

LOS DEPÓSITOS EÓLICOS DE LA FORMACIÓN MULICHINCO (VALANGINIANO) EN EL ÁREA FORTÍN DE PIEDRA – CUENCA NEUQUINA

Carlos Zavala¹, Alfonso Mosquera² y Hyung Joo Kim²

¹ Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur. CONICET, Instituto Argentino de Oceanografía. Camino de la Carrindanga km 7,5. 8000 Bahía Blanca. czavala@criba.edu.ar

² Tecpetrol S.A., Gerencia de Exploración, Della Paolera 229 - Piso 22, C1001ADA - Buenos Aires.
Alfonso.Mosquera@tecpetrol.com; pablo.kim@tecpetrol.com

Palabras clave: Cuenca Neuquina, Formación Mulichinco, sistemas eólicos, trampas estratigráficas.

Abstract. *Aeolian deposits of the Mulichinco Formation in the Fortin de Piedra area*

The Mulichinco Formation is a mainly clastic unit broadly developed in the Lower Cretaceous of the Neuquén Basin. The unit is composed of up to 500 meters of continental to shallow marine deposits having a clear transgressive tendency. In central basin positions the Mulichinco Formation is one of the main hydrocarbon reservoirs, with petrophysical properties largely controlled by facies, stratigraphy and structural position. After a pioneer study of the YPF.Nq.AP.a-12 well in 1987, aeolian deposits were recognized at the base of the succession. This paper deals with the sedimentology and stratigraphy of the aeolian deposits located at the base of the Mulichinco Formation in the Fortín de Piedra area. Studies were conducted on cores of three wells, which were complemented with log correlation and 3D seismic analysis. Five aeolian facies (SeGD, SeLT, Sem, Semd and Sei) were recognized, which build-up three aeolian depositional sequences (S1, S2 and S3) extended along the entire study area. These sequences start over a deflation surface and were accumulated by migrating aeolian grainfall dunes with an overall fining-upward depositional trend. Deposits of sequences 2 and 3 start with fine to medium grained quartz-rich sandstones, and progressively evolve into fine-grained lithic sandstones showing an increasing diagenesis. The basal quartz-rich intervals have the best petrophysical properties within each sequence. Consequently, each sequence could contain both reservoir and seal. The thickness and distribution of the basal quartz-rich sandstones is controlled by the topography of the deflation surface, thus defining potential stratigraphic traps.

INTRODUCCIÓN

La Formación Mulichinco (Weaver 1931, Valanginiano tardío) constituye en subsuelo uno de los principales reservorios de hidrocarburos de la Cuenca Neuquina. Las rocas de esta unidad afloran ampliamente en el centro-oeste de la Cuenca Neuquina, donde se integran por depósitos clásticos, fluviales a marino marginales, con un espesor de hasta 500 metros (Zavala 1999; 2000). En áreas de afloramiento, la Formación Mulichinco se apoya discordantemente (discordancia Intravalanginiana) sobre pelitas de *off-shore* de la Formación Vaca Muerta (Weaver 1931) y depósitos marino-marginales de la Formación Quintuco (Weaver 1931), siendo a su vez cubierta en contacto neto por las pelitas de plataforma de la Formación Agrio (Weaver 1931, Gulisano *et al.* 1984). Gulisano *et al.* (1984) relacionan a la Formación Mulichinco con depósitos de mar bajo (*lowstand*) con los que se iniciaría el ciclo marino correspondiente al tramo superior del Grupo Mendoza. La Formación Mulichinco muestra asimismo una amplia distribución en el subsuelo, en donde se integra por depósitos clásticos hasta carbonáticos, para los cuales se han reconocido tres secciones, denominadas como inferior, media y superior (Vottero y Gonzalez 2002). Estas tres secciones registran en general una tendencia transgresiva, la cual culmina con la ingresión marina del Hauteriviano Temprano (Fm Agrio). En áreas centrales de la cuenca, la sección inferior se compone fundamentalmente por depósitos de areniscas finas. En un trabajo pionero e inédito efectuado por Soave *et al.* (1987), se propuso por primera vez un origen eólico para estas areniscas. Dicha interpretación se efectuó a partir del estudio de un tramo de corona perteneciente al pozo YPF.Nq.AP.a-12 (Aguada Pichana).

En este trabajo se analizan y discuten las facies y estratigrafía de los depósitos eólicos de la Fm Mulichinco presentes en el área Fortín de Piedra, a partir del estudio de coronas pertenecientes a tres perforaciones (Aguada Pichana a-12, Paso de los Indios x-1002 y Paso de los Indios x-1). Este estudio ha sido complementado con el análisis de perfiles eléctricos, de imagen y mapeo de facies mediante sísmica 3D. Los estudios estuvieron dirigidos a obtener un mejor conocimiento de la estratigrafía, origen, tipos y variaciones de facies, distribución y continuidad de los cuerpos clásticos, a los fines de evaluar las características y distribución de los posibles reservorios y sellos de hidrocarburos.

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina ha sido definida como una cuenca de retroarco, desarrollada sobre corteza continental, y originada por el colapso termo-tectónico detrás de un arco magmático estacionario durante el Triásico Tardío (Mpodozis y Ramos, 1989). El relleno sedimentario tuvo lugar principalmente durante el Jurásico y Cretácico, con una sucesión predominantemente clástica de unos 7,000 metros (Fig. 1). Para más detalles sobre la estratigrafía de la Cuenca Neuquina el lector es referido a los trabajos de síntesis de Gulisano *et al.* (1984), Legarreta y Gulisano (1989), Gulisano y Gutierrez Pleimling (1995) y Legarreta y Uliana (1999).

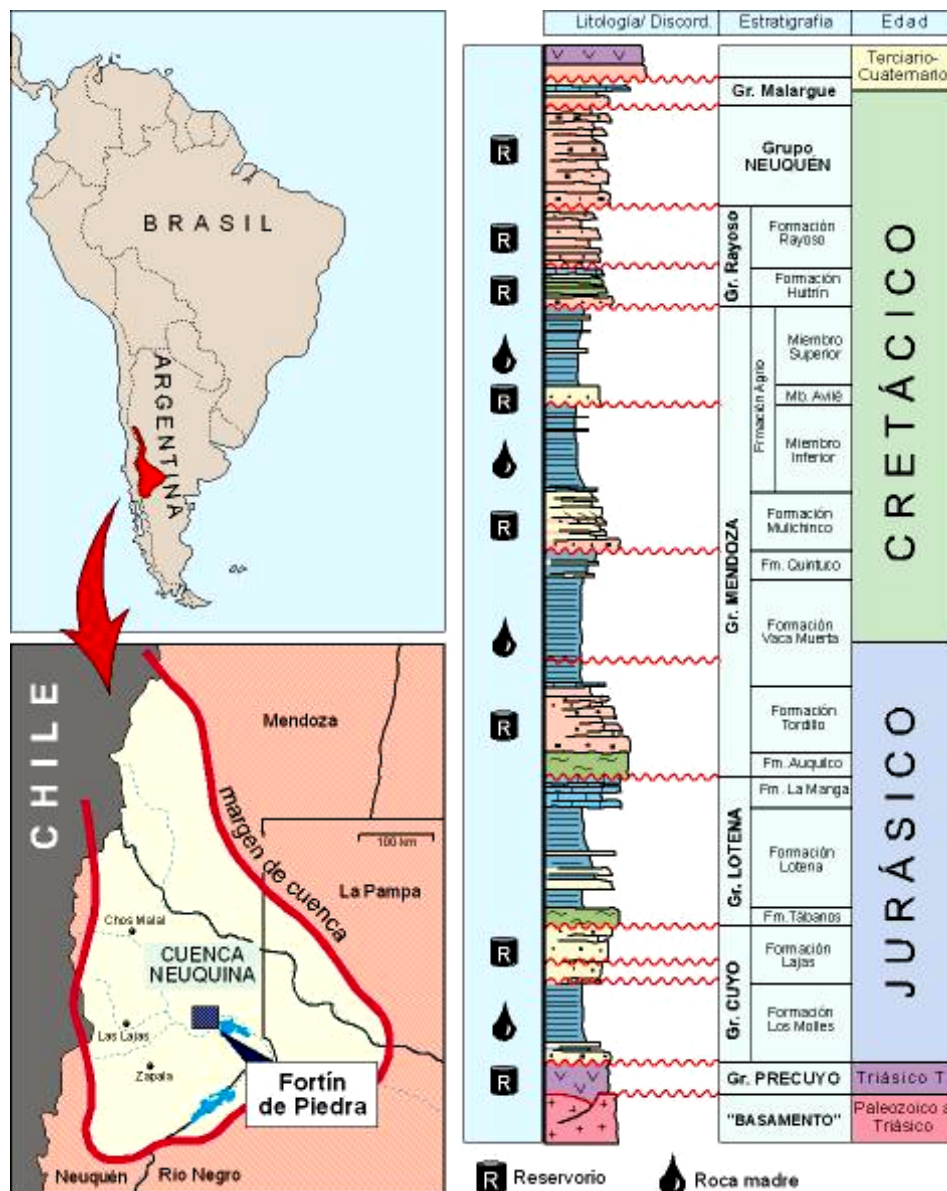


Figura 1. Mapa de ubicación y columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Neuquina. Se indica la localización del área Fortín de Piedra.

La Formación Mulichinco se compone por conglomerados, areniscas y pelitas de colores verdes y rojos, las que en algunos sectores contienen restos de troncos silicificados y fauna marina. Su contenido en fósiles de amonitas y posición estratigráfica sugieren que esta unidad se habría acumulado durante el Valanginiano tardío (Leanza 1973 ; Gulisano *et al.* 1984). Los espesores reconocidos para la Formación Mulichinco son sumamente variables, pudiendo superar los 500 metros. En su localidad tipo (cerro Mulichinco) esta unidad se dispone discordantemente sobre pelitas de plataforma de la Formación Vaca Muerta, siendo cubierta en contacto neto por las pelitas marinas con fauna del Hauteriviano de la base de la Formación Agrio. Las características parcialmente continentales (fluviales) de algunos tramos de la Formación Mulichinco motivaron que el uso de esta denominación fuera en un principio extendido para las capas rojas pre-hauterivianas de naturaleza posiblemente continental reconocidas en el sector sur de la cuenca (sub-cuenca Picún Leufú). Gulisano *et al.* (1984) propusieron un nuevo contexto estratigráfico para la Formación Mulichinco, desvinculándola definitivamente del ciclo de progradación clástica correspondiente a la base del Grupo Mendoza (Kimmeridgiano -Valanginiano temprano) (Fig. 2).

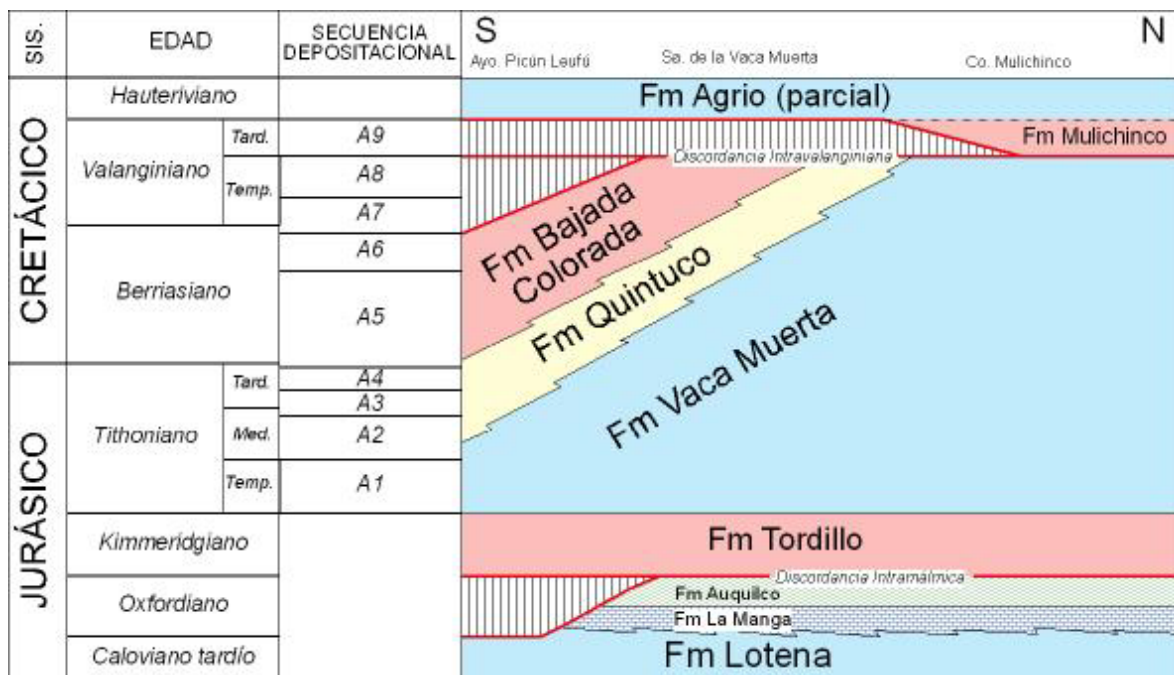


Figura 2. Carta cronoestratigráfica para el Caloviano-Hauteriviano del centro oeste de la Cuenca Neuquina. Redibujado de Gulisano *et al.* (1984).

De esta manera, el uso del término Formación Mulichinco quedó restringido para los depósitos clásticos localizados por encima de la discordancia Intravalanginiana (Gulisano *et al.* 1984) mientras que los depósitos gruesos genéticamente equivalentes a las formaciones Vaca Muerta y Quintuco en el sector sur de la cuenca han sido posteriormente reconocidos como Formación Bajada Colorada (utilizando una antigua denominación de Roll, 1939). Estos autores interpretaron asimismo que la Formación Mulichinco se habría originado como consecuencia de una caída del nivel del mar, correspondiendo por lo tanto sus depósitos a la secuencia A9 de dichos autores (Fig. 2), relacionada con la Mesosecuencia Mendoza Media (Legarreta y Gulisano 1989).

METODOLOGÍA

La primera etapa de este estudio comprendió el análisis detallado de algunos tramos de testigos corona asignados previamente a la Formación Mulichinco, correspondientes a los pozos Aguada Pichana a-12, Paso de los Indios x-1002 y Paso de los Indios x-1, los cuales se localizan en el área Fortín de Piedra (Fig. 3). Los criterios surgidos del análisis de facies y estratigráfico de las coronas fueron integrados y enriquecidos mediante correlaciones de perfiles eléctricos y la utilización de sísmica 3D (Mosquera *et al.* 2005).

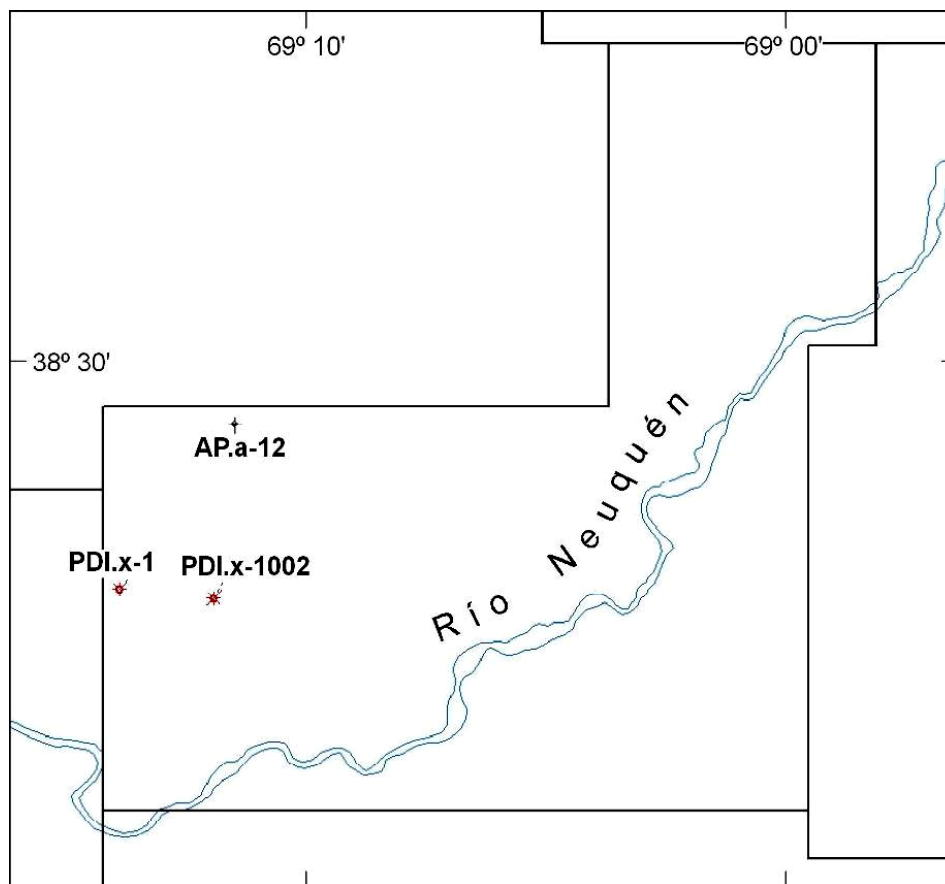


Figura 3: Mapa de ubicación de los sondeos APA-12, PDIx-1002 y PDIx-1

ANÁLISIS DE FACIES Y ESTRATIGRÁFICO

La descripción detallada de las coronas, integrada con el análisis de sísmica 3D y perfiles eléctricos, ha permitido reconocer, dentro del área Fortín de Piedra, la existencia de al menos 5 secuencias depositacionales para la Formación Mulichinco. En la Fig. 4 se muestra una correlación detallada de los tramos de corona analizados, donde se indican las secuencias depositacionales reconocidas. En dicha correlación puede observarse que solo el pozo APA-12 contiene un registro de corona casi completo de la unidad en estudio, mientras que para los pozos PDIx-1 y PDIx-1002 los registros son parciales. En concordancia con lo establecido por Soave *et al.* (1987), el análisis de facies sugiere un origen eólico para las tres secuencias depositacionales inferiores (secuencias 1, 2 y 3). Las secuencias 4 y 5, por otra parte, corresponderían a sistemas fluvio-lacustres y sistemas marino-marginales a de plataforma restringida respectivamente. A los fines de esta contribución sólo serán discutidos el origen y evolución de las 3 secuencias inferiores eólicas.

A excepción de la secuencia 1, cuya base no ha podido ser controlada mediante el estudio de coronas, las secuencias 2 y 3 se desarrollan a partir de una superficie de deflación de carácter regional (o super superficie, en el sentido de Havholm y Kocurek 1994) y muestran un arreglo interno granodecreciente.

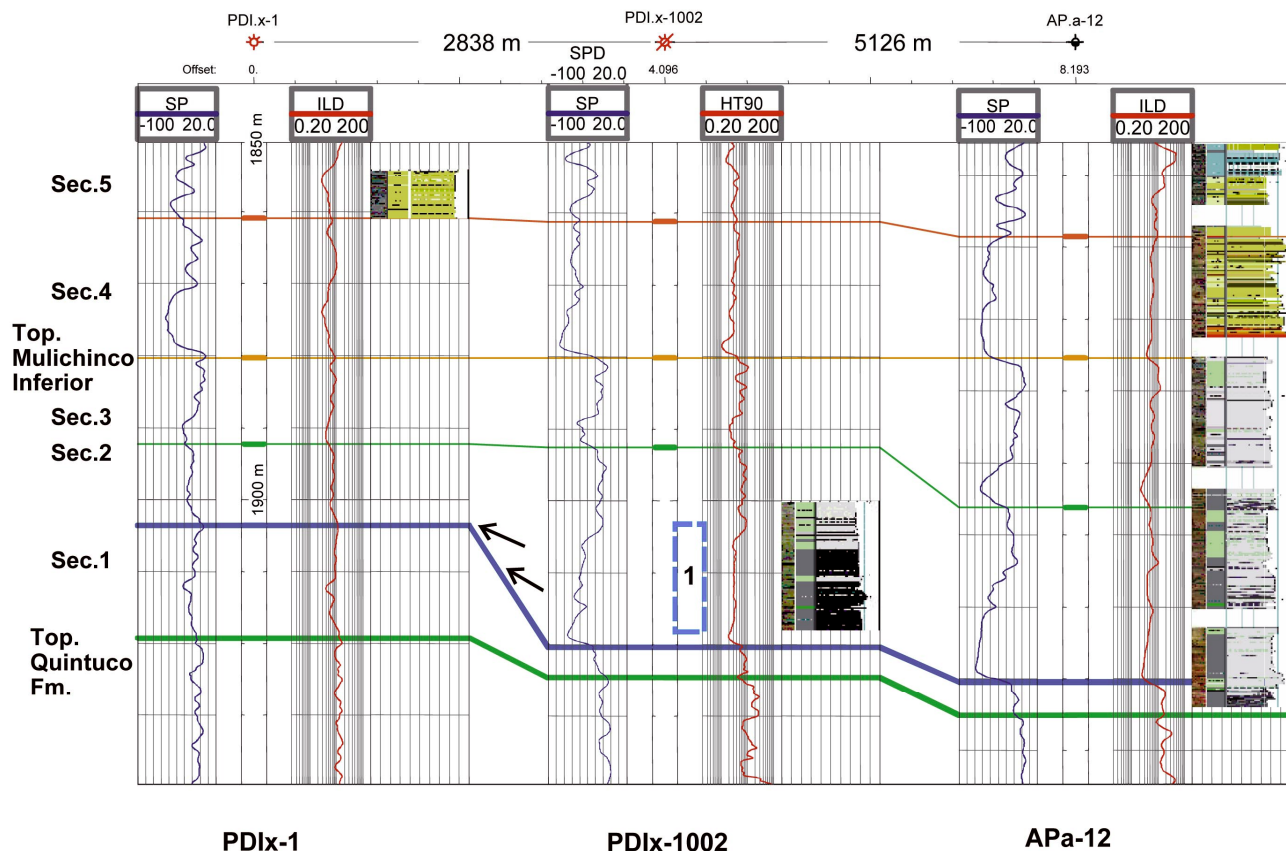


Figura 4: Correlación de los tramos de corona analizados, correspondientes a los pozos AP.a-12, PDI.x-1002 y PDI.x-1. Se indican las 5 secuencias depositacionales reconocidas y la localización (1) del perfil de imagen de la Fig. 5. Note la superficie de erosión (deflación) localizada a la base de la secuencia 2.

Los depósitos eólicos se componen por una familia de facies predominantemente areniscosas y en menor medida sabulíticas, cuyas principales características se sintetizan en la Fig. 5. La integración del análisis de facies con datos de *dipmeter* (Fig. 6) permitió determinar una dirección de paleovientos orientada hacia el SE.

facies		litología	estructuras sedimentarias	geometría	origen	espesor (metros)
Facies eólicas	SeGD	areniscas finas a gruesas	masivas a laminadas inclinación creciente hasta 20°	cuerpos tabulares	migración de dunas eólicas de <i>grainfall</i>	2 - 6
	SeLT	areniscas finas a gruesas	laminación horizontal a de bajo ángulo, integrando dunas de <i>grainfall</i> (Gfd)	cuerpos tabulares	migración de ondulitas eólicas (climbing translantent strata)	0.002 - 0.02 (láminas individuales)
	Sem	areniscas finas a medias	masivas, <i>clay flakes</i>	cuerpos tabulares a lenticulares	decantación en la zona de baja velocidad del frente de avance de dunas de <i>grainfall</i>	0.4 - 4
	Semd	areniscas finas a medias	masivas, moteado diagénético	cuerpos tabulares	depósitos eólicos obliteración de estructuras primarias por diagénesis	1 - 4
	Sei	areniscas finas a medias	masivas, escape de agua, <i>ripples</i> adhesivos	cuerpos tabulares a lenticulares	depósitos de decantación y atrapados por tensión superficial	0.3 - 0.5

Figura 5: Características de las principales facies eólicas reconocidas para la Formación Mulichinco en el área de Fortín de Piedra.

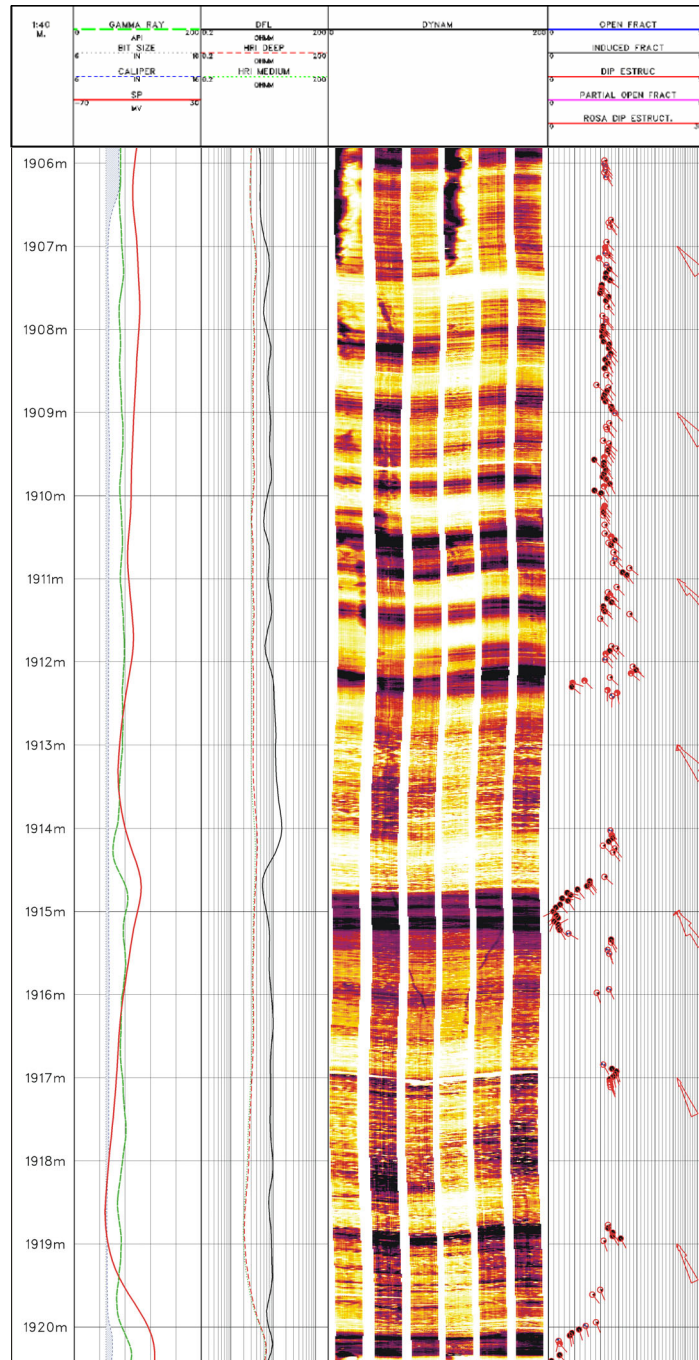


Figura 5: Particular de un tramo del perfil de imagen del pozo PDI.x-1002 (Secuencia 2, Fm. Mulichinco). Note la dirección preferencial de inclinación de las capas hacia el SE, con valores que en general no superan los 25°. Estas formas inclinadas corresponderían al frente de avance de dunas eólicas de *grainfall*.

Facies de dunas de *grainfall* (SeGD)

Esta facies corresponde en realidad a una secuencia de facies, ya que se integra a su vez por las facies SeLT y Sem. Se compone por areniscas finas a gruesas laminadas a masivas, separadas por superficies de truncación de bajo ángulo, las cuales conforman bancos tabulares con espesores preservados de entre 2 a 6 metros. En el sector basal, las láminas son en general subhorizontales, y se componen por arenas más finas, las cuales constituyen facies SeLT. Este nivel basal presenta espesores de hasta 1 metro, y muestra progresivamente hacia arriba un incremento en el ángulo de inclinación y espesor de las láminas individuales (Fig. 6).

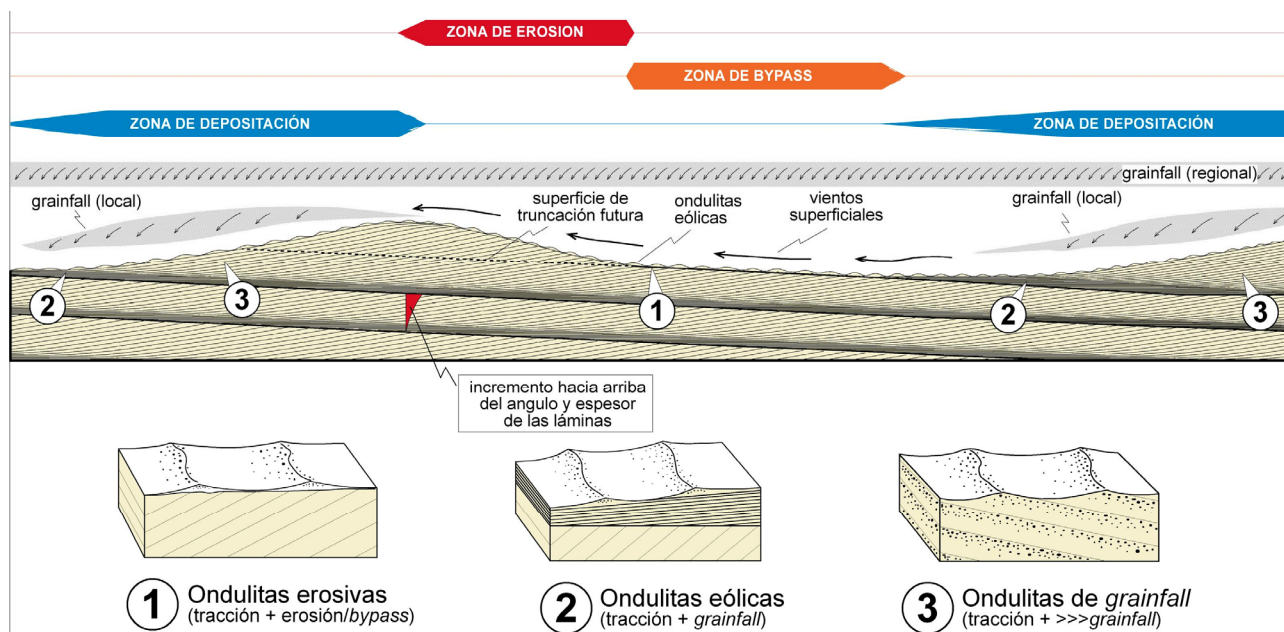


Figura 6: Diagrama esquematizando las principales características internas de una duna de *grainfall*, correspondiente a la facies SeGD. Note que a consecuencia del efecto combinado de la lluvia de granos (*grainfall*) regional y la presencia de ondulitas sobre toda la superficie estas dunas muestran un bajo ángulo en el frente de avance, inferior al ángulo de reposo, el cual es necesario para producir deslizamientos gravitacionales de tipo *sandflow*. Los blocks diagrama esquemáticos en el sector inferior muestran tres tipos de ondulitas, relacionadas a erosión, moderado *grainfall* y alto *grainfall*. Se indican asimismo las zonas de depositación, *bypass* y erosión dentro de las dunas. Note asimismo como la capa resultante muestra un aumento gradual en el ángulo y espesor de las láminas. Sin escalas.

El ángulo de inclinación de las láminas en general no supera los 20° (Figs. 5 y 7F), pudiendo alcanzar excepcionalmente los 27° . Hacia el techo de las facies SeGD tienden a predominar las arenas masivas (facies Sem, Fig. 7D), las cuales son truncadas a bajo ángulo por la base del siguiente *set*. Se interpreta que esta facies se habría acumulado a consecuencia de la migración lateral de formas de fondo eólicas de bajo relieve, correspondientes a dunas de *grainfall* (*grainfall protodunes* de Kocurek *et al.* 1992). Al contrario de las dunas de *sandflow*, donde los materiales son transportados por tracción hacia la cresta, en estas dunas existe una importante acumulación hacia el frente de avance y pie de duna, relacionada fundamentalmente a la lluvia de material transportado en suspensión por el viento. Dicha lluvia de granos se ve favorecida por la disminución de velocidad existente a expensas de la expansión del flujo registrada a sotavento de las dunas de *grainfall*. Consecuentemente, la interacción entre tracción y lluvia de granos (*grainfall*) hace que las dunas de *grainfall* constituyan formas de fondo de bajo relieve, tapizadas casi totalmente por ondulitas eólicas. Los depósitos asociados a estas últimas constituyen láminas (laminación traslacente subcrítica, o facies SeLT) con espesores e inclinación dependiente de su ubicación dentro del perfil de la duna. La relevancia de los procesos depositacionales en el frente de avance de la duna a expensas de la tracción hacia la cresta, hace que el perfil de equilibrio no crezca hasta los valores críticos necesarios para producir avalanchamientos gravitacionales o de *sandflow*. Las dunas de *grainfall*, de esta manera, indicarían la existencia de procesos de *grainfall* regionales, asociados a vientos con un gran contenido de polvo en suspensión (vientos sucios). La heterogeneidad de los aportes hace que los depósitos eólicos asociados a dunas de *grainfall* son típicamente bimodales hasta trimodales.

Facies de areniscas laminadas con Laminación Traslacente (SeLT)

Esta facies se compone por areniscas finas a medias, las cuales presentan una laminación paralela a subparalela de bajo ángulo. Las láminas individuales muestran espesores que normalmente van de 0,2 a 2 cm, e internamente presentan gradación inversa (Figs. 7E, 7F y 8).

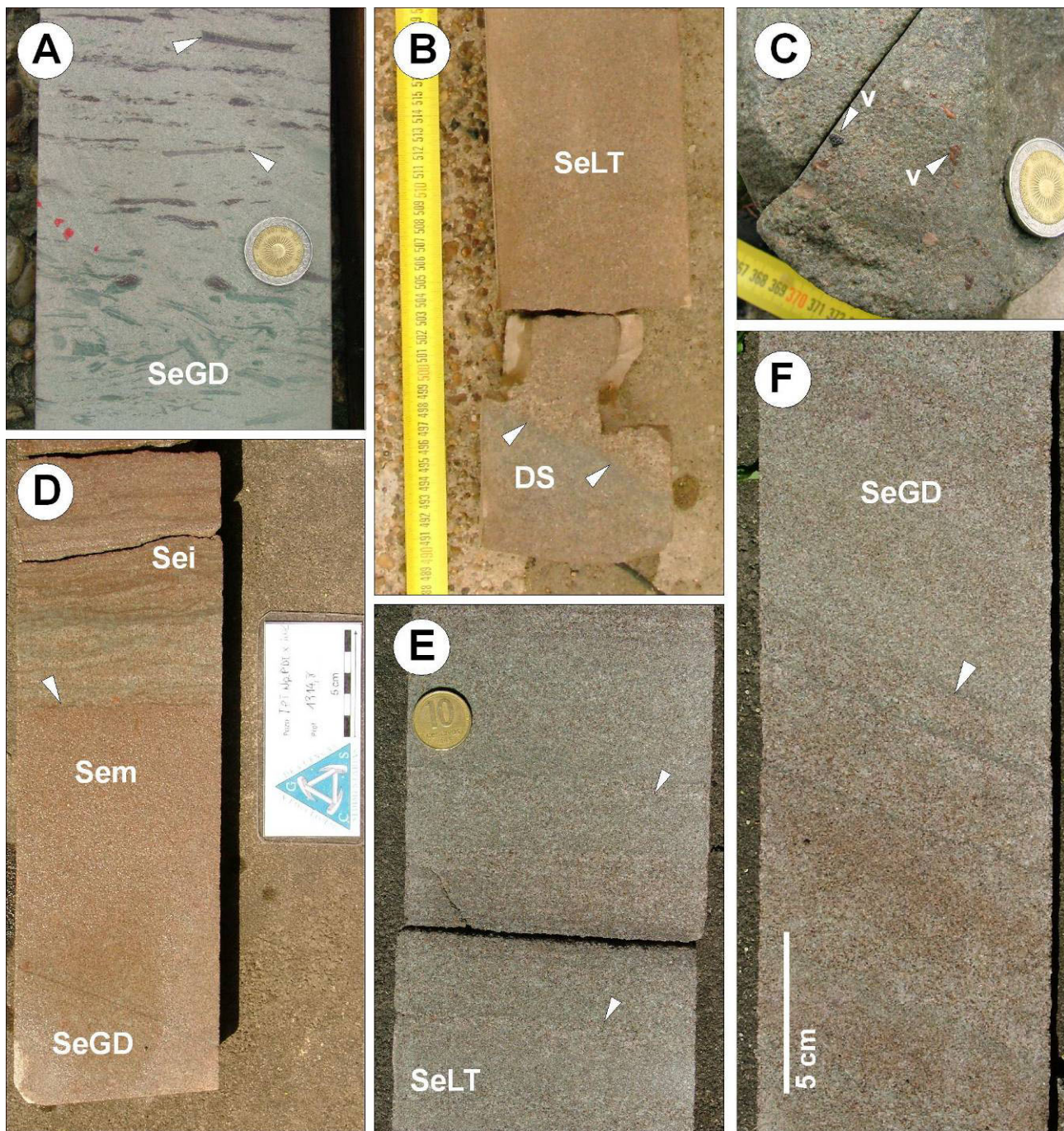


Figura 7: Principales características de las facies eólicas de la Formación Mulichinco en el área Fortín de Piedra. **A)** Areniscas finas con abundantes clastos de arcilla. La forma alargada y la presencia de cortes rectos (flechas) sugiere que los mismos podrían corresponder a *clay flakes*. Secuencia 1, AP.a-12, 1985,5 mbbp. **B)** Vista de la superficie de deflación irregular (DS) localizada a la base de la Secuencia 2 (AP.a-12, 1980,6 mbbp). **C)** Detalle de pequeños ventifactos ubicados sobre la superficie de deflación correspondiente a la base de la Secuencia 3 (AP.a-12, 1956,2 mbbp). **D)** Areniscas con estratificación diagonal sucedidas por arenas masivas, correspondientes a dunas de grainfall. Hacia el techo se reconocen en contacto neto (flecha) areniscas sucias de interduna (PDI.x-1002, 1914,8 mbbp). **E y F)** Areniscas laminadas con gradación inversa (flechas), correspondientes a laminación traslacente subcrítica, estructura diagnóstica de la actividad eólica. Esta estructura puede aparecer subhorizontal, o con ángulo moderado en el frente de avance de dunas de *grainfall* (PDI.x-1002, 1908,4 y 1913,8 mbbp).

Se interpreta que estas láminas se habrían acumulado a consecuencia de la migración lateral de ondulitas eólicas subcríticas, por lo que corresponderían a laminación traslacente subcrítica (*climbing tralacent strata*, Hunter 1977), estructura sedimentaria diagnóstica de la actividad eólica. El apilamiento vertical de esta facies constituye cuerpos de varios metros de espesor, formando parte constituyente de la facies de dunas eólicas de *grainfall*.

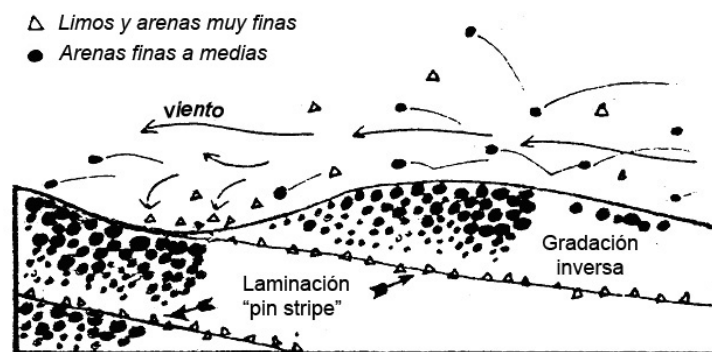


Figura 8. Esquema de la relación entre las ondulitas eólicas y la laminación traslacente subcrítica (Hunter 1977), caracterizadas por la presencia de láminas con gradación inversa (de Fryberger y Schenk 1988).

Facies de areniscas masivas eólicas (Sem)

Se compone por arenas finas a medias, masivas, de base transicional y espesores de hasta 4 metros. Esta facies se dispone a menudo en pasaje gradual sobre facies de ondulitas traslacentes (SeLT) con inclinaciones de hasta 22° (Fig. 7D). La facies Sem se interpreta como el resultado de lluvia de granos (*grainfall*) sin tracción en el frente de avance de dunas de bajo ángulo (dunas eólicas de *grainfall*). La ausencia de vientos superficiales en el frente de duna se relaciona a un incremento en la sombra aerodinámica (zona de velocidad 0) producida durante la transición entre expansión y separación de flujo, la cual se inicia aproximadamente a los 20° (Fig. 9). Al igual que las facies anteriores, esta última es parte constituyente de la facies de dunas de *grainfall*.

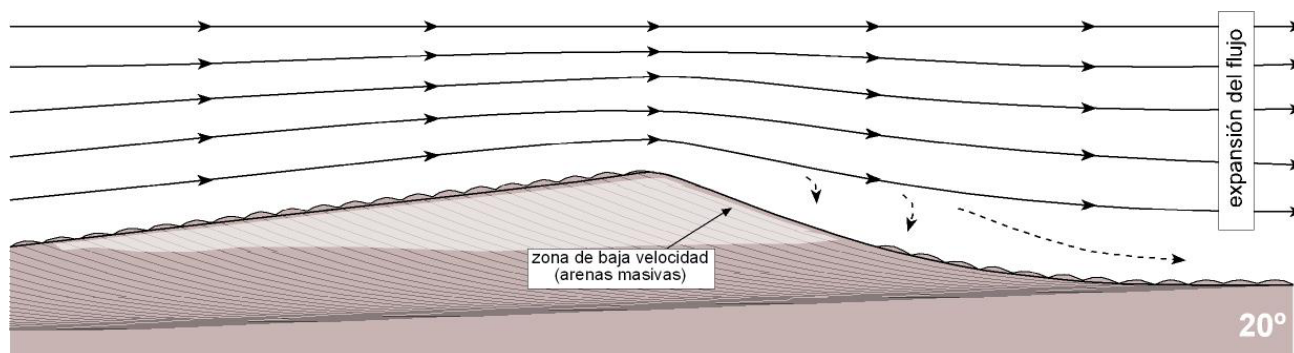


Figura 9: Las dunas de *grainfall* están dominadas por expansión de flujo. Al acercarse al ángulo crítico para el inicio de la separación de flujo (aproximadamente 20-22°) se desarrolla una zona de baja velocidad (sombra aerodinámica) en el frente de avance de la duna. La ausencia de vientos superficiales podría explicar el *grainfall* sin tracción, y por lo tanto el origen de las facies de arenas masivas eólicas (facies Sem).

Facies de areniscas masivas eólicas diagenizadas (Semd)

Esta facies se integra por areniscas finas, masivas, las cuales muestran evidencias de una moderada diagénesis (moteado). Comúnmente esta facies muestra espesores de entre 1 y 4 metros. Posiblemente el aspecto masivo de la misma se relacione en parte a una obliteración de las estructuras primarias por efecto de

la diagénesis, ya que en algunos sectores se reconocen “sombras” de una laminación primaria. Asimismo, esta diagénesis parecería en parte temprana, ya que la misma parece controlada por la existencia de discontinuidades menores en la sedimentación.

Facies de areniscas finas de interduna (Sei)

Se compone por areniscas finas a pelitas sucias (Fig. 7D), dispuestas generalmente con base neta y con espesores de hasta 50 cm. Son comunes en esta facies las estructuras de escape de agua y los niveles irregulares de areniscas más gruesas, correspondientes a ondulitas adhesivas. Las ondulitas adhesivas se relacionan al efecto de la tensión superficial del agua sobre los granos de arena, por lo que son indicativas de un pelo de agua próximo a la superficie (interduna húmeda). En sectores estos depósitos muestran una laminación disturbada (*crinkly to wave and contorted lamination*, Glennie 1970, Havholm & Kocurek 1994) por el crecimiento de cristales de evaporitas cercanos a la superficie, por lo que son interpretados como un *sabkha* continental.

MODELO ESTRATIGRÁFICO SECUENCIAL Y DE RESERVORIO PARA LOS DEPÓSITOS EÓLICOS DE LA FORMACIÓN MULICHINCO

Las 3 secuencias eólicas reconocidas para la Formación Mulichinco, en el área de Fortín de Piedra, muestran la existencia de períodos degradacionales y agradacionales. Los períodos degradacionales, se caracterizan por un episodio generalizado de erosión eólica, resultando en la generación de extensas discontinuidades o súper superficies (Havholm y Kocurek 1994). Estas superficies de deflación pueden generar relieves irregulares hasta horizontales, dependiendo de la posición del nivel freático al momento de la erosión eólica. De esta manera, si la deflación se produce con un nivel freático bajo (deflación seca) la superficie resultante puede ser marcadamente irregular, presentando un relieve de más de 40 metros. Si por el contrario el nivel freático se encuentra cercano a la superficie, las superficies de deflación mostrarán un relieve llano (deflación húmeda), ya que el límite más bajo que puede alcanzar la erosión eólica está controlado por la tensión superficial producida por el afloramiento de la tabla de agua. El intervalo de tiempo involucrado durante los períodos degradacionales a menudo es igual o mayor respecto del representado por la depositación durante los períodos agradacionales (Havholm y Kocurek 1994; Zavala y Freije 2002). Los períodos agradacionales están caracterizados por una depositación relativamente continua, la que se encuentra internamente organizada en secuencias eólicas básicas. Los períodos agradacionales a su vez pueden dividirse en subperíodos agradacionales tempranos (Early Agradational) y agradacionales tardíos (Late Agradational).

En la Fig. 10 se muestra un esquema evolutivo para los depósitos basales (eólicos) de la Formación Mulichinco, en el cual se sintetiza el origen de las tres secuencias eólicas identificadas (S1, S2 y S3). En **1** se muestra la situación al Valanginiano tardío, luego de una importante caída relativa del nivel del mar. En este contexto, los depósitos marinos de plataforma pertenecientes a las formaciones Vaca Muerta/ Quintuco se hallan expuestos, dejando al descubierto un relieve deposicional parcialmente enfatizado por una incipiente deflación (en el esquema este relieve se ha exagerado). A consecuencia del desarrollo de un sistema eólico con aporte desde el NW, las zonas más bajas sufren la acumulación de depósitos eólicos (**2**) con facies de dunas de *grainfall* e interdunas húmedas asociadas (secuencia **S1**). Estos depósitos se integran fundamentalmente por areniscas finas líticas, con pobres condiciones petrofísicas, y niveles localizados de areniscas cuarzo feldespáticas. La presencia en estos niveles areniscosos de clastos de arcilla rojizos abarquillados (clay flakes, Fig. 7A) derivados de la deflación de grietas de desecación, sugiere la existencia de interdunas húmedas en las vecindades. A consecuencia de un nuevo período degradacional (**3**) los depósitos eólicos de esta primera secuencia sufren una importante erosión eólica (deflación) con el consecuente labrado de un relieve irregular (Fig. 7B). Este relieve irregular es consecuencia de una deflación seca, con un nivel freático alejado de la superficie. La deflación y labrado de estos relieves es acompañada por una importante erosión de los depósitos expuestos en áreas adyacentes (Formación Quintuco?) con la consiguiente movilización de materiales más gruesos, de naturaleza cuarzo-feldespática. Una vez iniciado el siguiente período agradacional (**4**), estos materiales más gruesos son en parte retenidos y acumulados en las partes más bajas del relieve (Secuencia **S2a**, *Early Agradational*), junto con materiales de transporte regional.

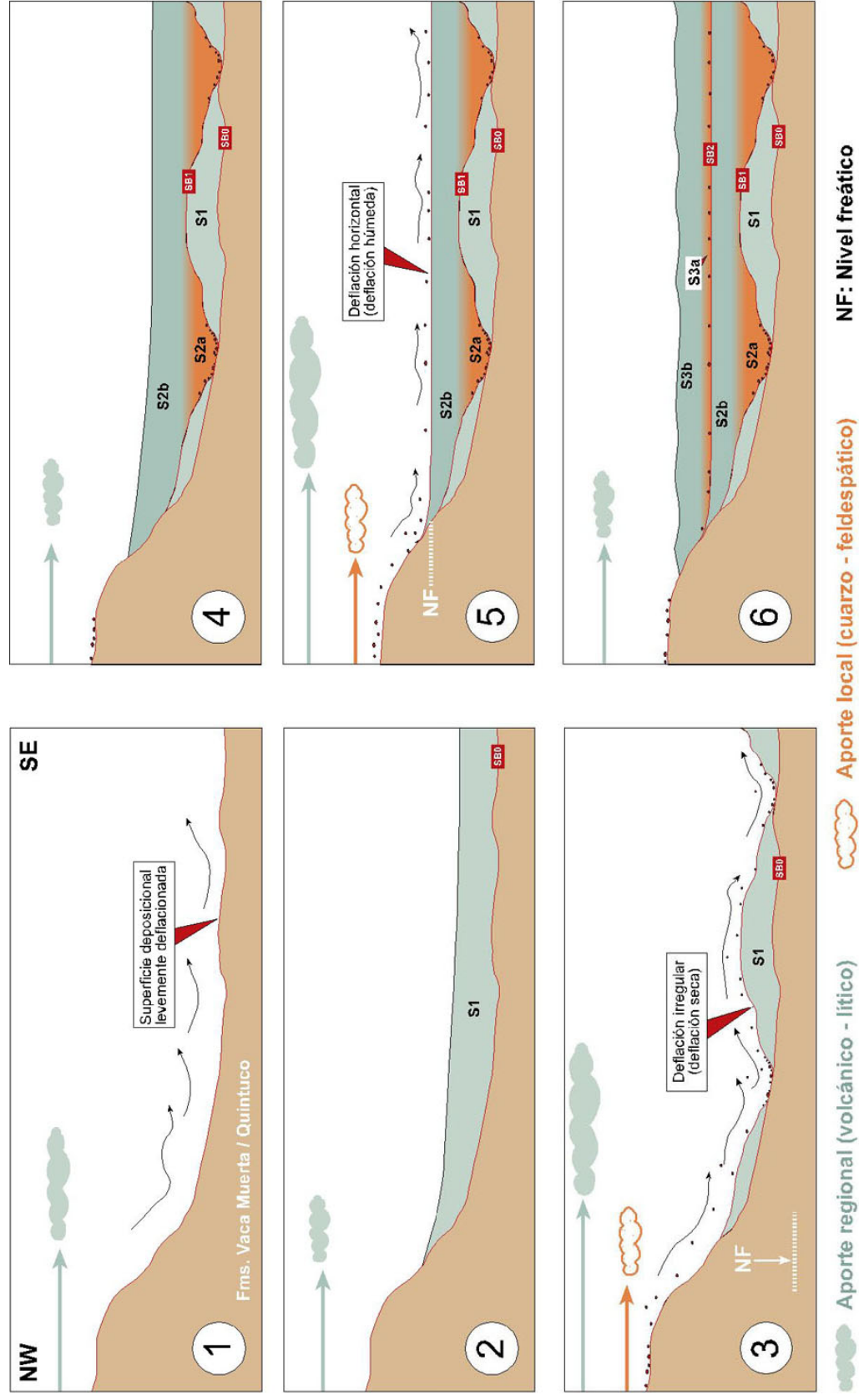


Figura 10: Esquema evolutivo para los depósitos basales (eólicos) de la **Formación Mulichinco** en el área de **Fortín de Piedra**. Los aportes regionales se componen por arenas finas líticas y polvo volcánico. Los aportes locales corresponden a areniscas medias a gruesas (hasta sabulíticas) de composición cuarzo - feldespática. Se indican las tres secuencias eólicas reconocidas (**S1**, **S2** y **S3**). Los potenciales reservorios para la unidad corresponden a los intervalos basales de las secuencias **S2** y **S3** (**S2a** y **S3a**) mientras que los sellos corresponden a la secuencia **S1** y los tramos cuspidales de las secuencias **S2** y **S3** (**S2b** y **S3b**). Note que estas últimas secuencias contienen internamente su reservorio y sello. Sin escalas.

A medida que el sistema depositacional evoluciona (*Late Agradational*) se registra una disminución progresiva de los aportes locales (Secuencia **S2b**), y una tendencia a la estabilización con un aporte dominado por los elementos regionales (areniscas finas líticas y polvo volcánico). Sobre estos depósitos se registra posteriormente un nuevo período degradacional (**5**) caracterizado por una importante deflación y remoción de materiales contaminantes (cuarzo – feldespáticos) desde áreas vecinas. A consecuencia de un nivel freático cercano a la superficie (deflación húmeda), la superficie de deflación conforma un relieve llano subhorizontal. Al igual que en **3**, los procesos erosivos habían afectado a los depósitos anteriores aflorantes en las vecindades, lo cual se evidencia por la presencia de ventifactos de naturaleza cuarzo-feldespática (Fig. 7C) a lo largo de la superficie de deflación. El inicio del siguiente período agradacional (**6**) comienza asimismo con la acumulación de los materiales cuarzo-feldespáticos removilizados (Secuencia **S3a**), conformando sistemas de dunas de *grainfall*. Al igual que la secuencia anterior (S2) el tramo superior de esta secuencia se caracteriza por una progresiva tendencia a la estabilización del sistema y un predominio hacia arriba de elementos finos regionales (Secuencia **S3b**), de naturaleza volcánica-lítica. En la Fig. 11 (modificada de Soave *et al.* 1997) se muestra un ejemplo de las secuencias reconocidas.

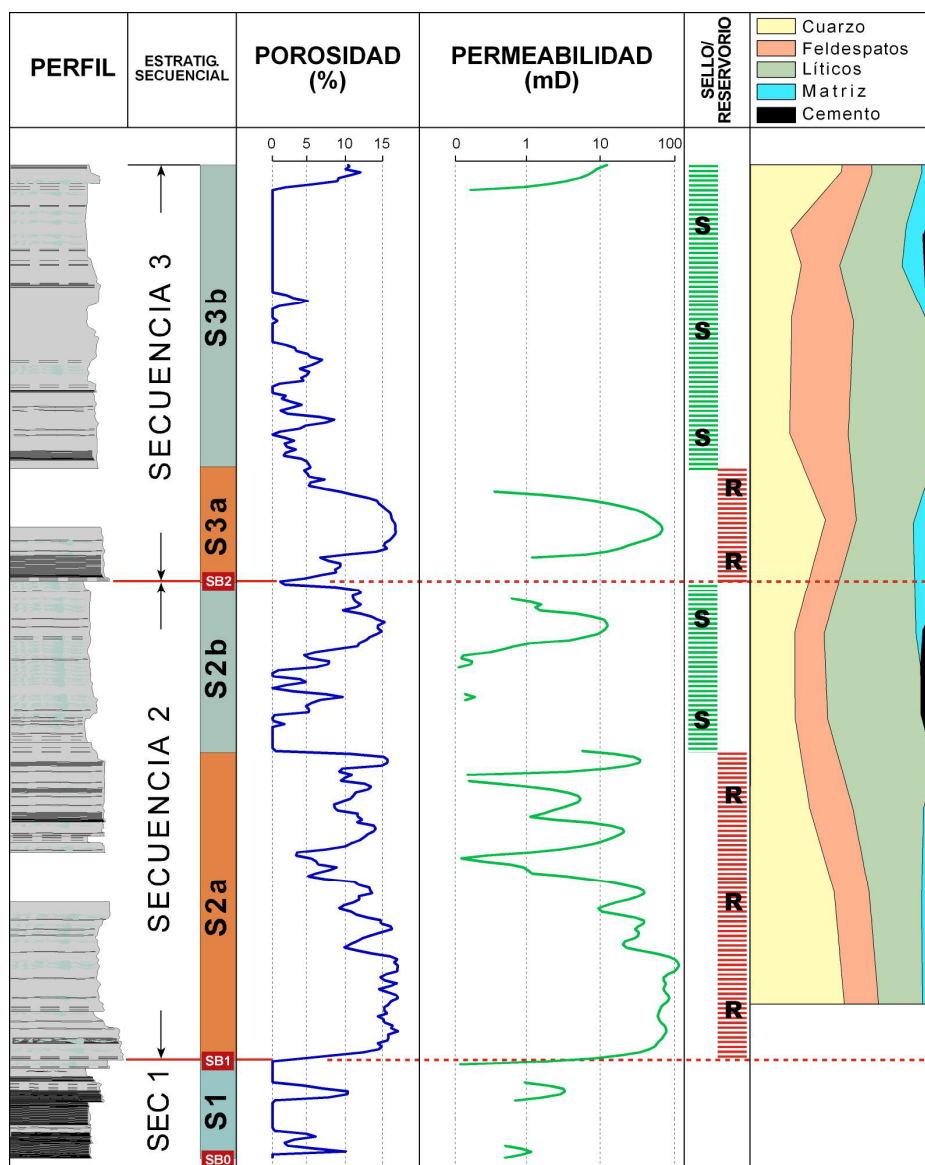


Figura 11: Grafico de integración para el tramo basal del pozo YPF.Nq.AP.a-12, modificado a partir de un esquema e idea original de Soave *et al.* (1987). Note los cambios composicionales entre la base (más cuarzosa) y el techo (más lítico). Las líneas punteadas en rojo y verde marcan las facies de reservorio y sello respectivamente.

De esta manera, a escala de reservorio, se podría sintetizar que la presencia de niveles permeables en las capas eólicas de la Formación Mulichinco respondería fundamentalmente a causas estratigráficas, en donde cada secuencia deposicional (S2 y S3) contendría a la vez el reservorio y el sello. La diferencia entre los estilos de deflación (seca y húmeda) registrados hacia la base de las secuencias 2 y 3 podría deberse a un aumento progresivo de la freática registrado a consecuencia del inicio de la tendencia transgresiva de los niveles superiores de la Formación Mulichinco.

Los principales factores que habrían contribuido a una buena calidad de reservorio y entrapamiento estratigráfico (para el caso de la secuencia **S2**) parecen ligados a **1**: La presencia de un relieve de deflación irregular, el cual permite compartimentalizar las facies areniscosas más gruesas y **2**: la acumulación temprana de volúmenes de areniscas gruesas cuarzo-feldespáticas, erosionadas por deflación desde áreas vecinas expuestas. Por otra parte, la efectividad del sello en los tramos superiores parece ligada a factores diagenéticos, principalmente al crecimiento de puentes de illita (Soave et al. 1987) obliterando principalmente la permeabilidad. Posiblemente la presencia de illita esté relacionada a una alteración de los materiales regionales (polvo volcánico – toba). El hecho de que el sello forme parte de la secuencia deposicional permite asimismo predecir un carácter regional para el mismo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis sedimentológico y estratigráfico de coronas asignadas a la sección inferior de la Formación Mulichinco de tres pozos pertenecientes al área Fortín de Piedra, complementado con análisis de perfiles eléctricos y sísmica 3D, ha permitido caracterizar las facies y evolución estratigráfica de los depósitos eólicos pertenecientes a dicha unidad. De este modo, se han identificado 5 facies sedimentarias, las cuales caracterizan a sistemas eólicos dominados por la migración de dunas de *grainfall*, con menores interdunas húmedas o secas asociadas. Asimismo, la organización interna de la sucesión ha permitido identificar tres secuencias deposicionales eólicas, limitadas por superficies de deflación regional o super-superficies. Estas secuencias muestran internamente un arreglo granodecreciente, y presentan hacia la base un enriquecimiento en componentes de tipo cuarzo-feldespático, mientras que hacia el techo tienden a predominar los materiales líticos. La presencia hacia la base de materiales cuarzo-feldespáticos es aquí interpretada como relacionada a una contaminación a partir de materiales deflacionados desde una fuente local expuesta (posiblemente areniscas de la subyacente Formación Quintuco). Los materiales líticos, de naturaleza más fina, responderían por otra parte a un aporte regional a subregional, con un abundante contenido de materiales volcánicos. Existe asimismo un importante control estratigráfico en la localización de los potenciales reservorios y sellos dentro de la sucesión, ya que los cuerpos arenosos con mejores propiedades petrofísicas corresponden a las areniscas basales con contaminación de materiales cuarzo-feldespáticos, en tanto que los materiales más finos de naturaleza lítica, localizados hacia la parte media-alta de las secuencias muestran una importante reducción en la permeabilidad, relacionada posiblemente al crecimiento de illita autigénica (Soave et al., 1987). De esta manera, las secuencias eólicas identificadas contendrían internamente el potencial reservorio y su sello correspondiente. Asimismo, dado que la base de la secuencia S2 es sumamente irregular a consecuencia de la deflación seca, los depósitos arenosos basales correspondientes a los potenciales reservorios tienen una distribución areal controlada por el relieve preexistente, configurando potenciales trampas estratigráficas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los directivos de Tecpetrol por la autorización para publicar parte de los resultados de este estudio. Mariano Dimeglio colaboró desinteresadamente en el estudio de las coronas. Jorge Alonso contribuyó con un detallado mapeo del subsuelo. Se agradece asimismo al Conicet (IADO) y al Departamento de Geología de la UNS por el apoyo brindado. Los comentarios y observaciones efectuadas por los revisores, Alberto Gutierrez Pleimling y Gustavo Peroni Contribuyeron a mejorar sustancialmente este manuscrito.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Fryberger, S.G., and C.J. Schenk, 1988.** Pin stripe lamination: a distinctive feature of modern and ancient eolian sediments. *Sedimentary Geology*, 55: 1-15.
- Glennie, K. W., 1970.** Desert Sedimentary Environments. *Developments in Sedimentology*, 14, pp. 222. Elsevier, New York, U.S.A.
- Gulisano, C.A., Gutierrez Pleimling, A.R. y Digregorio, R.E., 1984.** Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano-Valanginiano (formaciones Vaca Muerta, Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la Provincia del Neuquén. IX Congreso Geológico Argentino, Actas 1, 221-235.
- Gulisano, C. A. y Gutierrez Pleimling A. R., 1995.** The Jurassic of the Neuquén Basin. a) Neuquén Province. Secretaría de Minería de la Nación. Publicación N° 158. p. 1-111.
- Havholm K.G. and Kocurek G., 1994.** Factors controlling aeolian sequence stratigraphy : clues from super bounding surface features in the Middle Jurassic Page Sandstone. *Sedimentology*, 41, 913-934.
- Hunter, R.E., 1977.** Basic types of stratification in small eolian dunes. *Sedimentology*, 24: 361-387.
- Kocurek, G., Townsley, M., Yeh, E., Havholm, K. and Sweet, M. L., 1992.** Dune and Dune-Field Development on Padre Island, Texas, with Implications for Interdune Deposition and Water-Table-Controlled Accumulation. *Journal of Sedimentary Petrology*. 62: 622-635.
- Leanza, H.A., 1973.** Estudio sobre los cambios faciales de los estratos limítrofes Jurásico-Cretácicos entre Loncopué y Picún Leufú. Provincia del Neuquén. República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 28: 97-132.
- Legarreta, L. y Gulisano, C.A., 1989.** Análisis estratigráfico secuencial de la cuenca Neuquina (Triásico superior-Terciario Inferior). 10° Congreso Geológico Argentino, Univ. Nac. de Tucumán, Instituto Superior de Correlación Geológica, Serie Correlación Geológica N° 6, Cuencas Sedimentarias Argentinas. p. 221-243. Tucumán.
- Legarreta, L. y Uliana, M. A., 1999.** El Jurásico y Cretácico del la Cordillera Principal y la Cuenca Neuquina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. *Geología Argentina. Anales* 29 (16). p. 399-432. Buenos Aires.
- Mosquera, A. Frati, G., Alonso, J. y Rubino G., 2005.** Descubrimientos de hidrocarburos gaseosos en el miembro inferior de la Formación Mulichinco, a partir de modelado geológico y atributos de sísmica 3D, Area Fortín de Piedra, Cuenca Neuquina. Simposio de sísmica 3D. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos , Mar del Plata.
- Mpodozis, C. y Ramos, V., 1989.** The Andes of Chile and Argentina. Ericksen, G.E., Cañas Pinochet, M.T. & Reimund, J.A. eds. *Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources*. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Sciences series v.11, Houston, Texas, USA.
- Roll, A., 1939.** La cuenca de los Estratos con Dinosaurios al sur del Río Neuquén. Informe Inédito YPF.
- Soave, L., Hinterwimmer, G., Arregui, C., Clark P. y Bazán S., 1987.** Petrografía, porosidad y diagénesis de las sedimentitas de la Formación Mulichinco en el pozo YPF.Nq.AP.a-12 (Aguada Pichana). Provincia del Neuquén. Informe inédito YPF.
- Vottero, A.J., y González, J.M., 2002.** Los reservorios de la Formación Mulichinco. En: M. Schiuma, G. Hinterwimmer y G. Vergani, (Eds). *Rocas reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina*. Simposio del V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. pp. 383-400, Mar del Plata.
- Weaver, C.E., 1931.** Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. *Memoir University of Washington*, 1, Seattle.
- Zavala, C., 1999.** Análisis estratigráfico de la Formación Mulichinco (Valanginiano) en el centro-oeste de la Cuenca Neuquina, Provincia del Neuquén. XIV Congreso Geológico Argentino. Actas 1 : 77.
- Zavala C., 2000.** Nuevos avances en la sedimentología y estratigrafía secuencial de la Formación Mulichinco (Valanginiano) en la Cuenca Neuquina. *Boletín de Informaciones Petroleras*. Tercera Época, año XVII, N° 63 : 40-54.
- Zavala, C., and Freije, H., 2001.** On the understanding of aeolian sequence stratigraphy: an example from Miocene - Pliocene deposits in Patagonia, Argentina. *Rivista Italiana di Paleontología e Stratigrafia*. Vol 107 (2): 251-264.