

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

VARIABILIDAD PETROFÍSICA, GEOMECÁNICA Y GEOQUÍMICA DE DELTAS VOLCANICLÁSTICOS DE LA FORMACIÓN POZO D-129 EN LA SIERRA SILVA, CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE

José Oscar Allard¹, Nicolás Foix², Sebastián Bueti¹, Sabrina Ximena Olazábal¹

1: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, joseoallard@yahoo.com.ar,

buetisebastian@hotmail.com.ar, sabrina.olazabal@hotmail.com

2: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco - CONICET, nicofoix@hotmail.com

Palabras clave: deltas volcaniclásticos, análogo de afloramiento, permeamómetro de afloramiento, martillo de Schmidt, Fluorescencia de Rayos X portátil

ABSTRACT

Petrophysical, Geomechanical and Geochemical Variability of Volcaniclastic Delta Deposits from Pozo D-129 Formation at the Sierra Silva Outcrops, Golfo San Jorge Basin

The Pozo D-129 Formation is linked to the sedimentary filling of a big lake during the basal Chubut Group (Barremian?-Aptian) in the Golfo San Jorge Basin. This unit includes the main source rock of the basin as well as reservoirs rocks associated with litoral lobes (deltas) and deep lobes (deep fans). The outcrops of these units are few and restricted to the San Bernardo Fold Belt. New observations over the Cerro Kepi anticline expose deltaic front and channel/bar complex lithofacies associations. The stratigraphic study accomplished there include in situ air-permeability (Kair), Schmidt Hammer rebound index (R) and X Ray portable fluorescence measurements. Petrophysical and geomechanical parameters statistics are: I) Kair (n: 97), Mean: 24.9 mD (Std: 48.7), Q1: 3.4 mD, Q3: 26 mD, and II) R (n: 101), Mean: 47.4 (Std: 8.1), Q1: 43, Q3: 52. Vertical and lateral trends define an increase of hardness and a decrease of permeability when tuffaceous proportion increase. Geochemical results show that concentration of K is similar in tuffaceous sandstones and siltstones, while Fe has values in 75% interquartile bigger for sandstones. The Ca has an interquartile range bigger for sandstones than for tuffaceous siltstones. At the same time, the Q3 in Fe is higher in sandstones. The distribution of Fe and Ca is associated to alteration and cementation favored by coarse-granulometries permeabilities. The quantitative results shows the limited applicability of classic subsurface electrofacies models under volcaniclastic stressed paleoenvironments. Traditional surface sedimentary-logs combined with last-generation equipment allow the calibration and evaluation of an excellent outcrop analogue of deltaic reservoirs from the top of Pozo D-129 Formation

Revalidation of an extensional-thermal tectonostratigraphic context for the base of the Chubut Group is essential to define strategies for the production and exploration of nontraditional stratigraphic levels.

INTRODUCCIÓN

La caracterización geomecánica y petrofísica de unidades estratigráficas es una metodología fundamental para el análisis de cuencas sedimentarias productoras de hidrocarburos (Zoback 2010; Zeller

et al. 2015; Cannon 2016). En Argentina, la cuenca del Golfo San Jorge (Fig. 1.A,B) acumula más de 39300 pozos perforados desde 1907 y más de 13500 pozos productores activos (Hirschfeldt 2014); sin embargo los estudios geomecánicos de subsuelo publicados son escasos (ej. Saavedra y Bazán 2016) y los de afloramiento son inexistentes, mientras que las contribuciones petrofísicas solo están enfocados en datos de subsuelo (ej. Salomone *et al.* 2002; Breda 2003; Breda y Lucero 2005). Este déficit limita la calibración de modelos geológicos estáticos y dinámicos de subsuelo a partir de análogos de afloramiento.

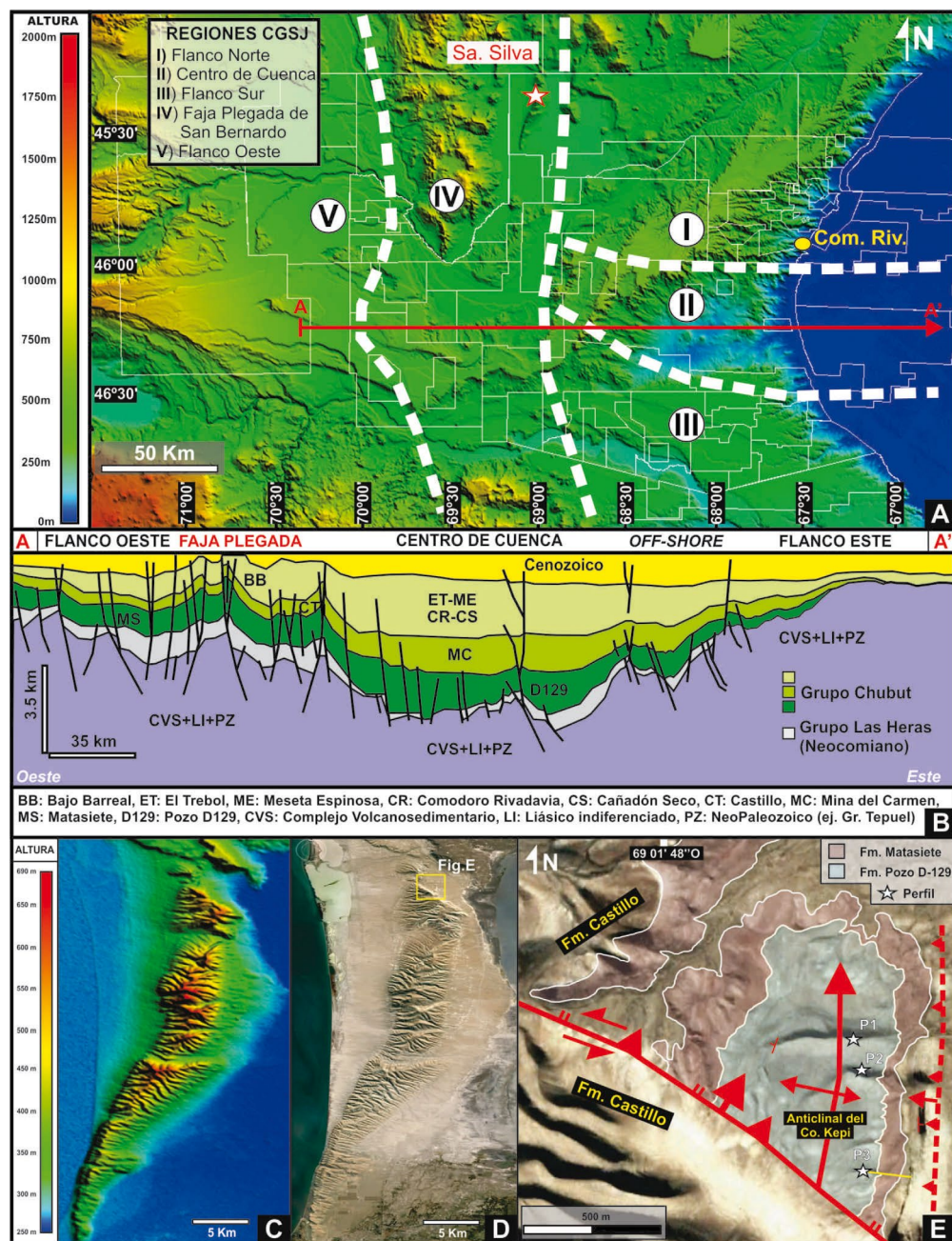


Figura 1. A) Modelo digital de elevación de la cuenca del Golfo San Jorge indicando sus regiones estructurales (tomado de Figari *et al.* 1999). B) Corte estructural E-O (tomado de Sylwan *et al.* 2011). C y D) Topografía e imagen satelital de la morfoestructura de Sierra Silva. E) Mapa estructural simplificado de la localidad de estudio con la posición de los perfiles estratigráficos realizados (P1, P2 y P3).

El principal sistema petrolero de la cuenca del Golfo San Jorge está definido por depósitos cretácicos de las formaciones Pozo D-129, Castillo y Bajo Barreal las cuales forman parte del Grupo Chubut (Lesta y Ferello 1972) (Fig. 2). La roca madre de este sistema está constituida por las sedimentitas lacustres de la Fm. Pozo D-129 (Figari *et al.* 1999; Sylwan *et al.* 2011). Esta formación no solo está conformada por pelitas negras con potencial oleogénico, sino que también incluye depósitos litorales arenosos que funcionan como roca reservorio (Basile *et al.* 2014; López Angriman *et al.* 2014). Su contenido tobáceo se vincula a depósitos deltaicos en afloramiento (Paredes *et al.* 2014; Allard *et al.* 2017) y a abanicos profundos en subsuelo (López Angriman *et al.* 2014). Recientemente, tareas de cartografía geológica de detalle en el anticlinal del cerro Kepi aportaron nuevas observaciones sobre afloramientos de la Fm. Pozo-D129 (Figs 1.C, D y E) (Allard *et al.* 2017). A pesar de la proximidad, la arquitectura estratigráfica de éstos difiere notablemente de la localidad tipo del cerro Chenques ya que expone cuerpos arenosos vinculados a posiciones proximales de deltas volcaniclásticos (Allard *et al.* 2017). La presente contribución reevalúa los depósitos del anticlinal del cerro Kepi y los caracteriza con parámetros petrofísicos, geomecánicos y geoquímicos. Los resultados exponen tendencias verticales y espaciales de permeabilidad al aire así como de mediciones indirectas de dureza, mientras que la geoquímica definida con Florescencia de Rayos X (FRx) muestra el contenido de elementos mayoritarios, minoritarios y traza de las areniscas tobáceas y limos tobáceos.

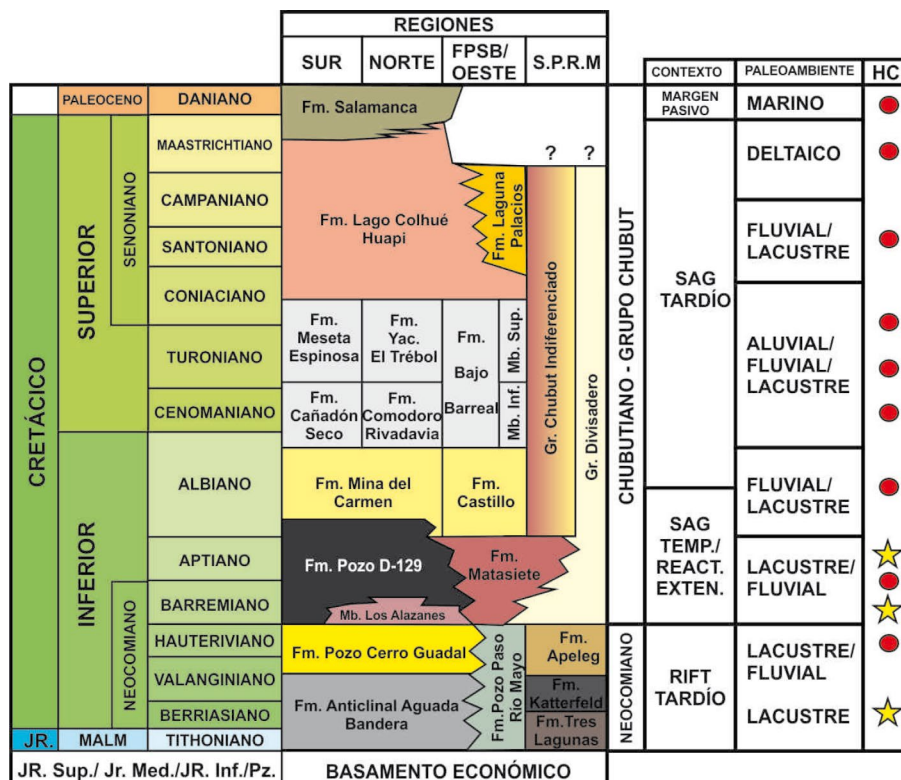


Figura 2. Cuadro cronoestratigráfico de la cuenca del Golfo San Jorge (modificado de Sylwan *et al.* 2011). Se indican contexto tectonoestratigráfico y paleoambiente dominante de cada formación. Notar que casi todas las unidades litoestratigráficas cretácicas aportan elementos del sistema petrolero como rocas reservorio (puntos rojos) o roca madre (estrellas amarillas).

METODOLOGÍAS

El estudio realizado combina metodologías estratigráficas clásicas con la medición de parámetros geomecánicos, petrofísicos y geoquímicos mediante instrumental portátil de última generación. Los datos de permeabilidad al aire (Kaire) se obtuvieron in situ con un permeamómetro digital, con el cual se recibe en tiempo real la curva de admisión y declinación de la presión de aire. El tiempo máximo utilizado para la declinación de la presión fue de 180 segundos, luego de los cuales se extrapola la tendencia para definir el valor de medición. Las medidas se realizaron sobre superficies frescas de la roca y se descartaron los valores donde el sello entre la roca y el instrumento generaban una tendencia anómala de presión. La medición de Kaire con este tipo de instrumental presenta excelente correlación con las mediciones realizadas con celda de Hassler (Filomena *et al.* 2014), sustentando muy buena precisión y exactitud de los valores obtenidos en afloramiento. Las mediciones geomecánicas surgen del valor de rebote (R) de un martillo de Schmidt digital Tipo N, el cual utiliza una energía de impacto de 2.207 Nm. Los valores promedio de cada estación de medición se obtuvieron bajo la normativa ASTM D 5873, donde se requieren 10 impactos, de los cuales aquellos que diverjan más de 7 unidades de la media calculada se descartan y se calcula una nueva media con los valores restantes (Proceq 2016). Todos los impactos para definir R se realizaron a una distancia mayor al diámetro del punzón del instrumento. Las mediciones se efectuaron perpendicularmente a superficies frescas de la roca, procurando que el impacto sea en dirección vertical para optimizar la energía del instrumento. Análisis de laboratorio demuestran una buena correlación entre el valor de R, el módulo de Young y la resistencia a la compresión uniaxial (Aydin y Basu 2005). Debe recordarse que el estado actual geomecánico de cualquier afloramiento es diferente al de las condiciones de subsuelo, por diversas razones como la descarga sedimentaria, la meteorización, el tipo de fluido, la contracción termal o la deshidratación, entre otros. Sin embargo, los valores precisos que otorga este instrumental son fundamentales para la caracterización de unidades geomecánicas y para el análisis de la estratigrafía mecánica (Ferrill *et al.* 2017). La composición geoquímica de distintos tipos litológicos se obtuvo a partir del pseudo-cutting obtenido del muestreo en campo y la posterior molienda en gabinete. El equipo de FRx se utilizó en la función Mining que permite definir la concentración de 33 elementos: K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Y, Ba, Ta, W, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, U. Entre estos se encuentran elementos mayoritarios ($>1\%$), minoritarios ($1\%-0.1\%$) y traza ($<0.1\%$). El tiempo de exposición de cada medición fue de 90 segundos, ya que luego de este período solo se modifica el cuarto decimal, por lo cual se consideró aceptable ese tiempo como umbral de estabilización. La calibración del instrumento se evaluó sistemáticamente con un blanco suministrado por el fabricante. La precisión y exactitud de los resultados obtenidos no fue evaluada analíticamente ya que no se dispone de valores de referencia de las litologías involucradas. Razón por la cual no se pudo seguir un procedimiento como el utilizado por Rowe *et al.* (2012).

LITOFACIES (FM. POZO D-129)	INTERPRETACIÓN
Lf.1. Caliza oolítica, en estratos de 0.1-0.3 m de potencia. Fábrica clastosoportada, con tendencia vertical granocreciente o granodecreciente (Fig 3.A).	Precipitación de agregados carbonáticos a partir de núcleos (ooides) en aguas someras de alta energía. Flujo acuoso diluido, de tipo oscilatorio.
Lf.2. Conglomerados tobáceos matriz a clasto soportados, con clastos de hasta 5 cm de diámetro, base erosiva, tendencia granodecreciente o sin tendencia. Potencia: 20-60 cm. (Fig 3.B).	Depósitos generados por flujos acuosos de alta densidad canalizados que redistribuyen clastos tobáceos intraformacionales.
Lf.3. Areniscas medianas a gruesas macizas, geometría tabular a irregular. Contenido variable de matriz tobácea. Puede contener clastos tobáceos de hasta 3 cm de diámetro. Potencia: 10-30 cm. (Fig 3.C).	Depósitos generados por flujos acuosos hiperconcentrados con contenido variable de material epiclástico y de matriz volcanoclástica. La geometría externa define si el flujo se dio en condiciones confinadas o desconfinadas.
Lf.4. Areniscas finas a medianas macizas o con laminación de bajo ángulo difusa, abundante matriz tobácea. Potencia: 15- 50 cm. (Fig 3.D).	Depósitos generados por flujos acuosos hiperconcentrados. La alta densidad se vincula a la resedimentación de ceniza volcánica.
Lf.5. Areniscas finas a gruesas con estratificación entrecruzada tangencial bien desarrollada o difusa. Contenido variable de matriz tobácea. Potencia: 10-40 cm. (Fig 3.E).	Depósitos generados en flujos acuosos por la migración de una forma de lecho tridimensional (duna 3D) en condiciones de bajo régimen de flujo.
Lf.6.a. Areniscas finas a gruesas con estratificación de bajo ángulo a paralela. Geometrías irregulares contenidas dentro de cuerpos canalizados. Potencia: 15- 50 cm. (Fig 3.D).	Depósitos generados por flujos diluidos canalizados bajo condiciones de alto régimen de flujo, por migración de formas de lecho de escasa amplitud y gran longitud de onda.
Lf.6.b. Areniscas finas a gruesas con estratificación de bajo ángulo. Puede pasar en transición a LF.7. Hacia el tope pueden presentar ooides. Geometrías tabulares de 5 a 40 cm de potencia y varias decenas de metros de continuidad lateral.	Depósitos generados por flujos diluidos no canalizados bajo condiciones de alta energía, por migración de formas de lecho de escasa amplitud y gran longitud de onda.
Lf.6.c. Areniscas finas a gruesas, macizas o con estratificación de bajo ángulo difusa. Cuerpos plano-convexos con alturas máximas menores a 80 cm y continuidad lateral inferior a 5 m (Fig 3.F).	Depósitos generados por la desaceleración de flujos diluidos o hiperconcentrados no confinados.
Lf.7. Areniscas tobáceas finas a gruesas con ondulitas simétricas a óndulas de decenas de cm de longitud de onda y centímetros de amplitud. Potencia: 5 a 20 cm. (Fig 3.G).	Depósitos generados por flujos oscilatorios en condiciones de bajo régimen. La amplitud y longitud de onda son directamente proporcionales a la batimetría del cuerpo de agua.
Lf.8. Areniscas tobáceas finas microentrecruzadas, en niveles de 4-8 cm de potencia. Puede presentarse intercalados con la Lf.9 (Fig 3.H).	Depósitos generados por la migración de formas de lecho tridimensionales de pequeña escala (ondulitas), en condiciones de bajo régimen de flujo.
Lf.9. Limolitas tobáceas y tobas limosas laminadas o macizas. En ocasiones desarrollan deformación sinsedimentaria. Potencia: 3-50 cm. (Fig 3.I).	Depósitos subácueos generados por decantación de material en suspensión. Deformación penecontemporánea generada por inestabilidad del sustrato.

Tabla 1. Litofacies de la Fm. Pozo D-129 en el anticlinal del cerro Kepi. Los procesos se interpretaron en base a Reineck y Singh (1980) y Smith y Lowe (1991).

RESULTADOS

Análisis Paleoambiental

El estudio realizado siguió la metodología tradicional basada en la descripción sedimentológica de campo, a partir de la cual se definieron nueve litofacies. La tabla 1 resume las características de las mismas y su interpretación. Los depósitos analizados se vincularon principalmente a flujos acuosos turbulentos unidireccionales diluidos a hiperconcentrados, a decantación y en menor proporción a procesos oscilatorios (tabla 1).

Los afloramientos estudiados se restringen a cuatro cañadones modernos de orientación E-O y algunas decenas de metros de profundidad. A pesar de lo modesto de estas exposiciones, cada cañadón aporta algún elemento que permite una reconstrucción paleoambiental integrada. Las litofacies se agruparon en cinco asociaciones vinculadas a subambientes lacustres litorales a sublitorales: 1) shoreface carbonático, 2) complejo canal-barra, 3) planicie interdistributaria, 4) frente deltaico retrabajado por olas y 5) frente deltaico distal.

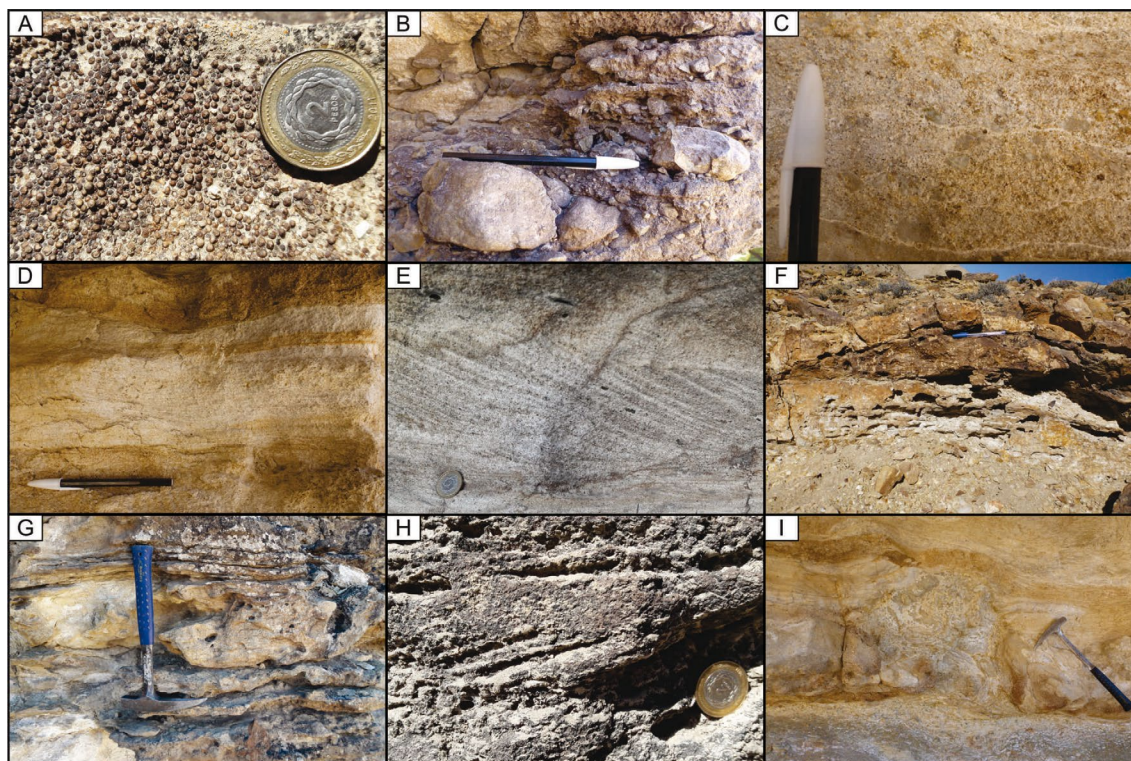


Figura 3. Litofacies de la Fm. Pozo D-129 en el anticlinal del cerro Kepi. A) Caliza oolítica. B) Conglomerado intraformacional tobáceo con fábrica clasto a matriz-soportada. C) Arenisca tobácea maciza con intraclastos flotantes. D) Arenisca con estratificación entrecruzada de bajo ángulo. E) Arenisca tobácea con estratificación entrecruzada tangencial. F) Arenisca tobácea con geometría plano-convexa. G) Arenisca con ondulaciones simétricas. H) Arenisca microentrecruzada. I) Limos tobáceos laminados con deformación sinsedimentaria.

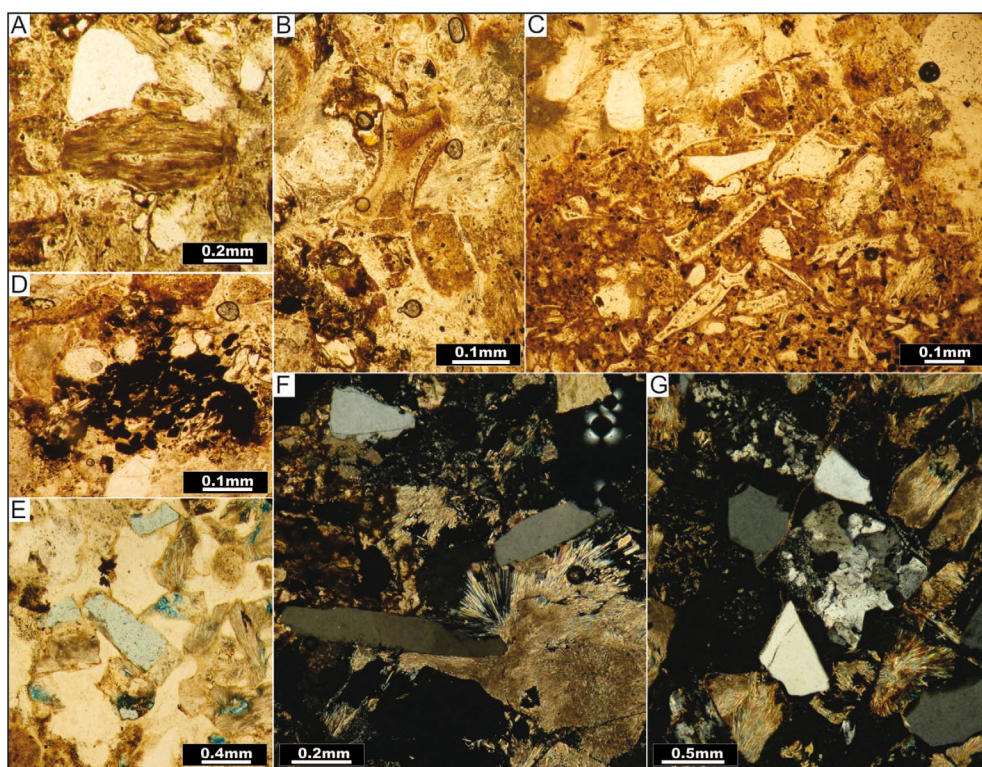


Figura 4. Microfotografías de arenitas del complejo canal-barra. Componentes neovolcánicos: A) fragmento pumíceo, B) triza cuspada, C) agregado de ceniza. D) Enjambre de minerales opacos. E) Porosidad primaria intercrystalina y secundaria por disolución de cristales. F) Cemento carbonático de calcita y dawsonita. G) Cuarzo con crecimiento secundario y cuarzo policristalino de origen metamórfico.

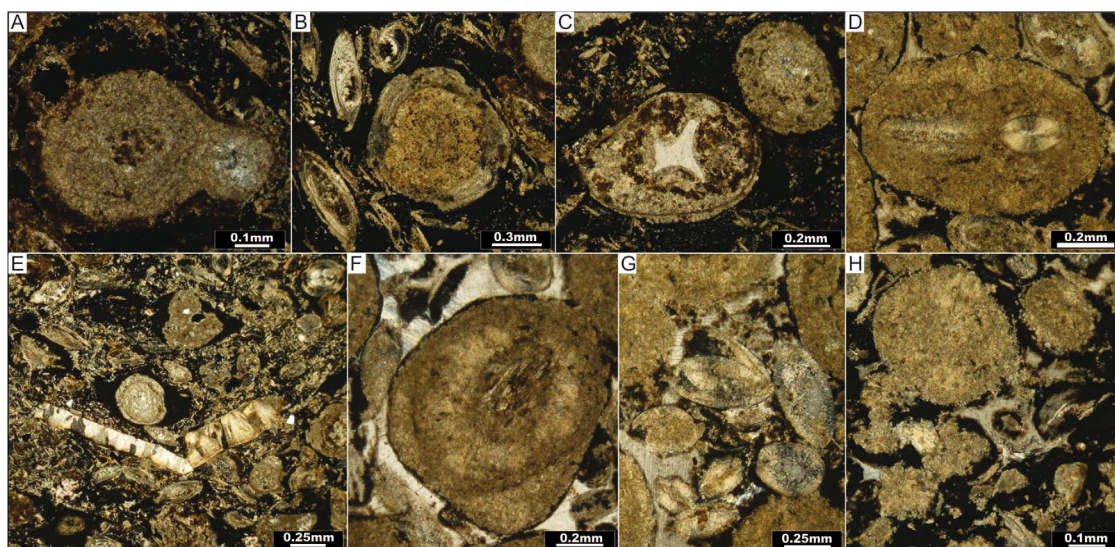


Figura 5. Microfotografías de calizas oolíticas. A) Ooide compuesto. B) Ooide cerebroide y ostrácodos. C) Ooide con triza cuspada en el núcleo. D) Ooide con dos núcleos de bioclastos. E) Ooides y bioclastos (ostrácodos y bivalvos). F) Ooide con espina y núcleo de fragmento pumíceo. G) Ostrácodos articulados. H) Ooides simples y triza volcánica con preservación de burbuja.

Shorface carbonático: asociación definida en la base del perfil 2 a partir de un estrato tabular de 30 cm de potencia conformado por un grainstone oolítico (Lf.1) (Fig. 5). Este nivel presenta gradación normal o inversa, fábrica clasto soportada y laminación entrecruzada de bajo ángulo muy difusa. En secciones delgadas se identifican distintas morfologías de ooides como ser compuestos (Fig. 5.A), cerebroides (Fig. 5.B), con espina (Fig. 5.F) y simples (Fig. 5.H) (Adams y MacKenzie 2001). Esta situación sugiere una mezcla de ooides generados in situ con retransportados desde posiciones vadosas. La microfábrica de este nivel también expone bioclastos de ostrácodos y bivalvos muy fragmentados y desarticulados (Fig. 5.E), o en ocasiones articulados (Figs 5.B y G) evidenciando elevadas y fluctuantes condiciones energéticas del medio acuoso. La diferencia de tamaños entre bioclastos y oolitas (Figs 5.B, E y G) se vinculó al radio hidráulico de cada componente y la eficiencia para la flotabilidad. Un rasgo micromorfológico muy interesante surge de los núcleos de precipitación de los ooides, los cuales abarcan desde bioclastos (Fig. 5.D) hasta componentes neovolcánicos como pómez y trizas (Fig. 5.C y F). Simone (1980) propone una batimetría máxima de 5 m para formación de los ooides depositados in situ, mientras que los vinculados a zonas vadosas implicarían una posición litoral donde se interactúe con el nivel freático. Esta asociación se interpreta como un subambiente lacustre litoral somero, de alta energía, con hidroquímica alcalina y parcialmente estresado por la llegada o removilización de material volcánico-clástico.

Complejo canal-barra: asociación dominada por litofacies arenosas con o sin estructuras internas (Lf.3, Lf.4, Lf.5), con base neta erosiva y clastos conglomerádicos (Lf.2) (Fig. 7.A). Su geometría es compleja ya que surge del amalgamamiento lateral de elementos canalizados de base neta erosiva con lóbulos de poca amplitud. Estos depósitos presentan continuidad lateral restringida de algunas decenas de metros y tendencia general granodecreciente. Las arenitas presentan componentes neovolcánicos como pómez, trizas y cristaloclastos inalterados (Fig. 4). Esta asociación surge de la pérdida de velocidad de flujos acuosos con alta carga sedimentaria volcánico-clástica al interactuar con un cuerpo lacustre. Esta característica sugiere la generación de flujos hiperpícnicos que al desacelerarse rápidamente habrían favorecido el desarrollo de cuerpos lobulados no canalizados (Cao *et al.* 2018). Los depósitos tractivos responden a condiciones hidrodinámicas de menor carga sedimentaria.

Planicie interdistributaria: asociación definida por la alternancia de limos tobáceos (Lf.9) y areniscas tobáceas macizas (Lf.3), con ondulitas simétricas (Lf.7) o microentrecruzadas (Lf.8) (Fig. 7.B). Esta asociación presenta hasta 11 m de potencia e infrayace canales del complejo canal-barra.

Frente deltaico retrabajado por olas: secuencia de estratos tabulares de areniscas macizas (Lf.3) o con estratificación de bajo ángulo (Lf.6b) (Fig. 7.C). Puede desarrollar tendencia estratocreciente en paquetes de 1-1.5 m. Los techos de algunos niveles presentan superficies ondulosas u ooides. La continuidad lateral de estos depósitos supera ampliamente la de otras asociaciones de litofacies y es común que exceda el ancho actualmente aflorado. Esta característica geométrica define la asociación. La granulometría y arquitectura de esta sucesión sustenta depósitos vinculados a líneas de paleocosta subácua con retrabajo del oleaje (Bhattacharya 2006).

Frente deltaico distal: secuencias dominadas por limos tobáceos laminados a macizos (Lf.9) con intercalaciones de areniscas medianas a finas macizas (Lf.3) (Fig. 7.D). La deformación sinsedimentaria puede ser importante, plegando e inyectando los niveles arenosos en estratos suprayacentes. El dominio de procesos de decantación se vincularía a la rápida desaceleración de splays frontales (Bhattacharya 2006).

La presencia de oolitas en distintas asociaciones de litofacies dominadas por areniscas plantea un origen mixto del sedimento con componentes silicoclásticas, carbonáticas y piroclásticas. Esta característica define rocas mixtas con una componente no contemplada en la propuesta de clasificación descriptiva de primer orden de Mount (1985). Al margen de la terminología específica que describa esas areniscas/arenitas, este rasgo se considera fundamental para las interpretaciones sedimentológicas y paleoambientales.

Las secuencias sedimentarias de la Fm. Pozo D-129 en el anticlinal del cerro Kepi se diferencian del clásico perfil del cerro Chenques desde varios puntos de vista. La característica más evidente es que presentan mayor abundancia de depósitos arenosos, lo cual responde al desarrollo de elementos arquitecturales proximales del sistema deltaico como el complejo canal-barra (Figs. 6 y 7.A). Por otro lado, los ooides son componentes principales del grainstone oolítico y componentes subordinados de areniscas tobáceas, sustentando depósitos vinculados a un sistema lacustre en distintas posiciones paleogeomorfológicas. Desde la caracterización litológica, las arenitas de distintas asociaciones presentan componentes neovolcánicos como pómez y trizas (Figs 4.A, B y C), evidenciando importante participación piroclástica/ volcaniclástica durante toda la construcción de los depósitos. Esta última característica junto con la abundancia de depósitos macizos sugieren paleodescargas fluviales con alta densidad como responsables de la construcción de los depósitos deltaicos. Estas se habrían caracterizado por tener una densidad que excede la del cuerpo de agua estable (paleolago), situación que implicaría necesariamente el desarrollo de flujos hiperpícnicos en la desembocadura del canal fluvial alimentador (Cao *et al.* 2018). A nivel de cuerpos individuales, la superposición transicional de depósitos generados por condiciones diluidas e hiperconcentradas se interpreta como la transformación lateral de los flujos debido a la pérdida o incremento de carga (Smith y Lowe 1991). Variaciones verticales del contenido de matriz entre cuerpos principales, así como en la proporción de depósitos tractivos respecto a hiperconcentrados, se vincula a fluctuaciones en las paleodescargas que controlen la eficiencia del canal fluvial alimentador y en consecuencia la carga sedimentaria que recibe el sistema lacustre (Cao *et al.* 2018). Integrando toda la información mencionada se reconstruye un sistema deltaico volcaniclástico, construido por sistemas fluviales con descarga estacional. Estos deltas se desarrollaron en una línea de paleocosta de poca profundidad y alta energía de un sistema lacustre alcalino. La asociación de frente deltaico retrabajado por oleaje propone un subambiente transicional entre una línea de costa carbonática con precipitación de ooides y una línea de costa constructiva vinculada a la progradación de los deltas volcaniclásticos.

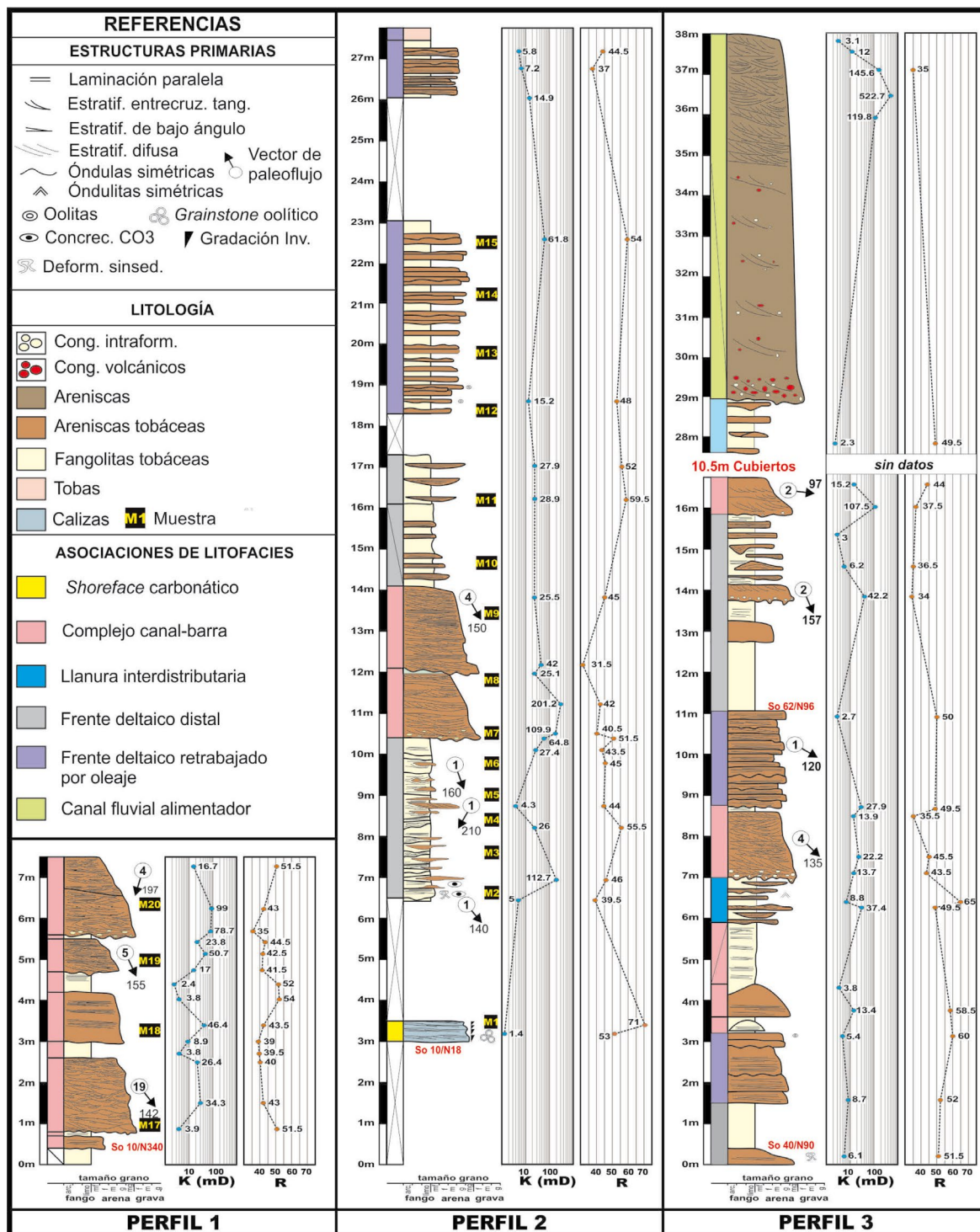


Figura 6. Perfiles estratigráficos de detalle indicando los valores de permeabilidad al aire (Kaire), de índice R (dureza) y la posición de muestras usadas para geoquímica. Se indican las asociaciones de litofacies de los depósitos deltaicos de la Fm. Pozo D-129. El canal alimentador del sistema corresponde a la base de la Fm. Matasiete. El grado de cementación y el contenido de matriz tobácea en los depósitos arenosos son directamente proporcionales al valor de R e inversamente proporcionales a Kaire. Notar los elevados valores de permeabilidad en el canal fluvial alimentador.

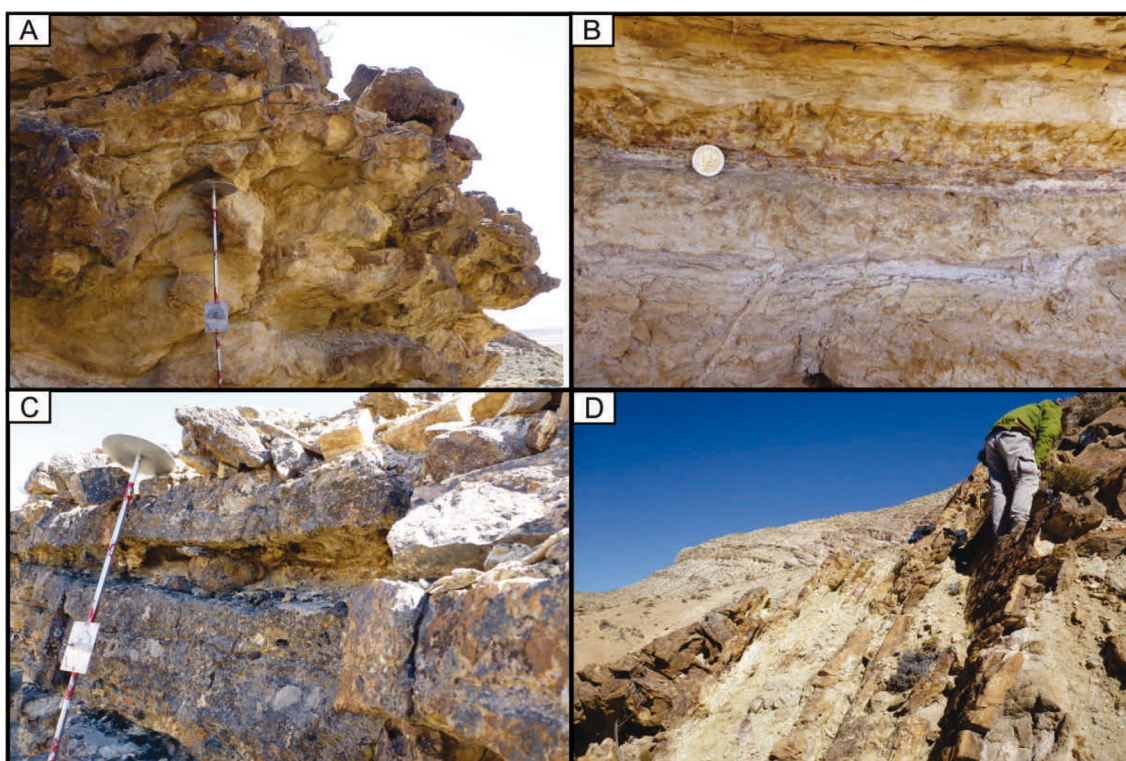


Figura 7. Asociaciones de litofacies vinculadas a deltas volcanoclásticos de la Fm. Pozo D-129 en el anticlinal del cerro Kepi. A) Complejo canal barra. B) Planicie interdistributaria. C) Frente deltaico reabajado por oleaje. D) En la base de las secuencia frente deltaico distal y hacia el tope complejo canal-barra. La persona se encuentra midiendo in situ Kaire.

Caracterización Petrofísica y Geomecánica

Los depósitos deltaicos de la Fm. Pozo D-129 se caracterizan por un contenido variable de ceniza volcánica, reconocida en afloramiento y confirmada en laminas delgadas (Fig. 4). Bajo este escenario se trabajó con el objetivo de evaluar la influencia del contenido tobáceo en las características petrofísicas y geomecánicas de afloramiento. Las tareas de campo incluyeron la medición de 97 valores de Kaire y 101 valores promedio de R. Estos parámetros se complementaron con mediciones en distintos tipos litológicos de las unidades litoestratigráficas suprayacentes. En la Fm. Matasiete se obtuvieron 25 datos Kaire y 5 de R en areniscas medianas a gruesas vinculadas a canales fluviales principales. En la Fm. Castillo se midieron los parámetros en las cornisas tobáceas con elevada resistencia a la meteorización, donde se obtuvieron 2 valores de Kaire y 2 de R.

El análisis de tendencias y patrones se realizó combinando de forma cualitativa los valores de las mediciones de Kaire y R con la granulometría, el contenido tobáceo y el grado de cementación. El mayor valor de R (71) en la Fm. Pozo D-129 se obtuvo del grainstone oolítico (Lf.1) del Perfil 2, donde también se midió uno de los valores más bajos de Kaire (1.4 mD) (Fig. 6). Este nivel no presenta contenido tobáceo en afloramiento y en corte delgado su proporción es baja, por lo cual se interpreta que ambos parámetros están controlados por la cementación carbonática. Un valor de R análogo surge de las mediciones en las cornisas (estratos resistentes) de la Fm. Castillo (Fig.

8) donde se obtuvo R: 69, en esta situación el nivel es una toba maciza con cementación silíceá.

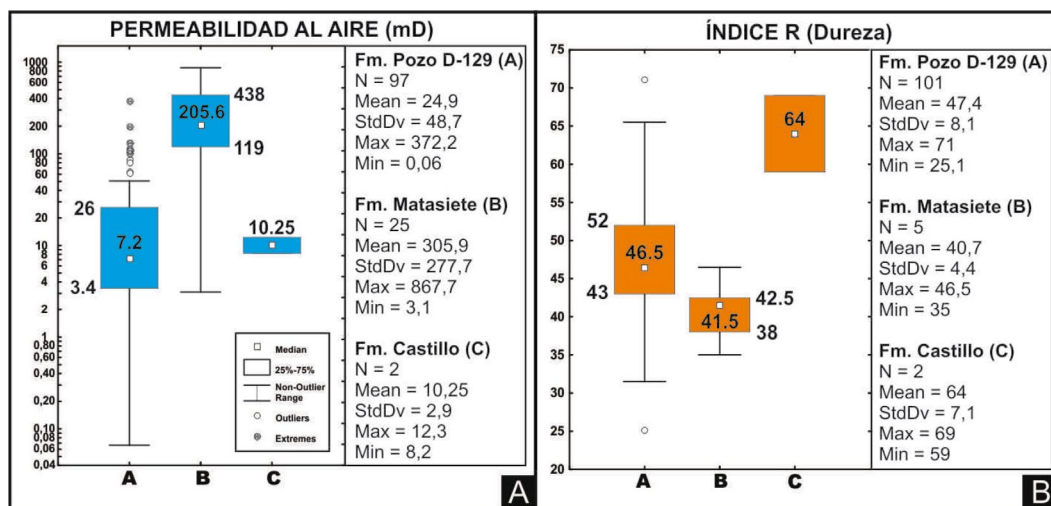


Figura 8. Diagramas de cajas y parámetros estadísticos de la permeabilidad al aire (mD) e índice R. Este último parámetro es directamente proporcional a la dureza litológica. Las mediciones sistemáticas se realizaron en la Fm. Pozo D-129, en la Fm. Matasiete se midieron depósitos de canal principal y en la Fm. Castillo tobas macizas y bioturbadas. Notar la diferencia en las distribuciones intercuartiles entre la Fm. Pozo D-129 y Matasiete, la similitud entre Kaire entre las Fms. Pozo D-129 y Castillo, y la mayor dureza de la Fm. Castillo. El comportamiento general de las unidades sugiere que el contenido tobáceo es directamente proporcional a los valores de R e inversamente proporcional a la permeabilidad.

Fuera de estos casos particulares, la distribución vertical de los parámetros se analizó por litofacies teniendo en cuenta la asociación de litofacies en la cual se incluía. De esta forma se reconocieron algunos patrones sistemáticos en los distintos tipos litológicos. Los canales principales del complejo canal-barra pueden presentar areniscas gruesas de la Lf.5 con elevado contenido tobáceo, las cuales tienen bajos valores de Kaire y alto R, mientras que con menor contenido tobáceo y mejor desarrollo de estructuras tractivas tienen alto Kaire y bajo R (Fig. 6). Las areniscas ubicadas en posiciones medias de los cuerpos canalizados principales (Lf.5 y Lf.6.a) presentan elevados valores de Kaire y mediciones intermedias de R, en general estos depósitos presentan bajo contenido de matriz tobácea. En un mismo cuerpo principal, el desarrollo de niveles de areniscas con abundante matriz (Lf.3 y Lf.4) disminuye los valores de Kaire y aumenta R. Cuando estos niveles tobáceos y finos se dan hacia el techo de los cuerpos, la tendencia vertical de Kaire es decreciente y se combina con valores crecientes de R, generando un patrón espejado (Perfil 1, Fig. 6). Los niveles de areniscas vinculados a la planicie interdistributaria y al frente deltaico distal no desarrollan ningún patrón vertical, estos pueden variar de 112,7 mD (Lf.5) a 5 mD (Lf.4) en menos de un metro de separación vertical (Perfil 2, Fig. 6). Niveles de Lf.5 en la planicie interdistributaria presentan bajo Kaire (8,8 mD) y muy alto R (65) (Perfil 3, Fig. 6). Esta situación se correlaciona en afloramiento con elevada cementación y elevado contenido de matriz. Los lóbulos de areniscas (Lf.6.c) presentan mayor Kaire en los niveles con desarrollo de estructuras tractivas (Perfil 3, Fig. 7). Los depósitos arenosos de la Lf.6.b vinculados al frente deltaico re trabajado por oleaje tienen un comportamiento variable con valores

dentro del rango intercuartil, sin embargo cuando presentan abundantes ooides pueden incrementar notablemente su dureza alcanzando valores de R: 60 (Perfil 3, Fig. 6). Otro tipo litológico está constituido por los depósitos de fangolitas tobáceas (Lf.9) vinculados a la decantación de material pelítico en suspensión. En estos, el perfil de erosión actual se correlaciona de forma directa con el valor de R, mientras que los valores de Kaire siempre son bajos (<4 mD). Debe resaltarse que estos valores de Kaire son similares a los obtenidos en areniscas de la Lf.4 desarrolladas hacia el tope de los canales principales, en los niveles de planicie interdistributaria o en el frente deltaico distal (Fig. 6).

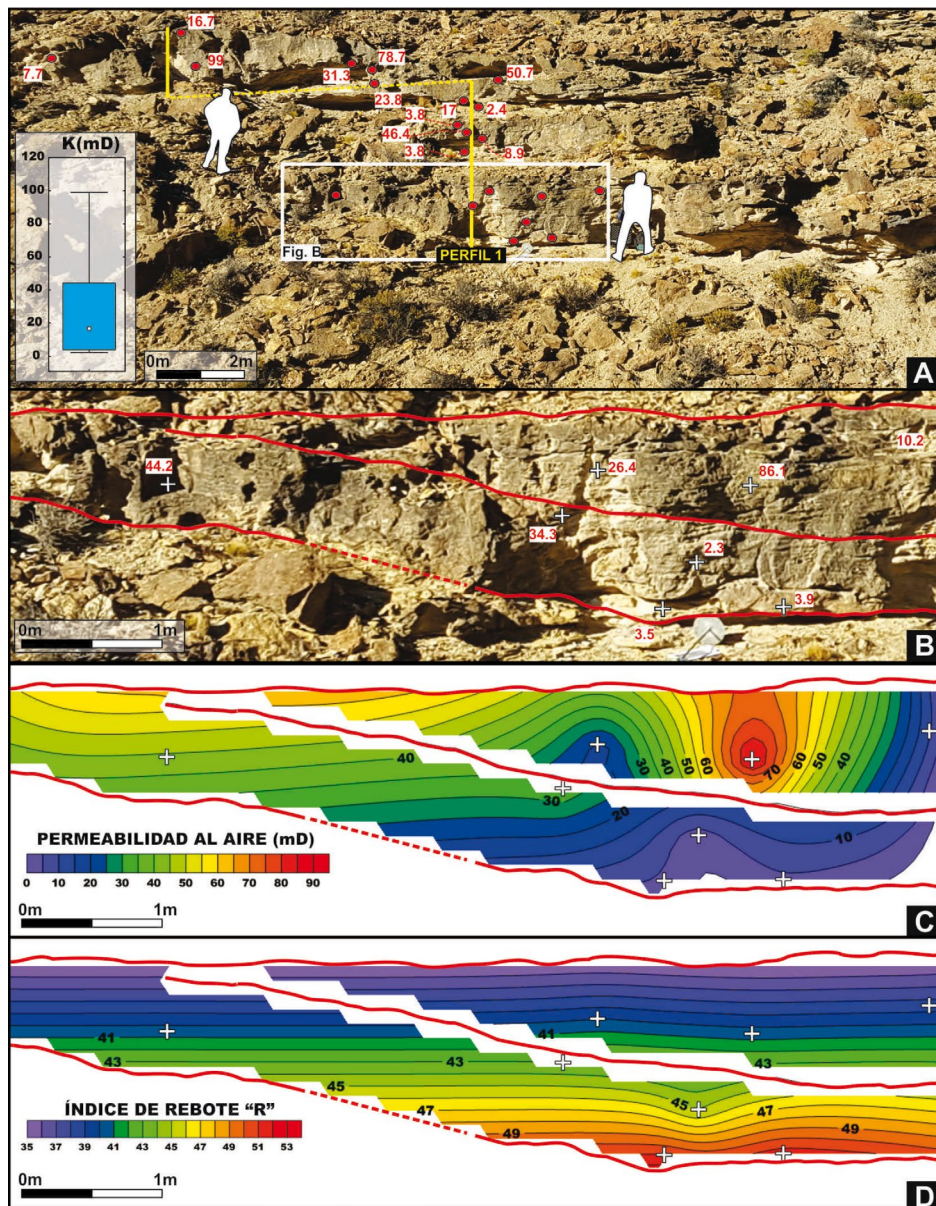


Figura 9. A) Panel de afloramiento del complejo canal-lóbulo indicando los puntos de medición de parámetros petrofísicos en afloramiento. Se incluye un diagrama de cajas de Kaire, notar que la distribución intercuartil está entre 5 y 45 mD. B) Detalle de cuerpo canalizado indicando los valores de permeabilidad al aire. Los mapas de isovalores muestran la variabilidad lateral y vertical submétrica de Kaire (C) y del Índice R (resistencia mecánica) (D). El grillado se definió con el límite externo del cuerpo canalizado y la superficie que separa las historias de relleno se consideró un límite de interpolación.

El comportamiento lateral de los parámetros Kaire y R en depósitos de areniscas se evaluó a partir de mapas de isovalores. El análisis se realizó en un canal multiepisódico, donde se utilizó la superficie que limita los eventos de relleno principales como límite para el grillado de la superficie. El mapa de Kaire muestra una tendencia a disminuir los valores hacia la base del primer episodio, mientras que la unidad que suprayace no presenta tendencia horizontal. Estos patrones se correlacionan con una base del canal más gruesa pero con elevado contenido tobáceo y con el desarrollo de una barra de arenisca gruesa en la posición del mayor valor de Kaire (86.1 mD). La dureza del cuerpo expone un tren de isovalores de R más uniforme que Kaire, donde la base es más competente que el techo, sin importar el límite de los eventos de construcción del cuerpo sedimentario. Este contexto se correlaciona con una tendencia vertical general granodecreciente y el decrecimiento general del contenido de matriz tobácea.

Con el objetivo de evaluar la petrofísica de geocuerpos vinculados a otro ambiente sedimentario del sistema depositacional, se realizaron mediciones en areniscas fluviales de la Fm. Matasiete. También se realizó un mapa de isovalores de Kaire en un cuerpo canalizado principal ubicado a 91 m del tope de la Fm. Pozo D-129 y a 16 m de la base de la Fm. Castillo. Este canal se caracteriza por el buen desarrollo de estructuras tractivas, tendencia vertical granodecreciente desde conglomerados finos a areniscas medianas y el desarrollo de abundantes superficies de reactivación. La distribución intercuartil de todas las mediciones (Fig. 8.A) y del panel de

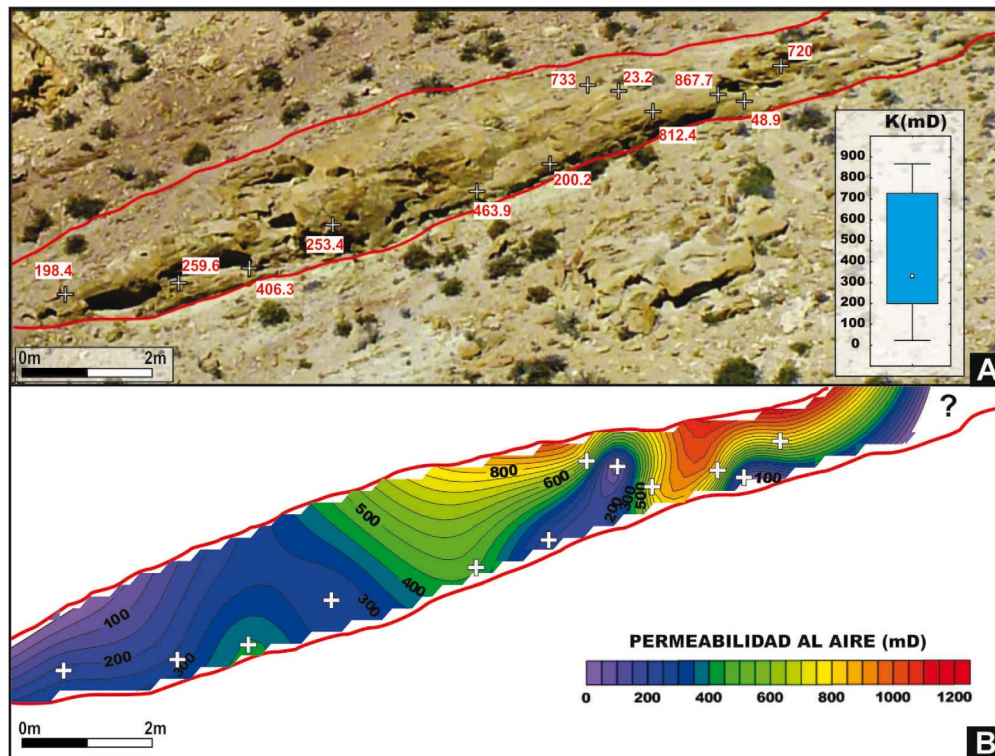


Figura 10. A) Panel de afloramiento de un canal principal de la Fm. Matasiete indicando los puntos de medición de permeabilidad al aire. Se incluye un diagrama de cajas de los datos, notar que la distribución intercuartil está entre 200 y 500 mD. B) Mapa de isovalores de permeabilidad al aire. Las areniscas presentan muy escasa matriz y excelente desarrollo de estructuras tractivas. La variabilidad lateral de las mediciones se vincula al tamaño de grano y/o al grado de cementación.

afloramiento (Fig. 10.A), son un orden de magnitud mayor que las obtenidas en los cuerpos de areniscas de los deltas volcanoclásticos de la Fm. Pozo D-129 (Figs 8.A y 9.A). El mapa de Kaire muestra una variabilidad lateral que responde a los cambios granulométricos vinculados al desarrollo de barras centrales-alternas, donde los depósitos más gruesos son más permeables. En todas estas mediciones se destaca la escasa a nula presencia de matriz tobácea en afloramiento.

Caracterización Geoquímica

La concentración de los elementos químicos en rocas sedimentarias surge de una compleja interacción entre procesos físicos y químicos vinculados a la meteorización, el transporte y la diagénesis. A estos procesos generales se suma una situación particular en el caso de estudio, donde el aporte de material volcanoclástico contribuye con material juvenil a los sistemas sedimentarios (Smith 1991). La caracterización geoquímica realizada evalúa de forma simplificada la concentración de algunos elementos químicos del sistema deltaico volcanoclástico.

Las mediciones geoquímicas definen la concentración de elementos mayoritarios, minoritarios y trazas en 33 muestras, de las cuales 21 son areniscas tobáceas y 12 están dominadas por limos tobáceos (Fig. 11). Los resultados exponen un rango intercuartil de K similar en ambas granulometrías, mientras que el Fe presenta valores de Q1 similares y un mayor valor para Q3 en las areniscas. El Ca se caracteriza por la mayor diferencia en la distribución de valores, con un valor de Q1 en areniscas igual al Q3 en los limos. El Ti presenta rangos intercuartiles similares para ambas litologías, con valores de Q3 menores a 0.2%. El Zr presenta un solape parcial entre los rangos intercuartiles, con un valor de Q1 en limos similar al Q2 en areniscas, lo cual expone los mayores valores de Zr en los limos.

Los resultados obtenidos permiten realizar algunas inferencias respecto a los controles geoquímicos para la distribución de elementos mayoritarios, minoritarios y traza. En este sentido, el mayor contenido relativo de Fe y Ca en las areniscas se interpretó a partir del análisis cualitativo de arenitas. En estas se reconocen características que favorecen la presencia de dichos elementos: minerales accesorios opacos (Fig. 4.D), cementación ferruginosa (Fig. 4), alteración total o parcial de líticos paleovolcánicos a óxidos de hierro (Fig. 4.E), y abundante cementación carbonática (calcita y dawsonita) (Figs 4.F y G). La permeabilidad mayor de la fracción clástica arenosa respecto de los niveles limosos habría sido fundamental para la circulación de fluidos que favorezcan los eventos de cementación y alteración, permitiendo un mayor valor de Q3 en Fe y Ca para las areniscas. El K presenta un comportamiento distinto ya que este no responde a la granulometría. Considerando que las arenitas presentan escasos cristales de feldespatos alcalinos, el contenido de K se asoció a la matriz tobácea. Esta composición también está presente en los limos, por lo cual la componente volcanoclástica del material parental controlaría la concentración de K de forma independiente del tamaño de grano. El contenido de K obtenido es inferior al registrado en las pelitas negras de la Fm. Pozo D-129 en pozos profundos como YPF.SC.AAB.x-1 y YPF.SC.CGu.es-1 (Allard *et al.*

2018). Esta diferencia se vincula principalmente a las diferentes litologías generadas en distintas posiciones del sistema lacustre (litoral vs. off-shore), donde los depósitos más arcillosos presentan mayores valores de K. En esta hipótesis no se descartan improntas diagenéticas distintas para las secuencias de subsuelo respecto de las de afloramiento. Futuros estudios sistemáticos de DRx deben evaluar las asociaciones de arcillas, en especial el contenido de esmectita, y la presencia de ceolitas para definir su influencia en la concentración de K (Do Campo *et al.* 2010). Elementos de menor concentración como Ti y Zr pueden vincularse a minerales accesorios como illmenita y zircones aportados a partir del material volcániclastico y/o de las rocas de basamento expuestas up-stream del sistema sedimentario (Allard *et al.* 2018). Una opción alternativa o complementaria es la presencia de Ti y Zr en el vidrio volcánico, donde estos elementos estarían vinculados a una fase menos estable que se altera fácilmente y de esta forma incrementaría la movilidad de los mismos (McHenry 2009). En este escenario las aguas alcalinas del sistema lacustre podrían haber favorecido la movilidad de estos elementos tradicionalmente considerados inmóviles (McHenry 2009). Corroborar el origen de cada uno de los elementos que definen quimiosecuencias excede el objetivo de esta contribución y requiere análisis mineralógicos y geoquímicos que no se disponen. Futuros estudios geoquímicos deberán evaluar los minerales autígenicos y detríticos de cada secuencia estratigráfica, así como sus historias diagenéticas específicas.

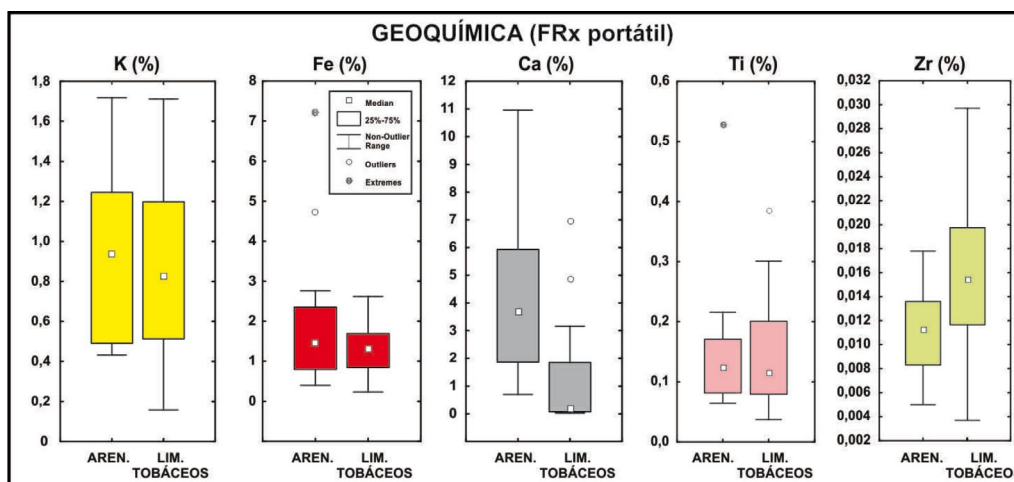


Figura 11. Geoquímica de afloramiento obtenida a partir de FRx portátil, se incluyen elementos mayoritarios (K, Fe, Ca), minoritarios (Ti) y Trazas (Zr). Los resultados surgen de 33 muestras, de las cuales 20 se encuentran indicadas en los perfiles 1 y 2 de la figura 5. Aren.: Arenisca, Lim.: Limolitas.

DISCUSIÓN

Implicancias para el Modelado Geológico de Subsuelo

Los afloramientos de la Faja Plegada de San Bernardo constituyen la fuente por excelencia de

análogos de elementos del sistema petrolero de la cuenca del Golfo San Jorge. El estudio realizado es innovador desde el punto de vista metodológico y de los resultados obtenidos, ya que cuantifica el efecto del contenido tobáceo en la petrofísica, geomecánica y geoquímica de depósitos deltaicos volcanoclásticos de la Fm. Pozo D-129. Este tipo de análisis se encuentra en el estado del arte de las ciencias geológicas aplicadas, por lo cual es importante validar los resultados, al menos de forma semi-cuantitativa con antecedentes de subsuelo. Los valores de Kaire obtenidos en afloramiento exponen un rango intercuartil con un Q3 que no supera los 26 mD. Este valor no es extrapolable de forma directa a análogos de subsuelo, ya que debe ajustarse por telodiagénesis donde se incrementaría o reduciría la porosidad-permeabilidad dependiendo de los procesos dominantes (disolución vs. cementación). La abundancia de cementos carbonáticos y ferruginosos observados en los cortes delgados de arenitas (Fig. 4) sugiere que el sistema poral original estuvo condicionado por la cementación. La disolución posterior de cristales serían el factor principal para el desarrollo de porosidad secundaria (Fig. 4.E). A pesar de no haber evaluado cuantitativamente el factor diagenético, los valores de permeabilidad obtenidos son comparables con los mencionados por López Ángriman *et al.* (2014) para reservorios de la Fm. Pozo D-129. Esta contribución define K mínima: 0.005 mD, K promedio: 12 mD y K máxima: 55 mD. Por otro lado, el rango intercuartil (26 mD-3.4 mD) y el promedio (7.2 mD) definidos in situ para la Fm. Pozo D-129 están acorde a la $K_{gas} > 10$ mD definida para areniscas tobáceas de la Fm. Bajo Barreal por Breda (2003). Aunque estas unidades litoestratigráficas no son equivalentes y posiblemente las historias diagenéticas sean distintas, la correspondencia de valores de permeabilidad entre areniscas tobáceas evaluadas en superficie y subsuelo valida el análogo caracterizado, al menos parcialmente. Independientemente de la precisión y exactitud respecto de mediciones de subsuelo comparables, las mediciones in situ definen valores de referencia para distintas litofacies, tendencias espaciales y valores relativos.

El análisis de la porosidad y permeabilidad de areniscas es un campo de estudio muy frecuente debido a su importancia aplicada al comportamiento de reservorios de hidrocarburos (ej. Atkinson *et al.* 1990; Daws y Prosser 1992; Meyer y Krause 2006; McKinley *et al.* 2011). En términos generales, el incremento de la granulometría y de la selección aumenta la porosidad efectiva y la permeabilidad (Beard y Weyl 1973; Bridge 2003; Fawad *et al.* 2010). Esta situación se traduce en los clásicos modelos de electrofacies y electrosecuencias utilizados para evaluar los paleoambientes en el subsuelo con perfiles de pozos (Potter 1967; Serra 1985; Bridge y Tye 2000). Con esta metodología se interpretan paleoambientes deltaicos silicoclásticos a partir de la distribución espacial de patrones de campana y de embudo, donde los primeros representan tendencias granodecrecientes (canales) y los segundos granocrecientes (barras) (Coleman y Prior 1982; Serra 1985; Knox y Barton 1999). Estos modelos no aplican a los resultados obtenidos en los depósitos deltaicos de la Fm. Pozo D-129, ya que el contenido de matriz tobácea de las areniscas controla la permeabilidad del sistema poral. Areniscas gruesas con abundante matriz pueden desarrollar menor permeabilidad que areniscas medianas a finas más limpias, con valores

de 3.9 mD y 26.4 mD respectivamente, implicando una diferencia de 22.5 mD. Al mismo tiempo, granulometrías finas como limos tobáceos desarrollan permeabilidades equivalentes a areniscas finas a medianas tobáceas, con valores de 2-5 mD. En consecuencia, los trenes granulométricos de los subambientes depositacionales pueden no manifestarse en los trenes de permeabilidad. Este escenario impacta de forma directa en el comportamiento del sistema fluido-roca ante la medición de perfiles eléctricos (Cannon 2016), condicionando la respuesta de los patrones de las electrofacies y en consecuencia de las electrosecuencias. Utilizar patrones de curvas eléctricas sin considerar este factor de control puede inducir a mal interpretar subambientes o la geometría de niveles reservorios. Al mismo tiempo, reconstrucciones paleoambientales basadas en patrones de curvas silicoclásticas sin evaluar la influencia volcaniclástica impactaría en la búsqueda de las litofacies con petrofísica más favorables. El efecto tobáceo sobre los rock types no se restringe a los depósitos de deltas volcaniclásticos de la Fm. Pozo D-129, ya que comportamientos análogos son de esperarse en los canales fluviales de la Fm. Castillo y del Miembro Inferior de la Fm. Bajo Barreal (La Tobácea).

A escala de formación (macroarquitectura), el rango intercuartil de los resultados de Kaire de la Fm. Pozo D-129 (n: 97) es significativamente menor que el de los datos de la Fm. Matasiete (n: 25). El análisis comparado de la petrofísica de ambas formaciones no es el objetivo de esta contribución, sin embargo es importante mencionar que las diferencias tienen un origen sedimentológico. Los datos de la Fm. Matasiete se obtuvieron de litofacies fluviales de canales principales vinculadas a flujos diluidos, donde las muestras de afloramiento claramente exponen un escaso a nulo contenido de matriz tobácea. Esta característica contrasta con todas las mediciones realizadas en los depósitos tobáceos de la Fm. Pozo D-129, los cuales se vinculan a flujos diluidos con elevada carga volcaniclástica o a flujos hiperconcentrados. Esta diferencia litológica asociada al origen paleoambiental de los depósitos se manifiesta en el primer canal de la Fm. Matasiete, donde se obtuvieron valores mayores a 100 mD (Perfil 3, Fig. 6). Este canal principal se interpreta como el sistema alimentador de las secuencias deltaicas infrayacentes, por lo cual sus depósitos deberían presentar componentes neovolcánicos vinculados al retransporte de material piroclástico capturado desde las cabeceras. Es evidente que la eficiencia en diluir el contenido de ceniza volcánica de los depósitos es mayor para los sistemas fluviales que para los deltaicos. Este escenario es importante de mencionar, ya que en el subsuelo la Fm. Matasiete en general no es discriminada dentro del sistema depositacional fluvial-lacustre de las Fms. Matasiete y Pozo D-129 (Atencio *et al.* 2015; López Angriman *et al.* 2014). En consecuencia, valores de permeabilidad muy elevados en el tope de la Formación Pozo D-129, podrían responder a canales fluviales principales de la Fm. Matasiete que no sean identificados por geomorfología sísmica. Para testear esta situación, es fundamental la revisión de cutting donde se identifiquen pelitas rojas (oxidadas) y de esta forma se corrobore una posición paleogeomorfológica subaérea próxima a la línea de paleocosta lacustre. La caracterización geomecánica realizada define valores indirectos

de dureza a partir de la medición del índice R (Aydin y Basu 2005). Estos parámetros pueden ser interpretados como indicadores directamente proporcionales de la competencia de los estratos (Ferrill *et al.* 2017). La tendencia vertical de R expone un incremento dureza (competencia) con el aumento del contenido tobáceo, situación que se ve amplificada si los niveles están cementados. Este comportamiento se da en areniscas y limos por igual, sustentando un control sinsedimentario vinculado a la carga volcanoclástica del flujo, situación que puede estar incrementada por la historia diagenética. Por otro lado, areniscas de distinta granulometría pero similar contenido de matriz y grado de cementación poseen comportamientos distintos, con mayores valores de R para tamaños de grano más fino. Este patrón se interpreta como consecuencia de la absorción del impacto por el sistema de macroporos, lo cual disminuye el valor de rebote. Este comportamiento sería similar a lo que sucede con las mediciones sobre superficies meteorizadas, las cuales disminuyen la resistencia geomecánica por absorción de la energía debido a la compactación (Proceq 2016). Los patrones de resistencia obtenidos plantean una situación interesante para análogos de subsuelo, donde la competencia litológica controla parámetros indirectos obtenidos de perfiles velocidades de tránsito acústicas. En este sentido el material tobáceo puede influir de forma antagónica: I) obliterando la identificación de rock types de areniscas tobáceas vs. limos tobáceos, y II) otorgando un parámetro potencialmente aplicable para diferenciar areniscas limpias de areniscas tobáceas.

El estudio de la distribución de elementos geoquímicos en la CGSJ se encuentra en sus etapas iniciales. Recientemente Larriestra *et al.* (2017) identifican un incremento relativo de K en pelitas negras o en los reservorios con hidrocarburos, situación que asocian a la incorporación de biodetritos vegetales en el sistema lacustre de la Fm. Pozo D-129. El incremento relativo de K en cutting de esta formación también fue identificado por Allard *et al.* (2018), sin embargo su origen lo atribuyen al incremento de contenido tobáceo. Los depósitos tobáceos estudiados en afloramiento no incluyen pelitas negras ni rastros de hidrocarburos en las areniscas, por lo cual se interpreta una relación directa entre el contenido de ceniza volcánica respecto del contenido de K. Siguiendo esta línea de pensamiento, los resultados de FRx contribuyen a inferir la presencia de material tobáceo a partir de la medición de K, y de cementos carbonáticos y ferruginosos a partir de Ca y Fe. El origen geoquímico de estos elementos en secuencias estresadas por el aporte de material volcanoclástico debe ser considerado al utilizar herramientas de espectroscopía de subsuelo que otorguen composiciones mineralógicas a partir de relaciones estequiométricas de elementos químicos. En este sentido, en areniscas tobáceas análogas a las estudiadas, el K no es aportado por feldespatos potásicos ni el Ca únicamente por plagioclasas. Al mismo tiempo las concentraciones de Fe y el Ca pueden vincularse a cementos y no a la fracción clástica, situación que desfavorecería los canales de permeabilidad de la roca reservorio.

Los resultados petrofísicos, geomecánicos y geoquímicos del estudio realizado abren nuevos horizontes en la caracterización de análogos de afloramiento. Futuros estudios evaluarán el comportamiento de los parámetros de forma multiescala, desde la litofacies hasta la megasecuencia

estratigráfica. La confección de una base de datos robusta de las distintas formaciones del sistema petrolero y su comparación con el subsuelo será fundamental para comprender los factores de control en la calidad de los reservorios así como ajustar la petrofísica evaluada mediante rock-types.

CONCLUSIONES

El estudio realizado demuestra el potencial uso de herramientas portátiles como complemento de estudios de afloramiento tradicionales. Tanto el permeamómetro de afloramiento como el martillo de Schmidt permiten ensayos rápidos, no-destructivos, y de bajo costo, posibilitando el incremento en la densidad del muestreo. Esta característica hace posible que se evalúen patrones espaciales y que se vinculen las mediciones con las distintas litofacies y asociaciones de litofacies.

Los distintos subambientes definidos se vinculan a un sistema deltaico volcanoclástico influenciado por el retrabajo del oleaje en un nuevo afloramiento de la Fm. Pozo D-129. La evaluación multiparamétrica de los estratos permitió caracterizar el efecto del contenido tobáceo en la permeabilidad al aire (Kaire) y en la resistencia mecánica (R). En análisis de 97 valores de Kaire y de 101 R definió una tendencia general donde el contenido tobáceo es inversamente proporcional a la permeabilidad al aire y directamente proporcional a la dureza. El tipo de litofacies, su distribución y proporción relativa en cada subambiente controla los parámetros petrofísicos y geomecánicos. Depósitos del complejo canal-barra presentan areniscas con mejor desarrollo de estructuras tractivas y menor contenido de matriz tobácea, y en consecuencia registran mayor permeabilidad al aire y menor dureza. Otros subambientes como el frente deltaico retrabajado por oleaje, el frente deltaico distal o la planicie interdistributaria presentan areniscas con un contenido variable de matriz y por lo tanto los valores de permeabilidad al aire y dureza fluctúan acorde a esta característica. Los depósitos finos asociados a limos tobáceos presentan bajos valores de Kaire y R. Las mediciones geoquímicas realizadas con FRx sugieren una correlación directa entre el contenido de K y carácter tobáceo de las litologías. La variabilidad espacio temporal del comportamiento petrofísico, geomecánico y geoquímico puede ser utilizada para evaluar reservorios análogos y rock types bajo una óptica que contemple el efecto volcanoclástico en el sistema deposicional de la base del Gr. Chubut.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Geología de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco por el apoyo logístico para realizar las tareas de campo y de gabinete. Al señor Mauro Jerez por permitir el acceso a los afloramientos. A los revisores que con sus comentarios y correcciones mejoraron la versión original del manuscrito.

REFERENCIAS CITADAS

- Adams A.E. y W.S. MacKenzie, 2001, "A colour atlas of carbonate sediments and rocks under the microscope", Manson Publishing, 108 p.
- Allard J.O., N. Foix y S.A. Buetti, 2017, "Nuevo hallazgo de la Formación Pozo D-129 en el Anticlinal del Cerro Kepi (Sierra Silva, cuenca del Golfo San Jorge): paleoambiente, estratigrafía y controles externos", XX Congreso Geológico Argentino, Actas ST 1, 1-6, Tucumán, Argentina.
- Allard J.O., N. Foix, M.L. Ferreira Pitteau y M. Atencio, 2018, "(Re)Visión de secuencias sedimentarias cretácicas en pozos profundos de la cuenca del Golfo San Jorge: quimioestratigrafía & controles estratigráficos externos", X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina.
- Atencio, M., J. Edelvais, Y. Basile, S. Utgé, y F. Späth, 2015, "Geomorfología sísmica de la última transgresión lacustre de la Formación Pozo D-129 en la región de la Faja Plegada, cuenca del Golfo San Jorge", Revista de la Asociación Geológica Argentina 72, 1, 136-147.
- Atkinson, C.D., J.H. McGowen, S. Bloch, L.L. Lundell y P.N. Trumbly, 1990, "Braidplain and deltaic reservoir, Prudhoe Bay Field, Alaska", en: J.H. Barwis, J.G. McPherson, J.R.J. Studlick (eds.) Sandstone Petroleum Reservoirs, Springer-Verlag, 7-29, Berlin.
- Aydin, A. y A. Basu, 2005, "The Schmidt hammer in rock material characterization", Engineering Geology 81, 1-14.
- Basile, Y.A., S.M. Utgé, V. Martínez Cal y C. Ponce, 2014, "Avances en el conocimiento sobre la capacidad generadora de la Fm. Pozo D-129: aspectos litológicos y geoquímicos. Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina", IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas 1, 265-285, Mendoza.
- Beard, D.C. y P.K. Weyl, 1973, "Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand", American Association of Petroleum Geologists Bulletin 57, 2, 349-369.
- Bhattacharya, J.P., 2006, "Deltas", en: H.W. Posamentier y R.G. Walker (eds.) Facies Models Revisited, SEPM Special Publication 84, p. 237-292.
- Breda E., 2003, "Discriminación de tobas mediante el uso de perfiles sísmico y densidad compensada", Informe inédito Repsol-YPF, 13 p.
- Breda, E. y M. Lucero, 2005, "Caracterización de los reservorios de la Formación Bajo Barreal Inferior Arenas y Tobas (Sección Tobácea)", VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas 1, p. 197-214.
- Bridge, J.S., 2003, "Rivers and Floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record", Blackwell, 491 p.
- Bridge, J.S. y R.S. Tye, 2000, "Interpreting the dimensions of ancient fluvial channel bars, channels, and channel belts from wireline-logs and cores", American Association of Petroleum Geologists Bulletin 84, 1205-1228.
- Buetti, S., J.O. Allard y N. Foix, 2017, "Arquitectura estructural de la Sierra Silva, Faja Plegada de San Bernardo (Cuenca del Golfo San Jorge): implicancias para el timing del broken foreland andino patagónico", XX Congreso Geológico Argentino, Actas S12 p. 48-53, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Cannon, S., 2016, "Petrophysics: a practical guide", John Wiley & Sons, Ltd. Oxford, 199 p.
- Cao, Y., Y. Wang, J.G. Gluyas, H. Liu, H. Liu y M. Song, 2018, "Depositional model for lacustrine nearshore subaqueous fans in a rift basin: The Eocene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China", Sedimentology, doi:10.1111/sed.12459

- Coleman, J.M. y D.B. Prior, 1982, "Deltaic environments", en: P.A. Scholle y D. Spearing (eds.) Sandstone depositional environments, American Association of Petroleum Geologists Memoir 31, 139-178.
- Daws, J.A. y D.J. Prosser, 1992, "Scales of permeability heterogeneity within the Brent Group", *Journal of Petroleum Geology* 15, 4, 397-418.
- Fawad, M., N.H. Mondol, J. Jahren y K. Bjorlykke, 2010, "Microfabric and rock properties of experimentally compressed silt-clay mixtures", *Marine and Petroleum Geology* 27, 1698-1712.
- Ferrill, D.A., A.P. Morris, R.N. McGinnis, K.J. Smart, S.S. Wigginton y N.J. Hill, 2017, "Mechanical stratigraphy and normal faulting", *Journal of Structural Geology* 94, 275-302.
- Figari, E., E. Strelkov, G. Laffitte, M.S. Cid de la Paz, S. Courtade, J. Celaya, Vottero A., P. Lafourcade, R. Martínez y H.J. Villar, 1999, "Los sistemas petroleros de la cuenca del Golfo San Jorge. Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica", IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas 1, p. 197-237, Mar del Plata, Argentina.
- Filomena, C.M., J. Hornung y H. Sollhofen, 2014, "Assessing accuracy of gas-driven permeability measurements: a comparative study of diverse Hassler-cell and probe permeameter devices", *Solid Earth* 5, 1-11.
- Gazley, F.G., J.K. Vry, E. du Plessis y M.R. Handler, 2011, "Application of portable X-ray fluorescence analyses to metabasalt stratigraphy, Plutonic Gold Mine, Western Australia", *Journal of Geochemical Exploration* 110, 74-80.
- Hirschfeldt, M., 2014, "Análisis de madurez de la Cuenca del Golfo San Jorge: desafíos actuales y futuros para un desarrollo sostenido y sustentable", Jornadas de Producción de Instituto Argentino de Petróleo y Gas (IAPG), Comodoro Rivadavia, 19 p.
- Knox, P.R. y M.D. Barton, 1999, "Predicting interwell heterogeneity in fluvial-deltaic reservoirs: effects of progressive architecture variation through a depositional cycle from outcrop and subsurface observations", en: R. Schatzinger y J. Jordan (eds), *Reservoir Characterization-Recent Advances*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 71, 57-72.
- Larriestra, F., M.E. Covo, R. Cúneo, R.A. Benso, A. Corvelleri y C.N. Larriestra, 2017, "La relación K/Rb, su implicancia geológica y petrofísica: un caso de prueba en la cuenca del Golfo San Jorge", *Desafíos Y-Tec* 4, 10, 60-65.
- Lesta, P. y R. Ferello, 1972, "Región Extraandina del Chubut y norte de Santa Cruz" en: A. Leanza (ed), *Academia Nacional de Ciencias (Eds.) Geología Regional Argentina*, 601-654, Córdoba.
- López Angriman, A., C. Zarpellón, F. Mussel y M. Cohen, 2014, "Modelo Paleogeográfico de la Sección Superior de la Formación Pozo D-129. Su aplicación al desarrollo de reservas en la cuenca del Golfo San Jorge, Argentina" IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas 1, 489-510, Mendoza, Argentina.
- McHenry, L.J., 2009, "Element mobility during zeolitic and argillic alteration of volcanic ash in a closed-basin lacustrine environment: Case study Olduvai Gorge, Tanzania", *Chemical Geology* 265, 540-552.
- McKinley, J.M., P.M. Atkinson, C.D. Lloyd, A.H. Rufell y R.H. Worden, 2011, "How porosity and permeability vary spatially with grain size, sorting, cement volume and mineral dissolution in fluvial Triassic sandstones: the value of geostatistics and local regression", *Journal of Sedimentary Research* 81, 844-858.

- Meyer, R., y F. Krause, 2006, "Permeability anisotropy and heterogeneity of a sandstone reservoir analogue: An estuarine to shoreface depositional system in the Virgelle Member, Milk River Formation, Writing-on-Stone Provincial Park, southern Alberta", *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 54, 4, 301-318.
- Mount, J., 1985, "Mixed siliciclastic and carbonate sediments: a proposed first-order textural and compositional classification", *Sedimentology* 32, 435-442.
- Paredes, J.M., J.O. Allard, N. Foix, B. Alvarez y S.X. Olazábal, 2014, "Sedimentología y perfiles de rayos gamma de la Formación Pozo D-129 en la Sierra de San Bernardo, Chubut", *Actas IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, p. 455-479, Mendoza, Argentina.
- Potter, P.E., 1967, "Sand Bodies and sedimentary environments: a review", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 51, 3, 337-365.
- Proceq S.A., 2016, "Rock Schmidt. Operating Instructions", 24 p., Switzerland.
- Reineck, H.E. y I.B. Singh, 1973, "Depositional Sedimentary Environments, with reference to terrigenous clastics", Springer-Verlag, 439 p., New York-Heidelberg.
- Rowe, H., N. Hughes, K. Robinson, 2012, "The quantification and application of handheld energy-dispersive x-ray fluorescence (ED-XRF) in mudrock chemostratigraphy and geochemistry", *Chemical Geology* 234-325, 122-131.
- Saavedra, B. y E. Bazán, 2016, "Severos problemas de estabilidad de pozos y setups en la Cuenca del Golfo San Jorge: su análisis y resolución", en: *Resúmenes Segundas Jornadas Geológicas de la Cuenca del Golfo San Jorge* J.M. Paredes, N. Foix, y J.O. Allard (eds.), p. 86-87, Comodoro Rivadavia, Argentina.
- Salomone, G., I. Biocca, A. Amoroso, J.C. Arocena, G. Ronanduan, D. Guerberoff y L. Palacio, 2002, "Los reservorios del Flanco Sur", en: M. Schiuma, G. Hinterwimmer y G. Vergani (eds.) *Rocas Reservorio de las cuencas productivas de la Argentina*, V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, p. 155-174.
- Serra, O., 1985, "Sedimentary environments from wireline logs", Schlumberger, 211 p.
- Simone, L., 1980, "Ooids: a review", *Earth-Science Reviews* 16, 319-355.
- Smith, G.A. y Lowe D.R., 1991, "Lahars: Volcano-hydrologic events and deposition in the debris flow - hyperconcentrated flow continuum", en: R.V. Fisher y G.A. Smith (eds.), *Sedimentation in Volcanic Settings*, SEPM Special Publication 45, 59-70.
- Smith, G.A., 1991, "Facies sequences and geometries in continental volcanoclastic sediments", en: R.V. Fisher y G.A. Smith (eds.), *Sedimentation in Volcanic Settings*, SEPM Spec. Publication 45, 109-121.
- Zoback, M.D., 2010, "Reservoir Geomechanics", Cambridge University Press, New York, 449 p.
- Do Campo, M., C. Del Papa, F. Nieto, F. Hongn e I. Petrinovic, 2010, "Integrated analysis for constraining palaeoclimatic and volcanic influences on clay-mineral assemblages in orogenic basins (Palaeogene Andean foreland, Northwestern Argentina)", *Sedimentary Geology* 228, 98-112.
- Sylwan, C., C. Droeven, J. Iñigo, F. Mussel y D. Padva, 2011, "Cuenca del Golfo San Jorge" VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, *Simpósio Cuencas Argentinas: visión actual*, p. 139-183.

Zeller, M., S.B. Reid, G.P. Eberli, R.J. Weger y J.L. Massafiero, 2015, "Sequence architecture and heterogeneities of a field Scale Vaca Muerta ana-

log (Neuquén Basin, Argentina) From outcrop to synthetic seismic", *Marine and Petroleum Geology* 66, p. 829-847.