada del Sapo (Parker, 1965): constituida por lóbulos

aluviales que coalescen formando mantos conglomerádicos en el margen sur de la cuenca. Posiblemente esta unidad sea correlacionable a la formación Sierras Blancas, esto se infiere básicamente por disponerse ambas por debajo de formación Catriel. Imágenes de

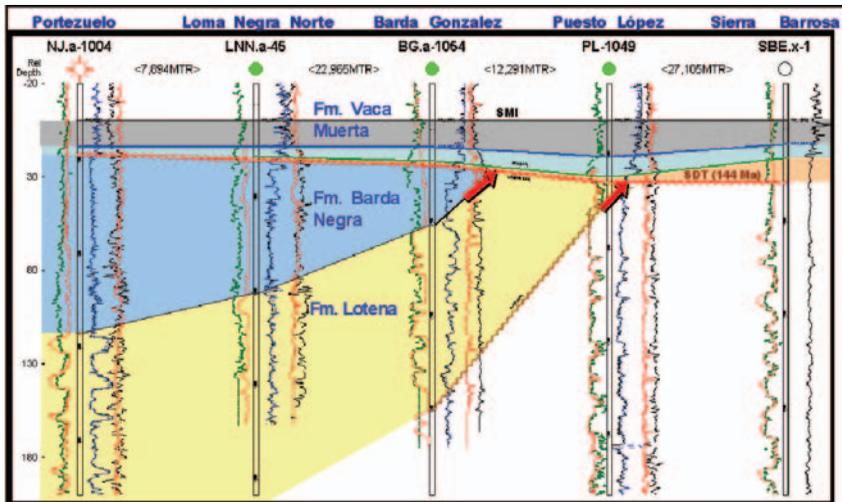


Figura 9. Sección estratigráfica de 70km en el flanco norte de la dorsal. Se destaca la continuidad del RTR y los variados niveles de erosión de la discordancia intramálmica (SDT). Pozos desplazados equidistantes.

pozo, coronas y la geometría de los lóbulos muestran paleocorrientes desde el sur, aunque mediciones en afloramiento (Zavala *et al.*, 2002) también verifican drenaje axial (OSO-ENE, siguiendo la fosa de Challado) y desde el norte para sus términos basales.

La Dorsal de Huincul en sus posiciones más elevadas durante el Jurásico habría actuado como barrera para estas bajadas aluviales generando un drenaje axial en la parte más deprimida (Zavala *et al.*, 2002). En la porción oriental de la Dorsal, donde el relieve Jurásico era menos acentuado, estos aluviones pudieron haber atravesado y alimentado parte de los depósitos fluviales de la formación Sierras Blancas. Tanto en superficie (Zavala *et al.*, 2002) como en subsuelo (figura 16) se registra un pasaje transicional a la suprayacente formación Catriel.

Formación Catriel (Digregorio, 1972; Marchese, 1971): compuesta por areniscas medias a finas y algunas arcillas rojas, verdosas y blanquecinas. Su base es neta sobre las eolianitas o depósitos aluviales de formación Sierras Blancas, en algunos casos se observan truncaciones en sísmica y residuos de deflación en coronas e imágenes de pozo. Si la formación Sierras Blancas no está presente, sucede directamente a la SDT. Fue analizada en mayor detalle por disponerse en forma saltuaría en posiciones muy proximales de la Dorsal de Huincul, transgrediendo las áreas de acumulación de las unidades continentales

subyacentes. Se analizaron cinco imágenes de pozo y dos coronas, que muestran un notable predominio de facies arenosas con laminaciones pla-

nares de alto ángulo (hasta treinta grados, figuras 16 y 18) y laminaciones horizontales con granulometrías bimodales y gradaciones inversas (figura 18). Frecuentemente se observan láminas enriquecidas en arenas gruesas a medias con base difusa, gradación inversa y techo muy neto, interpretadas como residuos de deflación. Presenta un alto grado de cementación (hasta un 15% en fracción de roca), con cementos arcillosos autigénicos y, en menor proporción, calcáreos y silicios. A su vez, aparecen coberturas cloríticas de los granos de arena. Todo esto resulta en porosidades generalmente menores al 6% (en ocasiones hasta 10%, sector oeste y norte del área estudiada). Los perfiles de resistividad, sónico y GR permiten una muy buena correlación, a pesar de su alta variabilidad de espesores en las posiciones marginales (figuras 8, 10 y 12). Sísmicamente es difícil de delimitar su base y techo, sin embargo su presencia puede interpretarse a par-

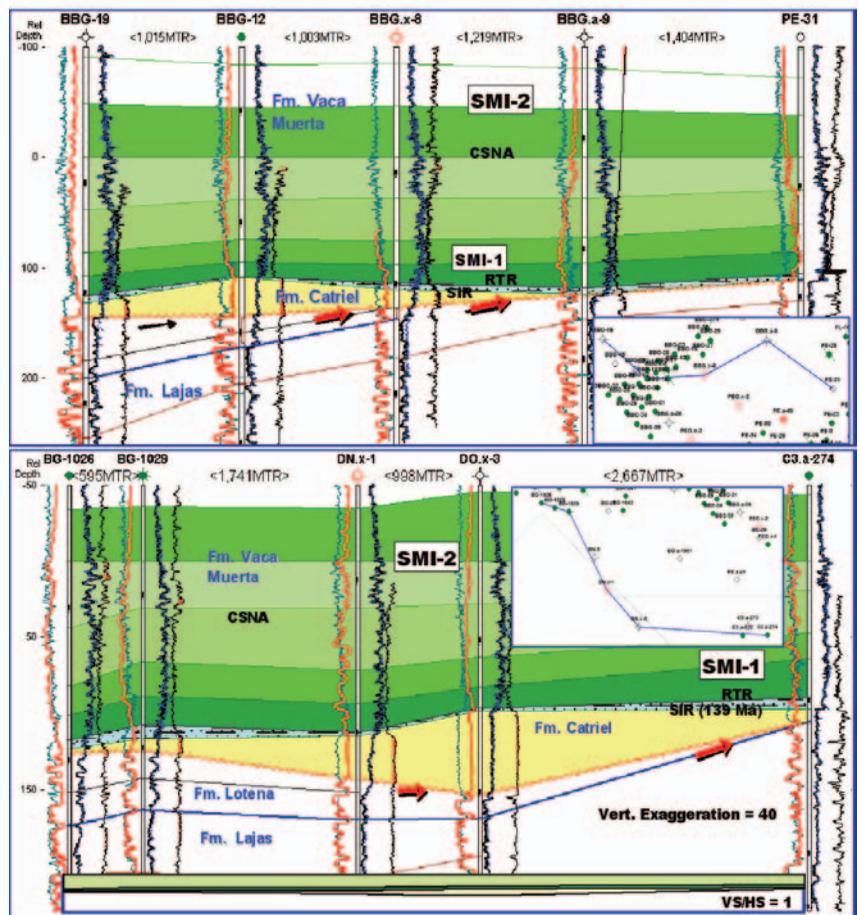


Figura 10. Secciones estratigráficas que muestran las configuraciones paleotopográficas en las que se acumularon y preservaron eolianitas (formación Catriel) en posiciones altas de la Dorsal de Huincul.

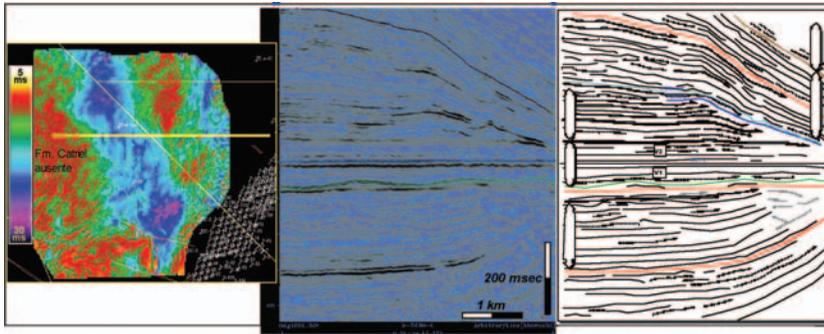


Figura 11. Expresión sísmica de las megadunas de la formación Catriel preservadas en posiciones altas de la Dorsal de Huincul. Originalmente se aplanaba la sísmica a la base de la formación Vaca Muerta, induciendo a interpretar canales. Nivelando a la SMI-2 se ve claramente las formas del lecho eólico. Si bien la formación Vaca Muerta parece traslapar (*onlap*) sobre las megadunas, se interpretan estos cambios de espesores principalmente por compactación diferencial.

tir de las variaciones de frecuencia del mínimo infrayacente al positivo que próximo a la base de formación Vaca Muerta y también a las variaciones de espesor de la sección basal de la misma (figuras 11 y 22).

Se interpreta un ambiente eólico de dunas complejas, y escasos depósitos de interdunas (secas y húmedas). Las laminaciones observadas se interpretan como lluvia y flujo de granos en caras de avalancha de dunas eólicas. Esta unidad representa el inicio de la sedimentación eólica en regiones donde antes se depositaban sedimentos aluviales/fluviales (figuras 22 y 23). Este fenómeno se registra de igual manera en la plataforma NE de la cuenca, donde la formación Sierras Blancas aluviofluvial es sucedida por eolianitas que transgreden las áreas de acumulación previas restringidas a valles incisos. Uno de los elementos que ocasionó la expansión de los ergs de esta unidad fue un cambio climático que además provocó la desactivación de los drenajes fluvioaluviales. Esto se verifica también en el carácter sutilmente erosivo que se observa en el contacto entre la formación Sierras Blancas y formación Catriel, que evidencia un episodio de deflación regional.

Interpretación del CSNBT

Las porciones más elevadas de la Dorsal (figura 2) bloquearon el aporte fluvial del sur, permitiendo el masivo desarrollo de los ergs de las formaciones Sierras Blancas y Catriel, con

doble efecto de barrera para el drenaje hídrico y sombra aerodinámica para generar un sistema eólico del tipo "sombra de montaña" (Wilson, 1973; Fryberger y Ahlbrandt 1979, Cevallos, 1996; figuras 19, 20 y 21). Estos sistemas son muy comunes en unidades eólicas de la magnitud de las de la formación Tordillo. Como ejemplo se mencionan las Navajo Sandstones (Jurásico de E.U., 400m de espesor, Herries, 1993); o el Miembro el Palque de la F. Pachaco (Mioceno) sincrónica al levantamiento de la precordillera Sanjuanina/Mendocina, en donde se acumularon mas de 700m de arenas puramente eólicas en un mar de arena que cubrió más de 10.000km² (Cevallos, 1996). Ejemplos actuales

son comunes en el Sahara (figura 19, Wilson, 1973) y, localmente, en los Médanos Grandes en el borde occidental de las sierras Pampeanas (figura 20). Los paleovientos medidos en las (figura 23) muestran una gran consistencia y se infieren rotaciones por efectos de coriolis y/o reorientaciones causadas por las barreras topográficas; estas variaciones son también características en los ejemplos citados.

Localmente, la interferencia de la topografía y las direcciones de vientos generan cambios de orientación de las dunas. Así, las orientaciones de Picún Leufú (Zavala *et al.*, 2002) podrían explicarse por situaciones como las observadas en los ergs cuaternarios de Médanos Grandes y Marayes (figura 21, Cevallos, 1996). La mecánica de acumulación de las eolianitas del norte de la dorsal sería análoga al caso 2 de la figura 21, y las eolianitas de formación Catriel acumuladas al sur de la Dorsal de Huincul se comparan al los casos 3 y 5 de la misma figura. Es notable la expansión de los mares de arena de formación Catriel respecto a formación Sierras Blancas (figura 23). Tal vez exista alguna relación entre el traslape de las facies eólicas hacia los márgenes de la cuenca y el nivel del mar en ascenso al oeste del arco magmático, tal como se plantea para la formación Huitrín (Legarreta, 2002), pero en el caso de la formación Catriel, ese vínculo, si es que lo hubo, no está analizado en detalle.

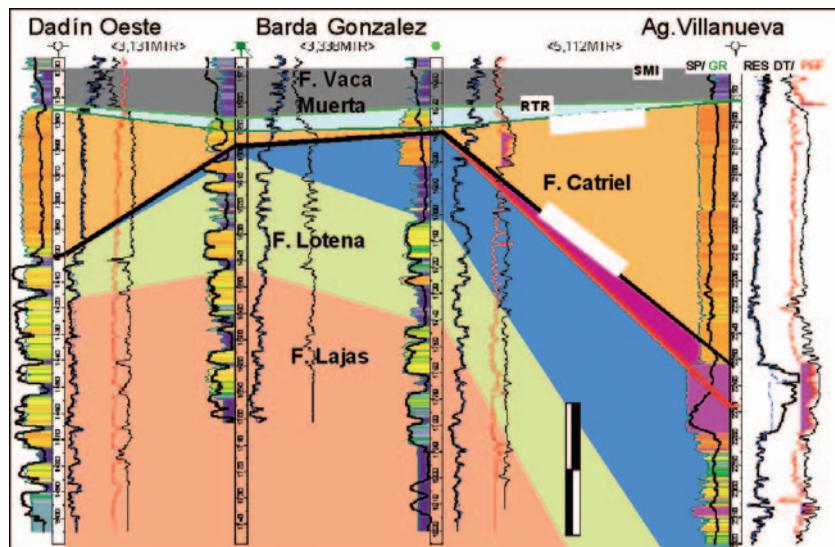


Figura 12. Sección estratigráfica que muestra la alta heterogeneidad estratigráfica por debajo y por arriba de la SDT (disc. intramagmática)

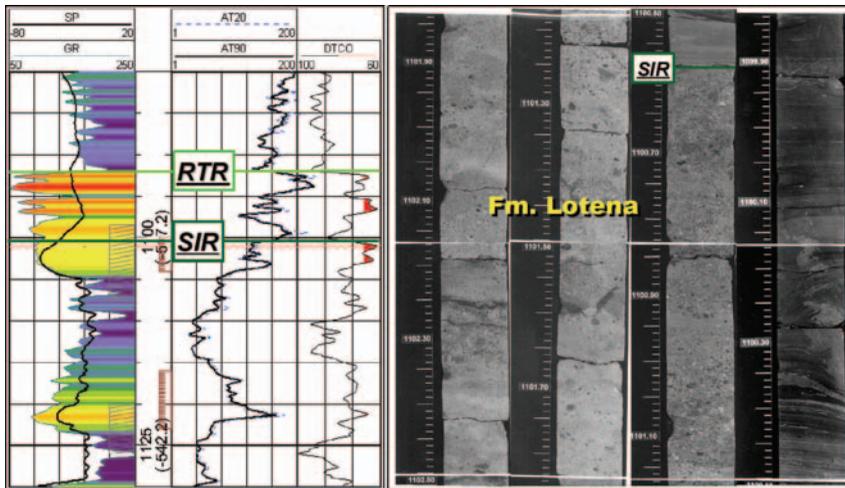


Figura 13. Perfil y corona en Puesto Espinoza. Entre RTR y SIR son características la baja lectura de GR y la alta resistividad. Esto suele confundirse con arenas al escapar a la resolución del control geológico. Nótese el nivel de arena muy fina (7cm) por arriba de la SIR y las inyecciones arenosas (por licuefacción).

Cortejo Sedimentario de Transgresión Rápida (CSTR)

Para la precisa identificación de su base, la superficie de inundación rápida (SIR), se utilizaron coronas e imágenes de pozo, ya que las unidades que limita suelen tener características eléctricas similares y ser muy discontinuas en su área (figuras 7, 8, 9, 10 y 12). Sísmicamente está por debajo del pico positivo asociado a la base de la formación Vaca Muerta, más próxima al cruce por cero. Representa la base de esta formación y, por ende, el comienzo de la sucesión marina tithoniana. Cuando inundó sobre sedimentos no consolidados (formación Catriel) produjo alteraciones por cementación y licuefacción, pero muy escaso a nulo retrabajo (figuras 13, 14, 15 y 16). Cuando cubrió unidades diagenizadas (formación Barda Negra, Lotena, Lajas) no produjo retrabajo o erosión y las variaciones del grado de cementación son muy sutiles. Los paleofloramientos jurásicos que fueron cubiertos por la SIR se presentan en la figura 2. Sobre la SIR se dispone el Residuo de Transgresión Rápida (RTR), una sección margosa compuesta por una mezcla de arcillas negras, carbonatos precipitados, microfragmentos de conchillas e inclusiones de limos y arenas muy finas. Posee espesores promedio de

5m (desde pocos centímetros hasta más de 10m). Se caracteriza por su baja lectura de GR (más limpio que las arenas arcósicas subyacentes), lo cual no condice con su litología y llevó, en el pasado, a interpretarla como arena (figuras 7, 8, 13, 15 y 17). Posee detecciones de potencial fotoeléctrico (perfil clave) generalmente de 3,5 a 5 unidades que permiten discriminarla de las arenas y un característico gradiente de tiempo de tránsito que disminuye de tope a

base, desde valores normales para la formación Vaca Muerta a tiempos de tránsito muy bajos equivalentes a la formación Catriel (figuras 15 y 16). La resistividad presenta un arreglo vertical muy homogéneo que se mantiene regionalmente. El pico de baja resistividad observado en su parte media suelen utilizarlo algunos intérpretes como el marcador para la base de la formación Vaca Muerta, aunque la base real se encuentra más abajo (figuras 13 y 16). Por encima de este pico negativo, los perfiles de inducción, sísmico y GR gradan hacia valores normales de formación Vaca Muerta. Las escasas ocasiones en las que no se registra el RTR son la cresta de las megadunas de formación Catriel (figura 18). En posiciones de centro de cuenca, el RTR tiene espesores muy reducidos (i.e. meseta Buena Esperanza).

Nótese que las coronas y los perfiles mostrados en las figuras se encuentran a distancias del orden de los 50km entre sí; sin embargo, es posible una precisa correlación del arreglo vertical de los perfiles de inducción, GR, sísmico y PEF del RTR. En la figura 5 se destaca el espesor del RTR en la zona al sur de la dorsal; en cambio, al norte de la misma, la línea de correlación se siguió por pozos ubicados sobre crestas de megadunas de formación Catriel para

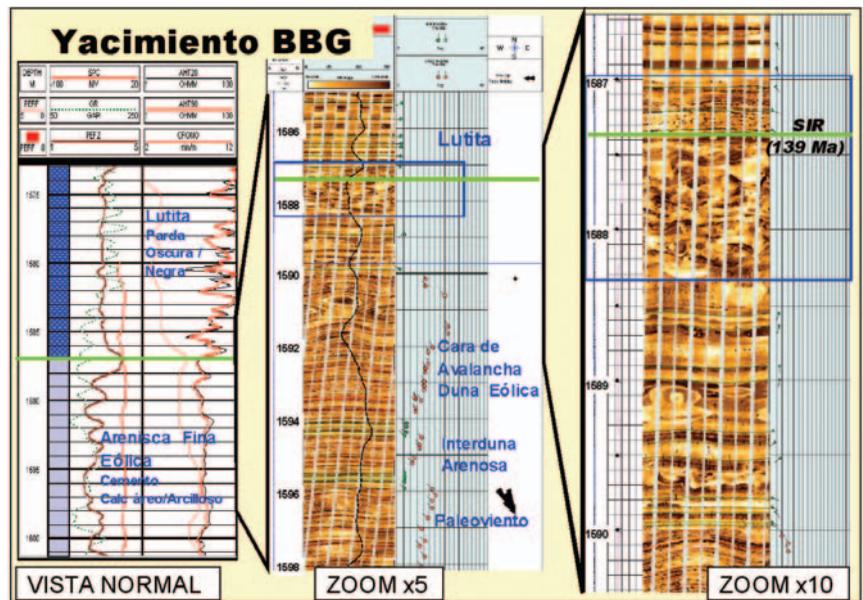


Figura 14. Vista de la SIR en imagen eléctrica. En el zoom x 5 se observa el arreglo eólico de la formación Catriel y los 3m superiores alterados por la inundación. En el zoom x 10 se observan los nódulos de cementación y el retrabajo del metro superior.

mostrar su máxima extensión sobre la dorsal, por lo que el espesor de la RTR es mínimo. En secciones transversales a las megadunas (figuras 8, 10, 12 y 18) se aprecia el aumento de espesor de esta unidad hacia los flancos. En secciones regionales que no involucran las crestas de las megadunas se aprecia su espesor homogéneo (figura 9). Al RTR lo suceden lutitas negras bituminosas finamente laminadas, que producen las lecturas de máxima arcillosidad de la formación Vaca Muerta. Presentan espesores promedio de 20m, que se afinan sutilmente hacia el centro de la cuenca y llegan a los 40m en la fosa de Challacó (figura 5). Denominamos informalmente a esta unidad como -VM-A- (i.e. sección A en Leanza y Hugo, 1977; secuencia A en Mitchum y Uliana, 1985; zona de Virgatosphincter Mendozaeanus en Burckhardt, 1903 y Groeber, 1946), la cual se correlaciona desde posiciones internas hasta marginales de la cuenca. Por encima se desarrollan margas bituminosas que gradan verticalmente a calizas, mostrando arreglos de somerización.

Interpretación del CSTR

Se diferencia del clásico cortejo sedimentario transgresivo (Van Wagoner *et al.*, 1990) por no presentar migración de facies que representen el incremento del nivel del mar (Mutti *et al.*, 1994). La transición de facies continentales a marina es neta y está dada por un depósito agradacional -RTR-. A esto

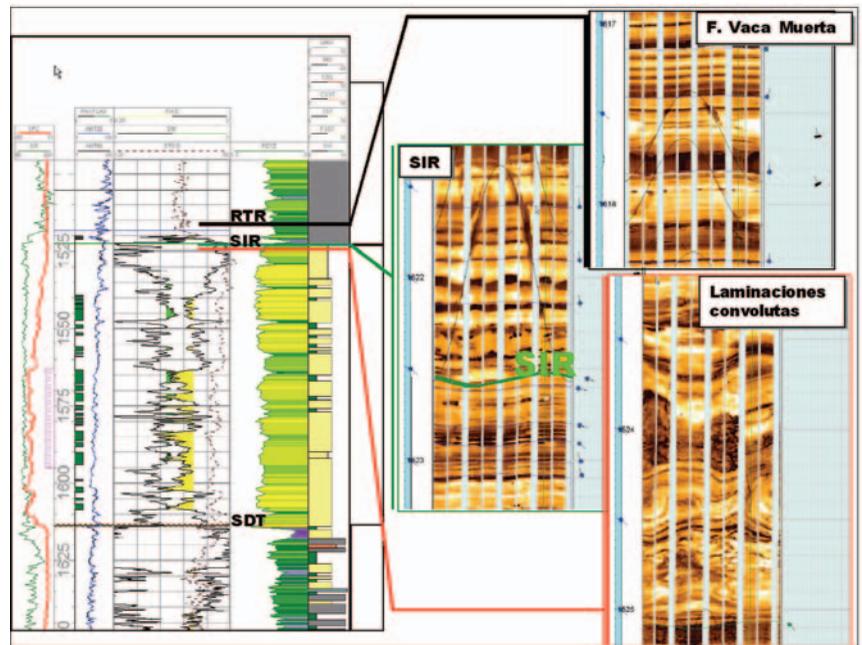


Figura 15. Detalle de la SIR a partir de imagen eléctrica en Estación Ramón Castro. Nótese las alteraciones del metro superior de formación Catriel. Las laminaciones originales de esta formación están distorsionadas pero los sedimentos no fueron redistribuidos.

le sucede una sección muy homogénea de sedimentos de aguas profundas -VM-A-. Ambas unidades forman una sábana uniforme que cubre gran parte de la cuenca con arreglos faciales que la sábana mantiene constante hasta los bordes de cuenca. El RTR se interpreta como la decantación del material en suspensión en el mar que sucedió a la transgresión rápida. En una hipótesis interpretativa de mayor detalle se asocia a la parte inferior (forma de campana en la resistividad, figuras 13 y 17) con un depósito sincrónico a la transgresión, donde se verifica mínima

redistribución de sedimentos y la decantación del material más grueso, y la parte superior (perfil de embudo en la resistividad, figuras 13 y 17) correspondiente al período de decantación del material fino en suspensión y la transición hacia condiciones de aguas estratificadas con un fondo marino en condiciones anaeróbicas a disaeróbicas (Uliana *et al.*, 1999). La geometría y características de la VM-A y las secuencias subsiguientes hacen presuponer que el mar siguió ascendiendo luego de la transgresión rápida pero ahora en secuencia respecto del ascenso eustático

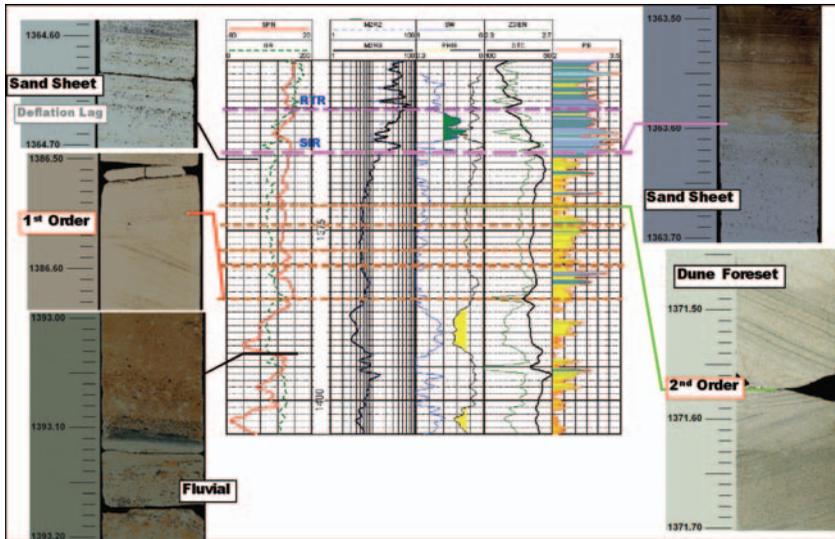


Figura 16. Detalles de la SIR, la formación Catriel y el tope de la formación Quebrada del Sapo en el área Borde Espinozo Este. No se observan alteraciones en el tope de formación Catriel, las últimas láminas corresponden a residuos de deflación eólica. Nótese el carácter transicional del límite entre la formación Quebrada del Sapo y la formación Catriel.

que representara la problemática (figura 24). A partir del modelo de correlación y perfiles (sónico y densidad) se generó una sísmica sintética utilizando el programa GMA (R. Cook y M. Cevallos), lo que luego se comparó con la sísmica 3D. En la zona 1 de la figura 24 se observa la ausencia del RTR, un espesor de la formación Catriel de 25m y la truncación de una parasecuencia de la formación Lotena por debajo de la SDT. En el modelo se observa una notable truncación de un reflector positivo, el cual en la sísmica se esboza sutilmente entre el reflector MinPeak y el mínimo subyacente. Cuando se realizó el modelo original no estaba perforado el pozo del extremo izquierdo. Nótese que las reflexiones de mayor amplitud contienen poca información del reservorio. En la posición 2 de la figura 24 el RTR tiene unos 4m y la formación Catriel unos 5m, por debajo de la SDT se trunca y cambia de facies otra parasecuencia de la formación Lotena. Las fuertes variaciones de los reflectores BVM y MinPeak son lo más relevante en el modelo y la sísmica, pero sólo muestran la aparición del RTR y la disminución del espesor de la formación Catriel. La desaparición del reservorio se ve claro en el modelo GMA, pero en la sísmica está representada por la variación de espesor entre el MinPeak y el cruce por cero que le subyace. En la posición 3 de la figura 24, la amplitud de ambos reflectores en el modelo y la sísmica disminuyen

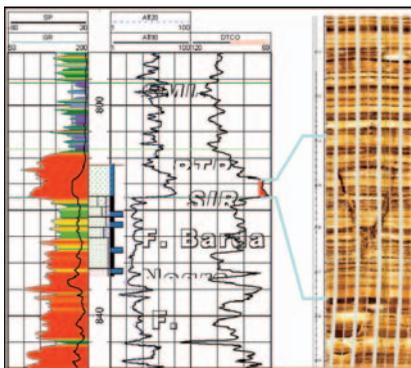


Figura 17. Expresión del RTR en Portezuelo Norte, donde la SIR apoya sobre la formación Barda Negra.

Interpretación sísmica

Un 90% del espesor útil del área estudiada se ubica muy próximo por debajo de la SIR (base de la formación Vaca Muerta). La presencia de superficies y unidades con fuerte carácter sísmico (RTR y formación Catriel), aunque desarrolladas con espesores mínimos, hacen muy dificultosa su interpretación, especialmente en prospectos y campos predominantemente estratigráficos. Para transferir el modelo descrito a la sísmica se utilizó un caso de estudio

co y con mínimos desplazamientos de la línea de costa. Por ello no se registrarían arreglos retrogradantes ni progradantes (*still stand*) en la VM-A. Si bien la superficie de máxima inundación -SMI- puede estar dentro de la VM-A, se define y correlaciona regionalmente donde se presentan los mayores contrastes eléctricos para facilitar la interpretación. Las secuencias que la suceden muestran arreglos progradantes de somerización progresiva y variaciones de espesores cliniformes, clásicos de cortejos sedimentarios de nivel alto (figuras 5 y 6). Las arcillas de la VM-A y las margas de las dos secuencias que la suceden (VM-B y VM-C) presentan los mejores tenores de carbono orgánico total (figura 6).

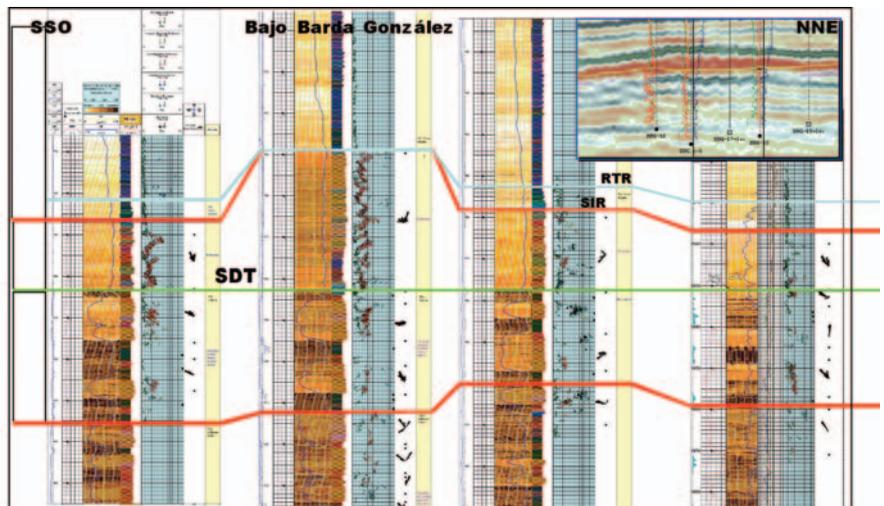


Figura 18. Sección estratigráfica con imágenes de pozo. La parte más espesa de la formación Catriel muestra el mayor desarrollo de dunas, en la parte más delgada (al NE) predominan las interdunas y *sand sheets*. Las megadunas de la formación Catriel no fueron planizadas por la inundación de formación Vaca Muerta. Sísmicamente suele ser difícil diferenciar la génesis de estas secciones (en general, se interpretan como canales incisos).



Figura 19. Relaciones entre la ubicación de los ergs y la topografía en el Sahara (Wilson, 1973).

drásticamente debido a la desaparición de la formación Catriel y al bajo contraste de impedancia entre las arcillas de las formaciones Vaca Muerta y Lotena, el RTR sólo mantiene la continuidad del reflector BVM. Si bien en la sísmica se replican a grandes rasgos estas variaciones, el modelo permite su mejor entendimiento.

Nótese cómo la aparición de una Caliza por debajo de la SMI produce un aumento de amplitud en el modelo que en parte disminuye la señal de los reflectores infrayacentes. Este caso pretende ser ilustrativo de las mejoras en el trabajo de interpretación sísmica que puede aportar un análisis estratigráfico de alta frecuencia como el presentado en este aporte. Si bien hasta el momento ninguna de las unidades tratadas reviste interés como roca reservorio, un modelo geológico que permita segregarnos en cierta manera de los atributos y las geometrías contenidos en la sísmica, se tornan claves para la prospección y el desarrollo de los campos que las infrayacen.

La detección precisa de la base de la inundación tithoniana (SIR) y la caracterización de su relleno basal (RTR) resulta clave para la clasificación sísmica de los reservorios, tanto en la etapa prospectiva como exploratoria. El espesor y carácter del RTR tienen una fuerte impronta en el reflector sísmico positivo BVM, cuyos atributos frecuentemente contienen escasa información de los reservorios subyacentes. A su vez, la delimitación y caracterización de las secciones impermeables de la formación Catriel que suelen aparecer entre los reservorios y la SIR desplazan aún más al reservorio del BVM y dificultan enormemente la interpretación de algún evento sísmico que represente vertical y en área a los reservorios. En el presente aporte se presentan elementos para definir un marco estratigráfico que facilite la prospección y delimitación de los reservorios a partir de datos de pozo y sísmica. El reflector negativo MinPeak, por debajo del BVM, es el evento sísmico más representativo de los

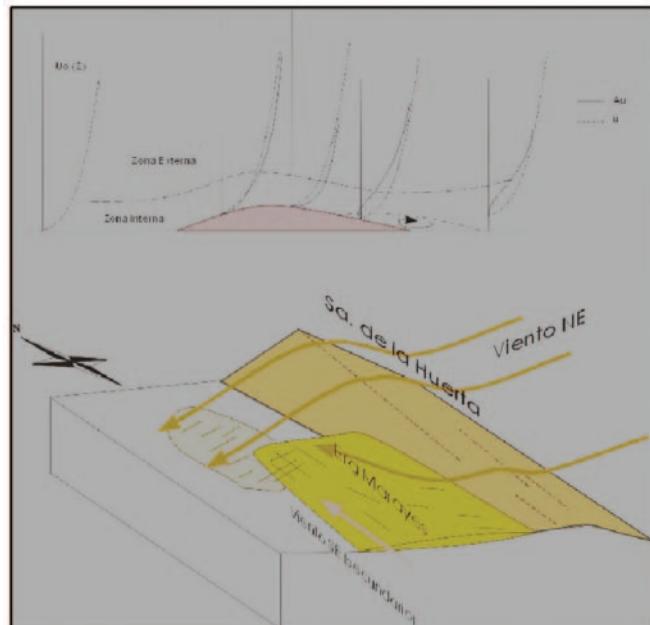
reservorios de la región. Éste debe analizarse con mucho detalle y base geológica ya que, como se mostró, representa la interfase de unidades variadas tanto por arriba (formación Catriel, RTR Vaca Muerta) como por abajo (Formaciones Barda Negra, Lotena, Lajas).

Analogía con la inundación del mar Negro

Algunos estudios recientes (Ryan y Pittman, 1998) revelaron detalles sobre la edad, la duración y el carácter de la última ingresión marina en el mar Negro (figura 25). Las dataciones, así como las discordancias en registros arqueológicos debido al éxodo de los habitantes de las regiones inundadas,

apuntan a que dicho evento sucedió hace unos 7150 años. Previamente era una cuenca lacustre separada del mar Mediterráneo por cordones montañosos (figura 25). Cuando comenzó a elevarse el nivel global del mar, se generó un desnivel de unos 120m respecto de esta cuenca lacustre. Cuando el nivel del Mediterráneo superó primero el nivel del canal Dardanellos (cuenca de Mármara), inundó al mar de Mármara y cuando éste alcanzó el umbral de la por entonces quebrada de Bósforo, comenzó el llenado del mar Negro. Mediante un modelo hidrodinámico, Ryan y Pittman (1998) calcularon la velocidad de llenado desde el nivel lacustre hasta 120m por encima de éste en tres años (el actual nivel del mar Negro está 155m por encima del nivel lacustre). Las regiones más pobladas eran las fértiles bahías interdistributarias del delta del río Danubio. Debido a la baja pendiente de esta región, se calcularon avances de la línea de costa del orden de 1,5km/d, lo que hizo imposible un éxodo normal de los pobladores y se vieron obligados a dejar pertenencias de valor (ánforas, vestimentas y viviendas), que actualmente visitan

La relación velocidad del viento/altura (U) varía según la posición respecto de la barrera. El gradiente de velocidad produce un gradiente de presión que genera desaceleración y hasta contraflujo (según Lancaster, 1994).



Ejemplo actual de dunas acumuladas a sotavento de la sierra de La Huerta en San Juan (según Cevallos, 1986).

Figura 20. Efectos sobre la velocidad del viento al atravesar barreras topográficas. Ejemplo del cuaternario de San Juan.

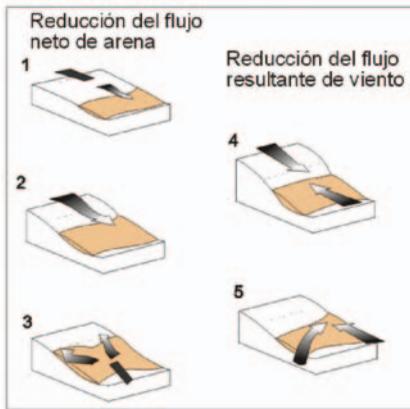


Figura 21. Modelos de influencia de la topografía y el desarrollo de ergs, según Fryberger y Ahlbrandt (1979).

arqueólogos en submarinos de aguas profundas. Algunos pobladores se embarcaron y cruzaron hasta el margen sur (actual parte asiática de Turquía), donde estaban las zonas costeras más elevadas. Luego cruzaron las montañas hacia el actual Irak/Irán, donde se escribió por primera vez la historia de Gilgamesh, posteriormente relatada en la Biblia como la historia de Noé y el diluvio universal.

El trabajo de Ryan y Pittman (1998) define varios elementos en común con lo observado en la inundación tithoniana de la Cuenca Neuquina. Muestra claramente la ausencia de un cortejo sedimentario transgresivo debido a la velocidad de la inundación. Sólo se obser-

van rasgos erosivos en el lecho de los canales de acceso (Dardanellos y Bósforo). El muestreo de isótopos y composicional de los sedimentos muestra un pasaje neto de sedimentos lacustres a marinos de aguas anaeróbicas. La unidad sedimentaria que sucede a la superficie de inundación es lo que los autores definen como *uniform drape* (sábana uniforme), que presenta un

espesor uniforme de unos 3m relevado desde 120m de profundidad (paleonivel lacustre) hasta posiciones muy próximas a la línea de costa (figura 26). Las profundidades de agua estimadas (Mitchum y Uliana, 1985) para las secuencias basales de la formación Vaca Muerta serían menores a los 200m, es decir, del orden del diferencial de nivel entre el paleolago y el mar Negro.

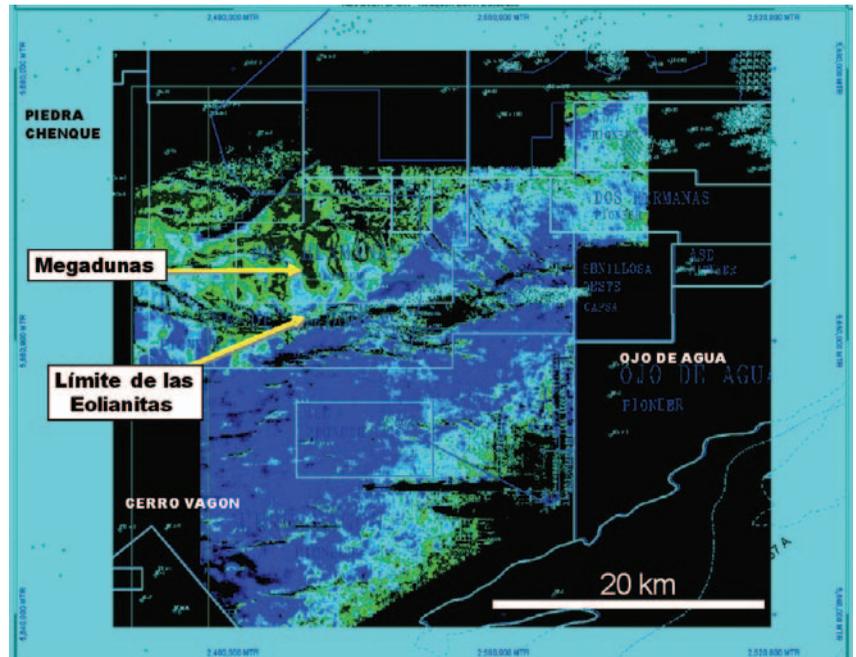


Figura 22. Expresión sísmica de las megadunas de la formación Catriel en la región Al sur de la dorsal. El mapa se obtuvo a partir del espesor de la primera megasecuencia de Vaca Muerta (hasta la SMI-2, figura 6), que muestra un espesor menor y mayor compactación cuando está presente la formación Catriel.

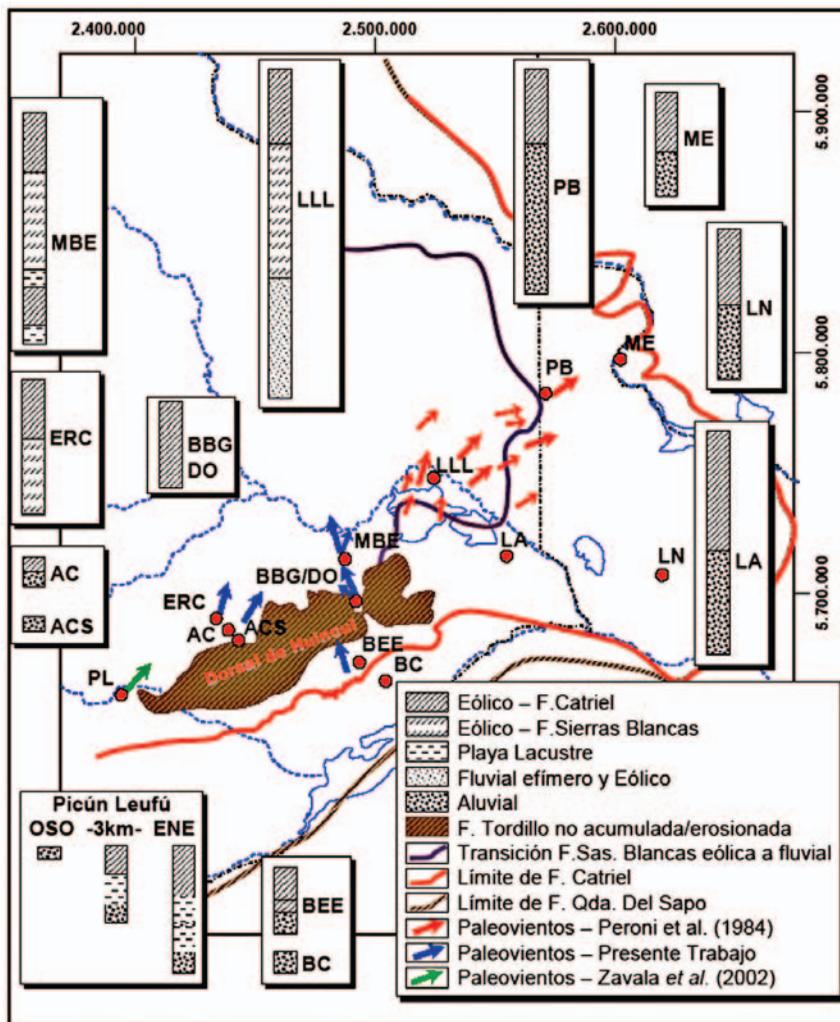


Figura 23. Extensión y paleovientos de los depósitos eólicos de las formaciones Sierras Blancas y Catriel. Los límites en la plataforma NE fueron tomados de Arregui (1993). Se presentan columnas indicativas que muestran espesores y facies de la formación Tordillo en distintas localidades.

En el presente aporte se mostró en detalle el arreglo estratigráfico de la inundación tithoniana, que concuerda con los estudios antes mencionados y se describió, además, una sección residual sin postransgresión comparable a la dejada por la inundación del mar Muerto. Esta sería la única evidencia estratigráfica de la transgresión rápida y genéticamente se diferencia del clásico cortejo sedimentario transgresivo y, más aún, de los depósitos de arenas transgresivas basales. Se postula la reinterpretación de los depósitos basales de la formación Vaca Muerta como residuo de transgresión rápida (RTR) y no como arenas transgresivas basales, restándole o hasta descartando su potencial como roca reservorio. El área de estudio es muy amplia y abarca diversas posiciones topográficas al momento de la inundación, por lo que se interpreta que el modelo desarrollado tiene aplicación en la mayor parte de la Cuenca Neuquina. En la figura 28 se presenta el modelo estratigráfico secuencial que resume las observaciones del presente trabajo, el cual es una variación de los modelos originales de Mutti *et al.* (1994) y Legarreta (2002).

Conclusiones

El modelo estratigráfico de alta frecuencia del límite kimmeridgiano-tithoniano brinda un marco geológico de detalle que facilita las tareas de prospección y delimitación de los reservorios que lo infrayacen. Las superficies y unidades discriminadas por encima de la base de la formación Vaca Muerta se desarrollan muy próximas en tiempo y espacio. La superficie de inundación rápida SIR es neta, sin producir la nivelación y redistribución de los depósitos eólicos que la precedían. Se define el cortejo sedimentario de transgresión rápida para la inundación tithoniana, el cual presenta marcadas diferencias con el cortejo sedimentario transgresivo de la estratigrafía secuencial clásica. No presenta relaciones de traslape sobre el cortejo sedimentario de nivel bajo total que lo precede ni migración, y su espesor y edad serían homogéneos en gran parte de la cuenca. Por analogía con la inundación del mar Negro, se interpreta que su sección basal (RTR) se acumuló en pocos años. El potencial prospectivo del RTR como reservorio se considera

Ambas inundaciones carecen de cortejos sedimentarios transgresivos. El *uniform drape* del mar Negro (Ryan y Pittman, *op. cit.*) sería equivalente en espesor, geometría y distribución al RTR interpretado para la base de la formación Vaca Muerta. La entrada del mar a la Cuenca Neuquina, tal como sugieren Mutti *et al.* (1994) habría sido la quebrada o el portezuelo más bajo del arco volcánico que flanqueaba la cuenca por occidente, haciendo las veces de canal de Bósforo del mar Negro.

Modelo secuencial

El fuerte dominio de factores tectónicos/volcánicos en las variaciones relativas del nivel del mar en la Cuenca Neuquina hacen que los modelos de

estratigrafía secuencial clásica (Van Wagoner *et al.*, 1990) sean de aplicación parcial. Esto fue señalado por Mutti *et al.* (1994), quienes presentan un modelo alternativo que aplica en casos de estadios de nivel bajo en los que se pierde totalmente la conexión marina, e inundaciones que ocurren con un nivel del mar muy por encima del nivel de base previo de la cuenca continental. Es decir, episodios de transgresión instantánea en tiempo geológico, como se mostró en el caso del mar Negro. En el citado trabajo se presenta un modelo de cortejo sedimentario transgresivo que no desarrolla migración de facies hacia los bordes de cuenca. Estos modelos fueron posteriormente refinados en Legarreta (2002). Ambos trabajos hacen referencia a la misma mecánica de inundación para el evento tithoniano.

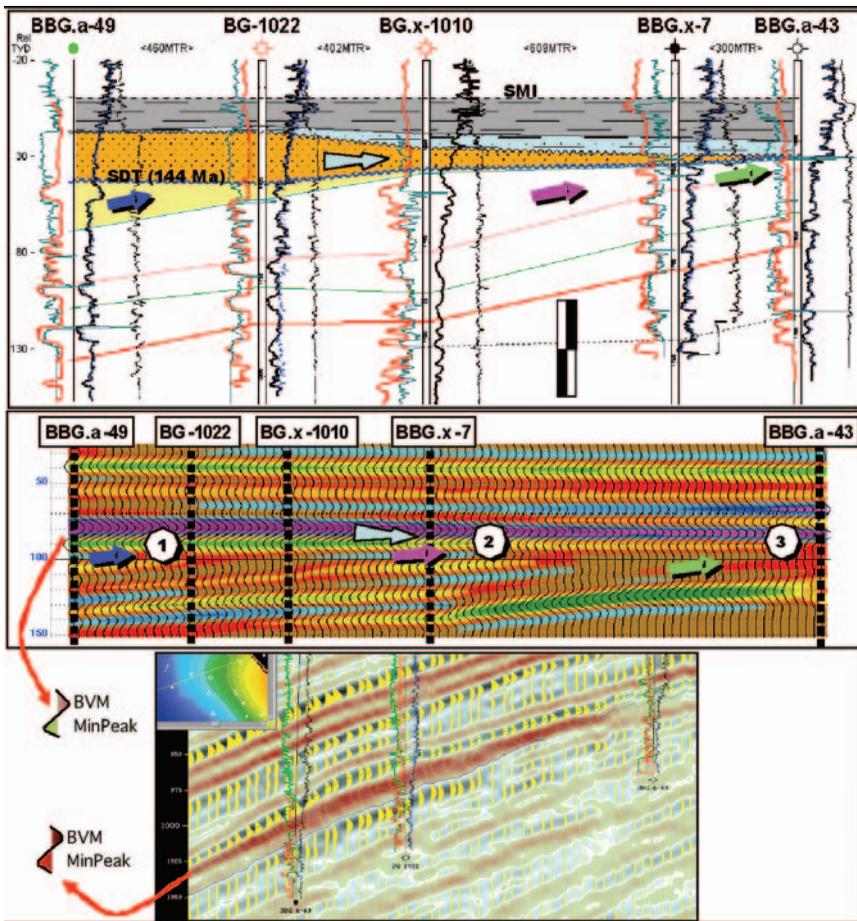


Figura 24. Modelo sísmico sintético. A partir de una sección entre pozos con alta heterogeneidad estratigráfica se construyó una sísmica sintética que se comparó con la sísmica 3D de la zona. Véase el texto para mayores referencias.

nulo, al menos en el área estudiada. El desarrollo de los mares de arena preinundación (Formaciones Tordillo y equivalentes) estuvo fuertemente controlado por la Dorsal de Huincul, la cual

funcionó como trampa aerodinámica de las arenas en suspensión y barrera para las bajadas aluviales/fluviales. En las regiones donde esta barrera perdía relieve (extremo oriental de la dorsal) o en



Figura 25. Mapa comparativo del mar Negro y la porción neuquina y surmendocina de la Cuenca Neuquina.

la plataforma nororiental (donde no había barrera), la descarga aluvial/fluviales alcanzó posiciones más internas de la cuenca (facies aluviofluviales de la formación Sierras Blancas). La expansión del área de depositación eólica en su estadio final (formación Catriel) se interpreta como un aumento de la aridez en la cuenca y está limitada en su base por una superficie de deflación de correlación regional y un cambio del patrón de apilamiento de dunas/megadunas. En este período se registran depósitos eólicos saltuarios sobre el eje de la Dorsal de Huincul y, al sur de la misma, donde la interacción del relieve y la circulación aérea permitieron la acumulación/preservación de arena.

Agradecimientos

A las autoridades de Pioneer Natural Resources Argentina por permitir esta publicación. A Gervasio Barzola, Diego Vaamonde y Daniel Kokogian por la lectura crítica del manuscrito y sus valiosos comentarios. A los geólogos y geofísicos de Pioneer, en especial a David Strickler y Jorge Vásquez por las discusiones y los aportes que enriquecieron el presente trabajo.

Lista de trabajos presentados en el texto

- Arregui, C., "Análisis estratigráfico-paleoambiental de la formación Tordillo en el subsuelo de la Cuenca Neuquina", 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Mendoza, 1993, v. 1, pp. 165-169.
- Bettini, F. H., "Pautas sobre cronología estructural en el área del cerro Lotena, cerro Granito y su implicancia en el significado de la dorsal del Neuquén, provincia de Neuquén", 9° Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, 1984, actas II, pp. 342-361.
- Boll, A. y Valencio, D., "Relación estratigráfica entre las formaciones Tordillo y Vaca Muerta en el sector central de la Dorsal de Huincul, provincia del Neuquén", 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 1996, actas V, pp. 205-223.
- Burckhardt, C., *Beiträge zur Kenntniss der Jura und Kreide formation der Cordillera*, Stuttgart, 1903.
- Cevallos, M., "Análisis del desierto neógeno de precordillera central y comparación con el mar de arena actual del Eñcón", tesis de licenciatura en Ciencias Geológicas, Universidad Nacional de San Juan, 1996.
- Cruz, C. E.; Boll, A.; Gómez Omil, R.; Martínez, E. A.; Arregui, C.; Gulisano, C. A.; Laffitte, G. A. y Villar, H. J., "Hábitat de hidrocarburos y sistemas de

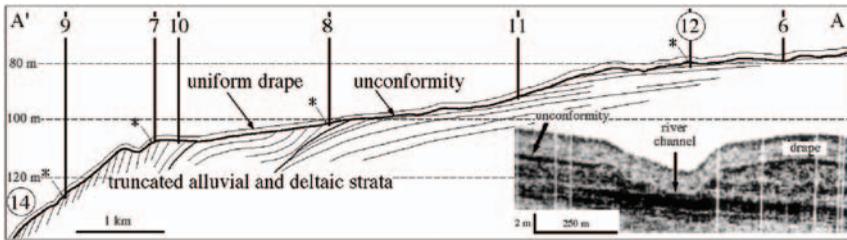


Figura 26. Perfil del lecho del mar Muerto reproducido de Ryan y Pittman (1998). El primer depósito marino registrado cubre uniformemente posiciones de cuenca profunda hasta marginales y se interpreta como una sábana agradacional. En registraciones de sísmica somera se nota como este depósito cubre los paleorelieves. Los asteriscos muestran la ubicación de dataciones radimétricas de conchillas de moluscos que mostraron edades equivalentes.

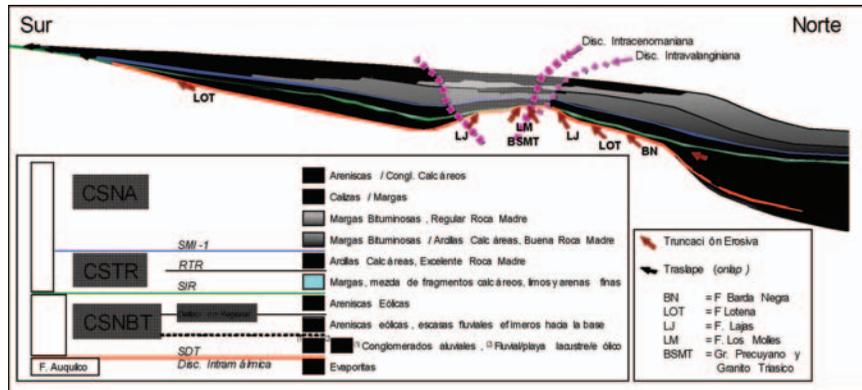


Figura 27. Modelo estratigráfico secuencial propuesto (modificado de Mutti et al., 1994 y Legarreta, 2002). CSNBT: cortejo sedimentario de nivel bajo total; CSTR: cortejo sedimentario de transgresión rápida; CSNA: cortejo sedimentario de nivel alto. El CSTR presenta gran continuidad facial y de espesores, no muestra migración lateral de facies ni traslape costero. Su base está conformada por el RTR, también de continuidad regional.

carga Los Molles y Vaca Muerta en el sector central de la Cuenca Neuquina, Argentina", 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 2002.

Di Gregorio, J., "Neuquén", en Leanza, A. F. (dir. y ed.), *Geología regional argentina*, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 1972, pp. 439-505.

De Ferraris, C. I. C., "Edad del arco o dorsal antiagua del Neuquén oriental de acuerdo con la estratigrafía de la zona inmediata", en *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 2, Nº 3, Buenos Aires, 1947, pp. 256-283.

Fernández, M.; Verzi, H. y Hechem, J., "Modelo evolutivo de las secuencias calloviano medio-kimmeridgiano/tithoniano temprano en la porción centro oriental de la Cuenca Neuquina-Argentina", 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 2002.

Fryberger y Ahlbrandt, "Mechanisms for the Formation of Aeolian Sand Seas", en *Zeitschrift für Geomorphologie*, Nº 23, 1979, pp. 440-460.

Groeber, P., "Estratigrafía del Dogger de la República Argentina. Estudio sintético comparativo", en *Boletín de la Dirección General de Geología e Hidrogeología*, Nº 18, Buenos Aires, 1918, pp. 1-81.

Groeber, P., "Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. Hoja Chos Malal", en *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. I, Nº 3, Buenos Aires, 1946, pp. 177-208.

Gulisano C. y Gutiérrez Pleimling, A., "The Jurassic of Neuquén Basin. a) Neuquén Province. Field Guide", en serie E, Nº 2, Secretaría de Minería

de la Nación y Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, 1994.

Herrero Ducloux, A., "Contribución al conocimiento geológico del Neuquén extraandino", en *Boletín de Informaciones Petroleras*, vol. 23, Nº 226, Buenos Aires, 1946, pp. 245-281.

Herries, R. D., "Contrasting Styles of Fluvial-Aeolian Interaction at a Downwind Erg Margin: Jurassic Kayenta-Navajo Transition, Northeastern Arizona, USA", en North y Posser, *Characterization of Fluvial and Aeolian Reservoirs, Geological Society Special Publication*, Nº 73, 1993, pp. 199-218.

Gómez Omil, R.; Schmithalter, J.; Cangini, A.; Albariño, L.; Corsi, A., "El Grupo Cuyo en la Dorsal de Huincul, consideraciones estratigráficas, tectónicas y petroleras. Cuenca Neuquina", 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 2002.

Keidel, J., "Sobre la estructura tectónica de las capas petrolíferas en el oriente del territorio del Neuquén", publicación del Ministerio de Agricultura, Dirección General de Minería y Geología, Nº 8, Buenos Aires, 1925, pp. 5-67.

Lancaster, N., "Dune Morphology and Dynamics", en Abrahams, A. y Parson, A. (eds.), *Geomorphology of Desert Environment*, Londres, Chapman & Hall, 1994.

Leanza, H. A. y Hugo, C. A., "Sucesión de amontes y edad de la formación Vaca Muerta y sincrónicas entre los paralelos 35 y 40 I.s., Cuenca Neuquina-Mendocina", en *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, tomo XXXII, Nº 4, octubre-diciembre, Buenos Aires, 1977.

Legarreta, L. y Gulisano, C. A., "Análisis estratigrá-

co de la Cuenca Neuquina (triásico superior-terciario inferior)", en Chebli, G. A. y Spalletti, L. (eds.), *Cuencas sedimentarias argentinas*, Simposio de Cuencas Sedimentarias Argentinas, Serie Correlaciones Geológicas, Nº 6, Tucumán, 1989, pp. 221-243.

Legarreta, L. y Uliana, M. A., "La sucesión jurásica en el centro-oeste de Argentina. Arreglo estratigráfico, secuencias y evolución paleogeográfica", en *Boletín de Informaciones Petroleras*, 3ra. época, año XII, Nº 45, Buenos Aires, 1996, pp. 66-78.

Legarreta, L.; Laffitte, G. y Minniti, S., "Cuenca Neuquina: múltiples posibilidades en la serie jurásico-cretácicas del depocentro periandino", 4º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Mar del Plata, 1999.

Legarreta, L., "Desiccation Events and Non-Marine Clastic Lowstands in the Neuquina Basin: Stratigraphy, Facies and Hydrocarbon Distribution", Hedberg Conference, American Association of Petroleum Geologists, Mendoza, 2001, pp. 28-29.

Legarreta, L., "Eventos de desecación en la Cuenca Neuquina: depósitos continentales y distribución de hidrocarburos", 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 2002.

Limeres, M., "Sequence Stratigraphy of the Lower-Middle Jurassic in Southern Neuquén: Implication or Unraveling Synsedimentary Tectonics along the Huincul Wrench System", GeoResearch Forum, *Advances in Jurassic Research*, vols. 1-2, Suiza, Transtec Publications, 1996, pp. 295-304.

Malone, P.; Saavedra, C.; Vergani, G.; Ferrero, J. C. y Schiuma, M., "Reservorios del jurásico medio (Grupo Cuyo Superior), Cuenca Neuquina", Simposio de Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina, 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 2002.

Marchese, H. G., "Litoestratigrafía y variaciones faciales de las sedimentitas mesozoicas de la Cuenca Neuquina, provincia de Neuquén, República Argentina", en *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 26, 1971, pp. 343-410.

Maretti, H.; Carbone, O.; Gazzera, C. y Schiuma, M., "Los reservorios de la formación Tordillo", en Schiuma, M.; Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (eds.), *Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina*, 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 2002, pp. 335-358.

Meyer, B. L. y Nederlof, M. H., "Identification of Source Rocks on Wireline Logs by Density/Resistivity and Sonic Transit Time/Resistivity Crossplots", en *AAPG Bulletin*, vol. 68, Nº 2, 1984, pp.121-129.

Mitchum, R. y Uliana, M. A., "Sequence Stratigraphy of Carbonate Depositional Sequences, Upper Jurassic-Lower Cretaceous, Neuquén Basin, Argentina", en Berg, B. R. y Wolberton, D. G. (eds.), *Seismic Stratigraphy II: An Integrated Approach to Hydrocarbon Analysis*, American Association of Petroleum Geologists, *Memoir*, Nº 39, Tulsa, 1985, pp. 255-274.

Muñoz, M.; Giusiano, M. y Conti Persino, A., "El origen eólico de la formación Tordillo (miembro Verde), en el yacimiento Loma La Lata, provincia del Neuquén", 9º Congreso Geológico Argentino, 1984, actas V, pp. 315-323.

Mutti, E.; Gulisano, C. A. y Legarreta, L., "Anomalous Systems Tracts Stacking Patterns

- within Third Order Depositional Sequences (Jurassic-Cretaceous Back-Arc Neuquen Basin, Argentina Andes)", en Posamentier, H. W. y Mutti, E. (conv.), 2º High-Resolution Sequence Stratigraphy Conference, 20 al 27 de junio, Abstract Book, 1994, pp. 137-143.
- Mosquera, A., "Inversión tectónica jurásico inferior en el sector central de la Dorsal de Huincul, Área Los Bastos", 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Mar del Plata, 2002.
- Parker, G., "Relevamiento geológico a escala 1:25.000 entre el arroyo Picún Leufú y Catan Lil, a ambos lados de la ruta nacional N° 40", YPF, mimeo, 1965.
- Peroni, G.; Di Mario, J. y Arregui, C., "Estudio estadístico de perfiles de buzamiento aplicado al análisis de paleoambientes. Formación Tordillo (Cuenca Neuquina), provincia del Neuquén", 9º Congreso Geológico Argentino, 1984, actas V, pp. 243-257.
- Ploszkiewics, J. V.; Orchueta, L.; Vaillard, J. C. y Viñes, R., "Compresión y desplazamiento lateral en la zona de la falla Huincul, estructuras asociadas, provincia del Neuquén", 9º Congreso Geológico Argentino, Bariloche, 1984, actas II, pp. 163-169.
- Ryan, W. y Pitman, W., *Noah's Flood: The New Scientific Discoveries about the Event that Changed History*, Nueva York, Simon & Schuster, 1998.
- Orchueta, L.; Ploszkiewics, J. V. y Viñes, R., "Reinterpretación estructural de la denominada 'Dorsal Neuquina'", 8º Congreso Geológico Argentino, San Luis, 20 al 26 de septiembre, 1981, actas III, pp. 281-293.
- Uliana, M. A.; Biddle, K. T. y Cerdan, J., "Mesozoic Extension and the Formation of Argentina Sedimentary Basins", en Tankard, A. J. y Balkwill, H. R. (eds.), *Extensional Tectonics and Stratigraphy of the North Atlantic Margins*, AAPG Memoir, N° 46, 1989, pp. 615-631.
- Uliana, M. A.; Legarreta, L.; Laffitte, G. A. y Villar, H. J., "Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburo en las cuencas petrolíferas de Argentina", 4º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Buenos Aires, 1999, tomo I, pp. 1-62.
- Vail, P. R., "Seismic Stratigraphy Interpretations using Sequence Stratigraphy Interpretation Procedure", en Bally, A. W. (ed.), *Atlas of Seismic Stratigraphy*, AAPG Studies in Geology, N° 27, 1987, pp. 1-10.
- Van Wagoner, J. C.; Mitchum, R. M.; Campion, K. M. y Rahmanian, V. D., "Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts for High-Resolution Correlation of Time and Facies", *Methods in Exploration Series*, N° 7, American Association of Petroleum Geologists, 1990, p. 55.
- Veiga, R.; Pángaro, F. y Fernández, M., "Modelo bidimensional y migración de hidrocarburos en el ámbito occidental de la Dorsal de Huincul, Cuenca Neuquina, Argentina", 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Mar del Plata, 2002.
- Vergani, G. D.; Tankard, A. J.; Belotti, H. J. y Welsink, H. J., "Tectonic Evolution and Paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina", en Tankard, A. J.; Suárez S., R. y Welsink, H. J., *Petroleum Basins of South America*, AAPG Memoir, N° 62, 1995, pp. 383-402.
- Villar, H. J.; Laffitte, G. y Legarreta, L., "The Source Rocks of the Mesozoic Petroleum Systems of Argentina: A Comparative Overview on their Geochemistry, Paleoenvironments and Hydrocarbon Generation Patterns", International Congress and Exhibition of the AAPG, Río de Janeiro, 1998, abstracts, pp. 186-187.
- Wilson, I. G., "Ergs", en *Sedimentary Geology*, N° 10, 1973, pp. 77-106.
- Zavala, C., "Estratigrafía y análisis de facies de la formación Lajas (jurásico medio) en el sector suroccidental de la Cuenca Neuquina. Provincia del Neuquén. República Argentina", tesis doctoral, inédita, 1993.
- Zavala, C. y Freije, H., "Cuñas clásticas jurásicas vinculadas a la Dorsal de Huincul. Un ejemplo del área de Picún Leufú. Cuenca Neuquina, Argentina", 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Mar del Plata, 2002.
- Zavala, C. y González, R., "Estratigrafía del Grupo Cuyo (jurásico inferior-medio) en la sierra de la Vaca Muerta, Cuenca Neuquina", en *Boletín de Informaciones Petroleras*, 3ra. época, año XVII, N° 65, 2001, pp. 40-54.
- Zavala, C. y Freije, H., "Cuñas clásticas jurásicas vinculadas a la Dorsal de Huincul. Un ejemplo del área Picún Leufú. Cuenca Neuquina, Argentina", 5º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Mar del Plata, 2002.