

MARCO ESTRATIGRÁFICO INTERPRETATIVO PARA LA BASE DE LA FM. BAJO BARREAL EN EL CAMPO SUR PIEDRA CLAVADA, CUENCA GOLFO SAN JORGE: ENFOQUE BASADO EN GAMMA RAY CON ALTO IMPACTO EN EL DESARROLLO DEL YACIMIENTO

Marina Lema¹, Nicolás Sandoval², Nicolás Bufaliza³, Fabiola Bodan², Oscar Limarino⁴, Rodrigo Rodríguez²

1: Geóloga independiente. marinalemag@gmail.com

2: CGC Compañía General de Combustibles S.A. fabiola_bodan@cgc.com.ar,
pablo_sandoval@cgc.com.ar, rodrigo_rodriguez@cgc.com.ar

3: Estudiante de Maestría en Geofísica. Colorado School of Mine, Denver, Colorado. bufalzanico@gmail.com

4: Departamento de Geología, Instituto de Geociencias Básicas y Aplicadas de Buenos Aires oscarlimarino@gmail.com

Palabra clave: marco estratigráfico, perfil gamma, estratigrafía secuencial, yacimiento Sur Piedra Clavada

ABSTRACT

Stratigraphic schemes based on geologically significant surfaces that bound genetically related strata have not been widely adopted as the conceptual frames of reference in oilfield development in Golfo San Jorge basin. One of the main reasons for this is the unfeasibility of identifying said surfaces in the context of the basin geology, both in outcrops and in subsurface. For this reason, empirical frameworks are usually defined to divide the productive succession (600 m thick) into thinner units that contain a few tens of reservoirs. These units are bounded by surfaces not necessarily corresponding to features of geological significance, therefore providing limited interpretative potential.

The need to identify analogs to mature field Sur Piedra Clavada (SPC), a highly productive, thoroughly characterized field located in the south flank of the basin, led to establish the need of a conceptual framework that accounted for observed sand bodies configuration. With gamma ray log as the main tool, periodic gamma ray log patterns variations were identified for the main productive interval (Bajo Barreal Fm.), roughly 80 m thick. Integration with detailed petrography of core and side wall cores provided the critical outlines of an interpretative stratigraphic framework. For 120 test wells, three sequences were defined, based on the presence of "sand clock" shapes successions: stacking of 20-35 m thick units bounded by laterally continuous, maximum gamma ray intervals. Limiting surfaces correspond to tuffs, vitreous sandy and clayey tuffs. Thin sand bodies tend to locate in an apparently random position while the thickest ones (probably related to different aggradation processes), are middle and upper sections of each sequence, with occasional presence of high thickness sand bodies, which probably increases interconnectivity of reservoirs. Stratigraphic units reflect the variations in the Accommodation/Sedimentation regime, controlled mainly by changes in pyroclastic input. Maximum input moment is equivalent to maximum pseudo accommodation moment, which is followed by re-hierarchization of fluvial network, and eventually by incision, generating highest thickness sand bodies. The regional nature of the main controlling parameter on sedimentation strengthens analog validity for neighbor areas and allows for inference of similar reservoir configurations. The constructed Framework is currently a key support for short-term and long-term development plans for the block, providing a highly predictive conceptual background.

INTRODUCCIÓN

El área estudiada forma parte de las concesiones otorgadas a CGC S. A. y constituye el bloque principal de desarrollo que comparten los yacimientos Sur Piedra Clavada y Piedra Clavada. El campo se encuentra en el Flanco Sur de la Cuenca del Golfo San Jorge (CGSJ) en la región patagónica argentina, inmediatamente al sur del paralelo 46° que funciona como división política entre las provincias de Chubut y Santa Cruz. La ruta provincial N°43, que une las localidades santacruceñas de Pico Truncado y Las Heras, es la principal vía de acceso al yacimiento (Fig. 1).

Descubierto en el año 2003 y con un desarrollo explosivo entre 2007 y 2011 y más de 200 sondeos perforados, el yacimiento Sur Piedra Clavada- Piedra Clavada (SPC-PC) se encuentra en estado de desarrollo maduro.

La historia de exploración y desarrollo del campo en su conjunto se remonta a la década del 60. Desde su descubrimiento, el área ha sido operada por distintas compañías (Yacimientos Petrolíferos Fiscales, CADIPSA, Vintage, Occidental, Sinopec Argentina). Finalmente, desde mediados del año 2021, CGC S.A. se consolida como operador de campos petroleros en la industria energética argentina adquiriendo el 100% de las concesiones de Sinopec Argentina en el país.

MARCO TECTÓNICO-ESTRATIGRÁFICO

La cuenca se encuentra limitada por el Macizo Norpatagónico o de Somuncurá por el Norte, por el Macizo del Deseado por el Sur, por la Cordillera de los Andes por el Oeste y por el margen continental del Océano Atlántico por el Este. Como resultado de la tectónica extensional, los rasgos estructurales principales tienen sentido O-E. Sin embargo, durante el Mioceno, como resultado de transpresión e inversión tectónica (Chelotti 1997), vinculados al desarrollo de la Cordillera de los Andes, se produce el levantamiento de la faja plegada de San Bernardo, con orientación N-S, dividiendo la cuenca en dos sectores: Este y Oeste (Fig. 1).

La CGSJ está ligada al desarrollo de grupos de fallas de carácter extensional asociadas a un sistema del rift Jurásico (Fitzgerald *et al.* 1990, Sylwan 2001). Una visión estructural deja ver que el sector Oriental de la cuenca está conformado por dos Flancos (Norte y Sur), que comprenden fosas del Jurásico Superior-Cretácico Inferior limitadas por fallas de rumbo aproximado oeste-este escalonadas hacia el centro de cuenca. Hacia el sector occidental se desarrolla una faja de deformación compresiva con orientación meridional y posible componente de rumbo sinistral (Figari *et al.* 1999).

Desde el punto de vista de la migración de hidrocarburos, los sistemas de fallas suficientemente profundos para conectar la roca madre con los principales reservorios, constituyen la principal vía de migración secundaria y un control en la generación de trampas estructurales.

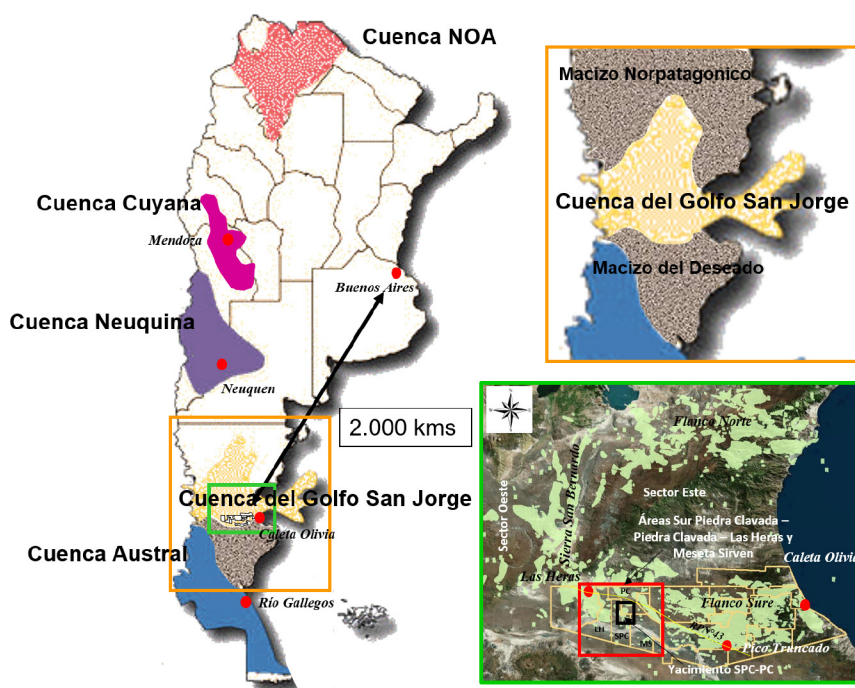


Figura 1. Marco regional de ubicación de la Cuenca del Golfo San Jorge en la República Argentina y áreas en concesión otorgadas a CGC S.A. Cobertura areal del bloque en desarrollo SPC-PC como las principales áreas de estudio (recuadro negro) y extensión completa de las áreas a prospectar, Sur Piedra Clavada y Piedra Clavada (SPC y PC), Las Heras (LH) y Meseta Sirven (MS) (recuadro rojo).

La división temporal, pero con coincidencia general con las divisiones lito-estratigráficas propuesta por Figari *et al.* (1999), comienza con secuencias depositadas en etapa de syn-rift durante el Jurásico medio. La Megasecuencia 0, la constituye un complejo volcánico-volcanoclástico ácido (Grupo Lonco Trapial) que conforma el “basamento económico o sísmico”. La sobreyace en discordancia, la Megasecuencia I (Neocomiano) que incluye las Formaciones Pozo Anticlinal Aguada Bandera (compuestas principalmente por fangolitas ricas en materia orgánica características de cuenca hambrienta) y la Formación Pozo Cerro Guadal constituida por areniscas representantes de escenarios fluviales y/o fluvio-deltaicos progradantes. Como resultado del enfriamiento post-rift, que dio lugar a la etapa de subsidencia termal, junto con un basculamiento del eje de la cuenca hacia el este (Hechem *et al.* 1990, Gianni *et al.* 2018), se apoyan mediante discordancia angular o paraconcordancia, según la posición en la cuenca, las secuencias continentales de la Megasecuencia II – Chubutiano, que constituyen el relleno principal de la cuenca. El mismo tuvo lugar entre los pisos Barremiano Tardío y el límite Cretácico-Terciario (Feruglio 1950). Estas unidades están compuestas por sedimentitas continentales con variada participación de material piroclástico. La generación de un expandido sistema lacustre somero permitió la acumulación de sedimentos finos ricos en materia orgánica de la Formación Pozo D-129 (Hauteriviano-Aptiano temprano), responsables de haber generado la mayor parte de los hidrocarburos en la cuenca (Van Nieuwenhuise y Ormiston 1989). Feruglio (1950), Teruggi y Rosetto (1963), Lesta *et al.* (1968) entre

otros, concuerdan que el conjunto de sedimentos suprayacentes representados por las Formaciones Mina del Carmen y Bajo Barreal y sus variaciones laterales, (que junto con la Fm. Pozo D129, se agrupan en el Grupo Chubut) (Fig. 2), fueron depositados en ambientes predominantemente continentales subaéreos y subacuáticos someros y que ambas constituyen los principales reservorios de la cuenca. Cambios en la dinámica de subducción (Larson y Pitman 1972) desencadenaron procesos de magmatismo calco-alcalino, cuyos términos más distales estarían representados por el abundante material piroclástico reconocido en las Formaciones Castillo y Mina del Carmen.

Tiempo (Ma)	ERA	PERIODO	EPOCA	PISO	UNIDADES			MEGA SECUENCIAS	EVENTO	AMBIENTE DEPOSITACIONAL Litología Generalizada	Max. Espesor (m)	HC
					SUR	NORTE	OESTE					
1.6	CENOZOICO	CUAT.	PLEISTICENO	"Rodados Tehuelches"			IV		GLACIO - FLUVIAL	40		
5.3			TERCIARIO	MIOCENO	Fm. Santa Cruz			III			200	
23.7		OLIGICENO			Fm. Patagonia				MARINO SOMERO	280		
36.6		EOCENO		Fm. Sarmiento			FLUVIO - LACUSTRE		120			
57.8				Fm. El Huelmul			FLUVIO - DELTAICO		250			
66.4				PALEOCENO	Fm. Río Chico				MARINO SOMERO FLUVIO-DELTAICO	200		
74.5		CRETACICO	SUPERIOR	SENONMANIANO	MASTRICHTIANO	Fm. Lagunas Palacios			II	Subsistencia Tardía	DELTAICO	
84	CAMPANIANO				Fm. Meseta Espinosa	Fm. El trébol	FLUVIO - LACUSTRE					
87.5	SANTONIANO											
88.5	CONIACIOANO											
91	TURONIANO			Fm. Cañadón Seco	Fm. Comodoro Rivadavia	Fm. Bajo Barreal	ALUVIAL - FLUVIO - LACUSTRE	4000+				
97.5	CENOMANIANO											
113	INFERIOR		NEOCOMIANO	ALBIANO	Fm. Mina del Carmen	Fm. Castillo	FLUVIO - LACUSTRE					
119				APTIANO	Fm. Pozo D-129	Fm. Matasiete	FLUVIO - LACUSTRE	1500+				
124				BARREMIANO	Mb. Los Alazánes							
131				HAUTERIVIANO	Fm. Pozo Cerro Guadal		LACUSTRE - FLUVIAL	560				
138				VALANGINIANO								
144	JURASICO	MALM	BERRIACIANO	Fm. Pozo Anticinal Aguada Bandera			I	Rift Tardío	LACUSTRE (HAMBRIENTO)	1700+		
163			TITONIANO									
187			DOGGER	KIMMERIDGIANO								
				OXFORDIANO	Grupo Bahía Laura	Grupo Lonco Trapial			Complejo Volcánico Sedimentario			
				CALOVIANO								
208		LIASICO	BATONIANO									
			BAJOCIANO									
			AALENIANO									
245		PZ	PERMICO CARBONIFERO EOPALEOZOICO	TOARCIANO				0	Rift Temprano	VOLCANICLASTICO	1300+	
PLEINSBACHIANO				Liásico			LIAS			PRE RIFT	MARINO SOMERO	700+
			ETANGIANO						CONTINENTAL	?		
				Basamento ígneo y metamórfico					ROCAS GRANITICAS Y METAMORFICAS			

Figura 2. Columna estratigráfica de la Cuenca del Golfo San Jorge (Modificada de Sylwan *et al.* 2011). Megasecuencias estratigráficas de Figari *et al.* (1999) y ubicación de la sección tobácea en la columna sedimentaria, como unidad estudiada.

La sucesión sedimentaria de la sección inferior de la unidad suprayacente (Fm. Bajo Barreal), es característica de ambiente aluvial con participación de depósitos de caída de cenizas (Umazano *et al.* 2005). Esta abundancia relativa de material piroclástico distintiva conduce al acuerdo

generalizado, aunque informal, de nombrar a esta unidad como la “Sección Tobácea” (Sanagua *et al.* 2002, Salomone *et al.* 2018). Tanto la Formación Bajo Barreal como su variación lateral hacia el este, la Formación Cañadón Seco, aunque con marcadas diferencias, concentran cuerpos arenosos y areno-tobáceos canalizados depositados por cursos fluviales de creciente sinuosidad hacia el tope. Lateralmente se asocian a depósitos lagunares efímeros (Feruglio 1950; Teruggi y Rosetto 1963). Las llanuras de inundación muestran decreciente participación de facies piroclásticas finas también hacia el tope (Jalfin *et al.* 2000). En su conjunto, componen el objetivo hidrocarburífero por excelencia de la cuenca. Posteriormente, oscilaciones eustáticas y las subsiguientes transgresiones y regresiones marinas desde el Atlántico en la región, marcan el límite con la Megasecuencia III – terciaria, mientras que el ciclo Cuaternario (Megasecuencia IV) representa un período post tectónico, durante el cual los mecanismos de depositación fueron impulsados por drásticos cambios climáticos y caídas en el nivel del mar asociados a las glaciaciones del Pleistoceno (Sylwan *et al.* 2011).

Sobre el yacimiento y alrededores

De la misma manera que en la mayoría de los campos de la región, la combinación de las formaciones Bajo Barreal (fBB – roca reservorio), con la Fm. Pozo D129 (roca generadora principal de la Cuenca), conforman el principal sistema petrolero del yacimiento.

La relación reservorio vs no reservorio, de techo a base, alcanza valores medios de 0.50, con mínimos de 0.20, para la Fm. Comodoro Rivadavia (Flanco norte de la cuenca). Para la fBB y el yacimiento SPC-PC sobre el sector sur y suroeste de la cuenca en la zona de estudio, dicha relación disminuye hasta 0.25 con mínimos de 0.05 (Figari *et al.* 2002).

Al igual que en los bloques productivos descritos por Ferreira *et al.* (2011), Lenge y Galarza (2005), Barandica y Tejada Argañaraz (2013), Salomone *et al.* (2018) entre otros, la información sísmica 3D facilita la identificación de figuras canaliformes en la sección inferior de la fBB. Reconocer estos rasgos o no, impactará en la estrategia de desarrollo de un campo. En el caso del yacimiento SPC-PC, la producción de hidrocarburos entrampados en las areniscas agrupadas dentro de las figuras sísmicas canalizadas (denominados intervalo H100), puede representar más del 80% de la acumulada de final de un pozo, aunque más frecuentemente contribuye alrededor del 30% del volumen de petróleo acumulado final de cada pozo (Fig. 3).

El estudio de caracterización e identificación de regiones de equilibrio presentado por Rodríguez *et al.* (2011), indica un estado de madurez avanzado del bloque, con zonas con diferentes grados de agotamiento, otras en las que está próximo a ser alcanzado el contacto agua petróleo y otras con disminución en la ocurrencia de reservorios productivos. Dada la magnitud del desarrollo del bloque y la baja densidad de pozos en zonas circundantes, cabe preguntarse: ¿Es razonable, desde el modelo geológico, prospectar bloques análogos en la región que contengan

Producción Multi-reservorio

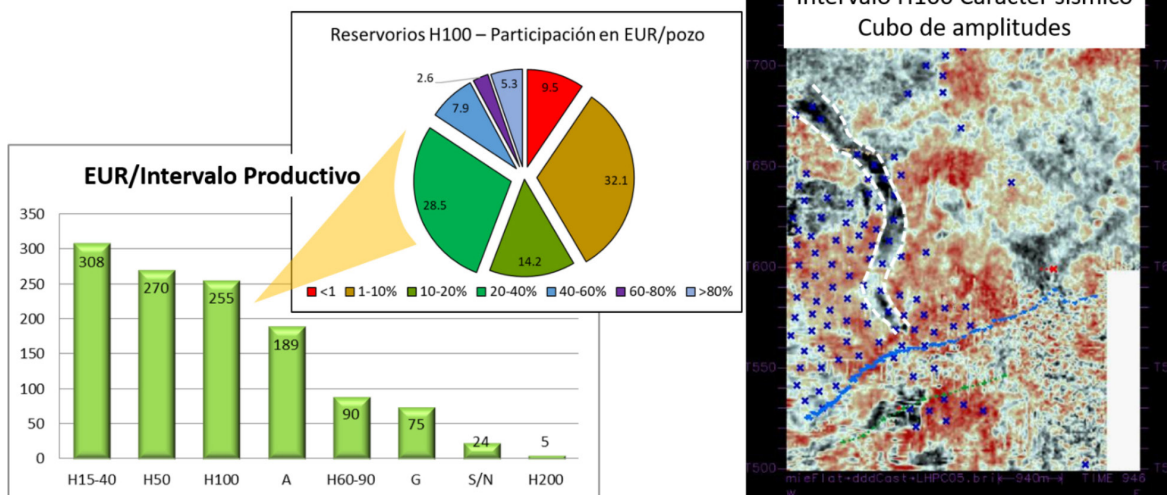


Figura 3. SPC-PC como yacimiento multi reservorios - gráfico de EUR (Estimated Ultimate Recovery) para cada intervalo productivo. Participación del Intervalo rH100 en la acumulada de hidrocarburos final por pozo de aproximadamente 30% en promedio. Identificación sísmica en el cubo de amplitudes PSTM (Post Stack Time Migration), de la figura canalizada principal para el intervalo rH100 en SPC-PC a partir del horizonte sísmico al tope del intervalo productivo horizontalizado.

estos reservorios de alta productividad? ¿Hay posibilidad de predicción de ocurrencia de estos reservorios en bloques aledaños a SPC-PC? Para potenciar las chances de respuesta a estos interrogantes es necesario generar y/o definir un modelo estratigráfico que refleje el/los regímenes de cambio en la relación acomodación/sedimentación a lo largo de la historia de depositación de estos intervalos altamente productivos. Los perfiles de pozo de lecturas de emisiones naturales de rayos gamma total (GR) y de descomposición por emisiones en uranio, torio y potasio (SGR), se utilizan frecuentemente para la correlación y análisis de secuencias estratigráficas (Catuneanu 2006). El fundamento de adquisición y generación de las curvas de potencial espontáneo (SP) y de GR, las encuadra como indicadores indirectos de litología o del tamaño de grano. Altos valores de GR se corresponden con arcillas y litologías de grano fino, mientras que valores relativos bajos son típicos para unidades de granulometrías más gruesas (areniscas, conglomerados), principalmente debido a la mayor participación de cuarzo y carbonatos, ya sea como clastos y/o cementos (Rider 1999).

En la CGSJ, el resultado de la aplicación de uno u otro método no suele ser concluyente al momento de la estimación del contenido de arcillas o de la presencia de arenas propiamente dicho, ya sea por el tipo de fluidos alojados en el espacio poral o por la participación de elementos radioactivos en los componentes volcánico-clásticos (Acuña *et al.* 2011).

La presencia de material de origen piroclástico (depósitos de caída de ceniza y/o retrabajados por cursos de agua), se presenta como clastos y/o matriz y pseudomatriz en las areniscas y en las llanuras de inundación que actúan como los principales sellos laterales y verticales. Debido a que se requiere de estudios adicionales y específicos de calibración para cada región, Heslop (1974),

propone una metodología para la discriminación de facies con base en el GR, sin embargo, la falta de contraste composicional entre los diferentes elementos fluviales suele condicionar de manera negativa, el uso del GR o SGR para la identificación de intervalos permeables, en especial para las formaciones Bajo Barreal (Paredes *et al.* 2018) y Castillo.

En este punto, Limarino *et al.* (2017) demuestran en su modelo diagenético, que las características petrofísicas de estas rocas son fuertemente dependientes de la abundancia relativa de intraclastos de composición piroclástica (que contribuyen al aumento relativo en las lecturas de GR). En el mismo sentido, Paredes *et al.* (2018, 2020) reconocen diferencias en la abundancia relativa de material piroclástico en las asociaciones de facies fluviales estudiadas en los afloramientos del Cerro Ballena para el intervalo superior de la fBB (Flanco Sur de la CGSJ). Estos autores concluyen que las condiciones climáticas funcionaron como variable principal en el control sobre la arquitectura de los depósitos. Mediante el análisis estadístico detallado de Castillo Gamarra *et al.* (2018), fue posible demostrar que los datos de SGR de superficie proporcionados por Paredes *et al.* (2018), son suficientes para discriminar estadísticamente entre las asociaciones de facies descriptas en los afloramientos.

Recientemente, Rodríguez *et al.* (2022), profundizan en la identificación de unidades sedimentarias de la CSGJ dentro de un marco de estratigrafía secuencial, remarcando que, aún cuando la curva de GR no sea utilizada con frecuencia en la identificación de areniscas, la herramienta permite establecer diferencias significativas entre formaciones y eventualmente intra formacionales, con la consecuente identificación de límites de secuencias estratigráficas de alta resolución de hasta 4° orden (Fig. 4a).

METODOLOGÍA

La definición de los límites de secuencias se basó en la interpretación de las curvas de GR adquiridas durante las operaciones de perfilaje a pozo abierto. La interpretación del perfil de GR se realizó mediante la correlación de una muestra de 120 pozos agrupados en 11 secciones con orientación NO-SE y O-E para cubrir al yacimiento SPC-PC en toda su extensión. Se identificaron 4 intervalos con altos valores relativos de radiación gamma. Su continuidad lateral posibilitó su correlación a lo largo de la totalidad del bloque delimitándose 3 secuencias estratigráficas de alta resolución. Tope y base del conjunto de las tres secuencias tienen expresión sísmica, no sólo en SPC-PC sino, en los casi 1000 km² que cubren los yacimientos SPC, PC, LH y MS. Se interpretaron los horizontes sísmicos respectivos en toda la región. Se generaron cubos sísmicos de amplitudes PSTM (*Post Stack Time Migration*), de curvatura, continuidad, coherencia, amplitudes RMS y reflection strength, horizontalizados a tope y base de las secuencias. Cada cubo se recorrió con saltos de entre 2ms a 4ms, lo que permitió la interpretación, medición y agrupación de figuras canaliformes presentes en cada una de las tres secuencias.

Se describieron 12 secciones delgadas de testigos de impacto, extraídos de los niveles con alto GR que conforman los límites de las secuencias.

Se interpretaron 6 imágenes micro-resistivas de pozo sobre las que se midieron paleocorrientes y se determinó textura y estructura de los reservorios. Se incorporó el análisis sedimentológico de 1 testigo corona extraído en un intervalo reservorio.

Se realizó el análisis cinemático para las fallas presentes en el yacimiento de acuerdo con el método de Morley *et al.* (2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se reconocieron tres secuencias de entre 20 m y 35 m de espesor que, en conjunto, conforman aproximadamente los 80m basales de la Fm. Bajo Barreal. A esta sección se la conoce informalmente como “Sección Tobácea”. Cada una de las secuencias está determinada por un patrón de variación aserrado, con tendencia creciente o decreciente, entre dos máximos relativos en la curva de GR.

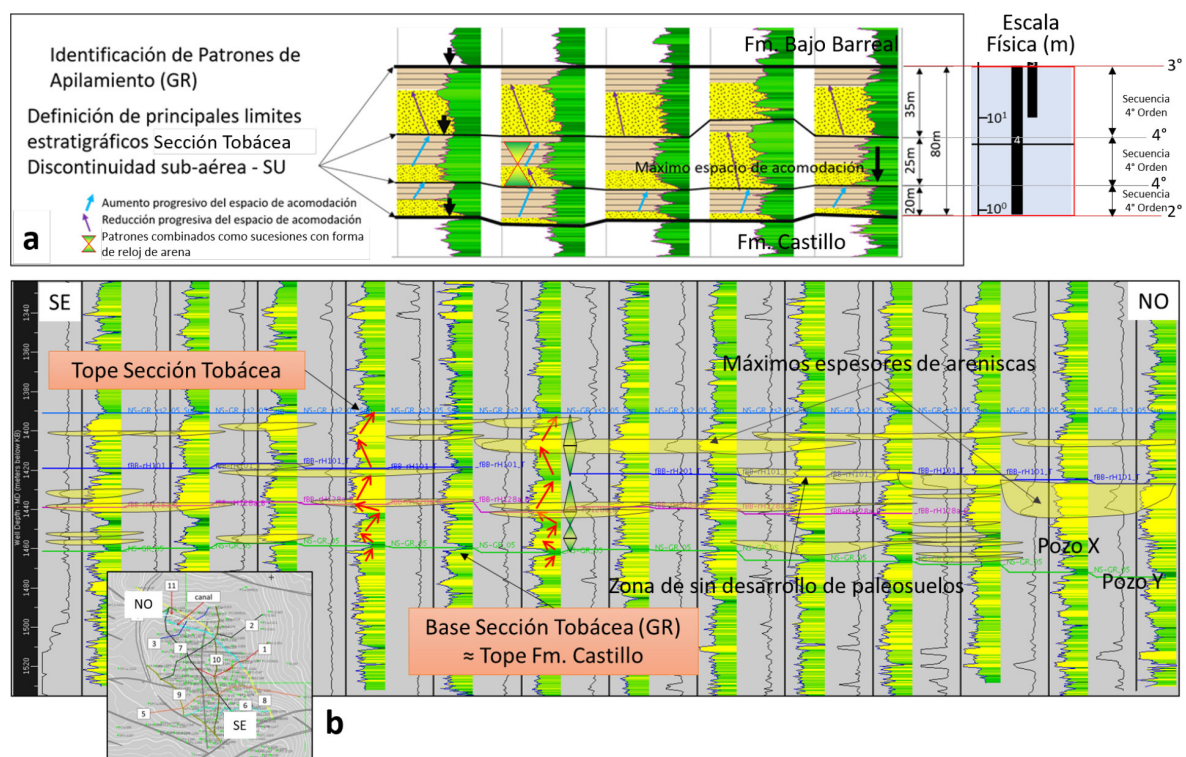


Figura 4. a- Perfiles de GR a pozo abierto. Correlación de valores máximos de GR como líneas temporales entre pozos del yacimiento, Cambios de patrones de apilamiento Gamma entre aumento del espacio de acomodación (flechas celestes) y reducción progresiva del espacio de acomodación (flechas negras). Límites de secuencias de 2°, 3° y 4° orden descritas por Rodríguez *et al.* (2022). Nótese que el límite inferior de la sección tobácea corresponde al límite entre las Formaciones Castillo y Bajo Barreal. b-Sección NO-SE y correlación entre pozos con definición del tope y base de la sección tobácea por correlación de intervalos de máximos de GR como de líneas de tiempo. Flechas rojas para reconocer las tendencias en la curva de GR y su consistencia en el espacio, y expresión de ciclos de alto y bajo espacio de acomodación de GR con formato “reloj de arena”. Se resalta la distribución espacial de los principales reservorios para cada una de las secuencias. Pozos X e Y con reservorios de espesor mayor de 9m.

De esta forma, se observó un apilamiento de intervalos con altos valores relativos de GR, que gradan a valores bajos, seguidos de intervalos con comportamiento inverso. De forma preliminar, cada uno de los ciclos completos entre dos máximos de variación de GR, que se presentan en un arreglo tipo “reloj de arena”, fueron interpretados como secuencias compuestas de “*systems tracts*” (Catuneanu, 2019 *sensu stricto*), de bajo y alto espacio de acomodación (Figs. 4a, 4b). Las zonas con valores máximos relativos de GR están presentes en la mayoría de los sondeos perforados en el área, facilitando la correlación.

Las descripciones de las secciones delgadas de los niveles del alto GR corresponden, en todos los casos, a sedimentitas de grano muy fino en las que destaca la abundante participación de material piroclástico (con abundantes trizas) y la arcilla derivada principalmente como producto

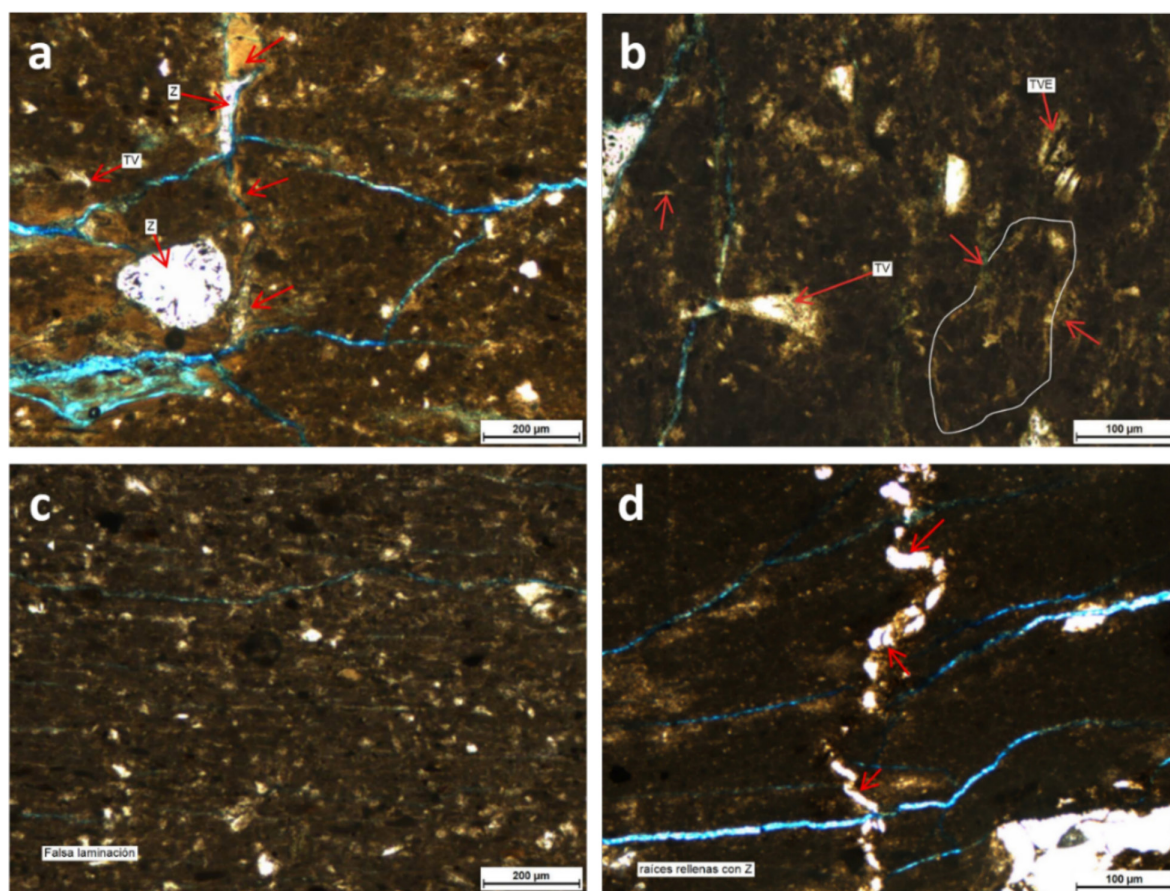


Figura 5. a- Microestructuras presentes en los niveles tobáceos: canales sub-verticales (reellenos por arcillas (flechas rojas) y localmente mineral isótropo (Z, zeolita?). Además, obsérvese poro de unos 200 micrones de diámetro con microestructura de relleno probablemente correspondientes a zeolitas (Z). Presencia de sombras de trizas vítreas (TV). b- Microfotografía mostrando los bordes (trazo en blanco) de un fragmento pumíceo de unos 230 micrones de diámetro. Restos de trizas (TV) y trizas con texturas eutaxíticas (TVE). c- Pseudolaminación producida por el aplastamiento de trizas vítreas y fragmentos pumíceos con ejes paralelos a los planos de estratificación. d- Canales verticales, probables pedotúbulos (flechas), reellenos por material isótropo (zeolita?). Nícoles paralelos.

de la alteración de fragmentos piroclásticos. En climas húmedos el vidrio se meteoriza con rapidez, especialmente cuando se presenta en partículas finas (ceniza/trizas volcánicas) (Giménez, J. E. 2020). La combinación con microestructuras, pedotúbulos, estructuras de rellenos, poros fuera de tamaño (oquedades), localmente textura decusada de arcillas y canales sub-verticales descriptos en estas muestras, sugiere el desarrollo de paleosuelos en estos intervalos (Fig. 5).

La caracterización y entendimiento de los sistemas fluviales usualmente se enfoca al estudio de litologías de grano grueso, por su condición de rocas reservorio, tanto de hidrocarburos como de agua. No obstante, los tipos y grado de desarrollo de paleosuelos y su arreglo lateral y vertical en una sucesión fluvial, al igual que los sistemas fluviales propiamente dichos, responden a la combinación de factores autocíclicos y alocíclicos Varela *et al.* (2021). Las variaciones de alta frecuencia se atribuyen a procesos autocíclicos como avulsión o la migración lateral de canales Varela *et al.* 2012, mientras los arreglos de baja frecuencia están controlados por factores alocíclicos como la tectónica y/o variaciones eustáticas y/o climáticas (Wright y Marriott 1993; Legarreta *et al.* 1993).

La variación en la intensidad y en la frecuencia de caída de cenizas volcánicas parece ser el factor alocíclico que controla la evolución de la arquitectura del sistema fluvial en la región y el desarrollo y madurez de paleosuelos. La combinación del material original que conforma el sustrato, el tipo de relieve, el clima y la vegetación, junto con el tiempo son factores determinantes para el tipo de suelo que se formará Wilson (2019). Cualquiera sea el periodo de tiempo de exposición sub-aérea, el terreno sobre el que se formaron estos suelos constituye una discontinuidad sub-aérea (límites de secuencias en Figs. 4a, 4b), representa superficies geológicamente significativas, y como tal, tiene carácter de línea temporal cumpliendo los requisitos para conformar límites para cada una de las secuencias (Mitchum Jr. *et al.* 1977).

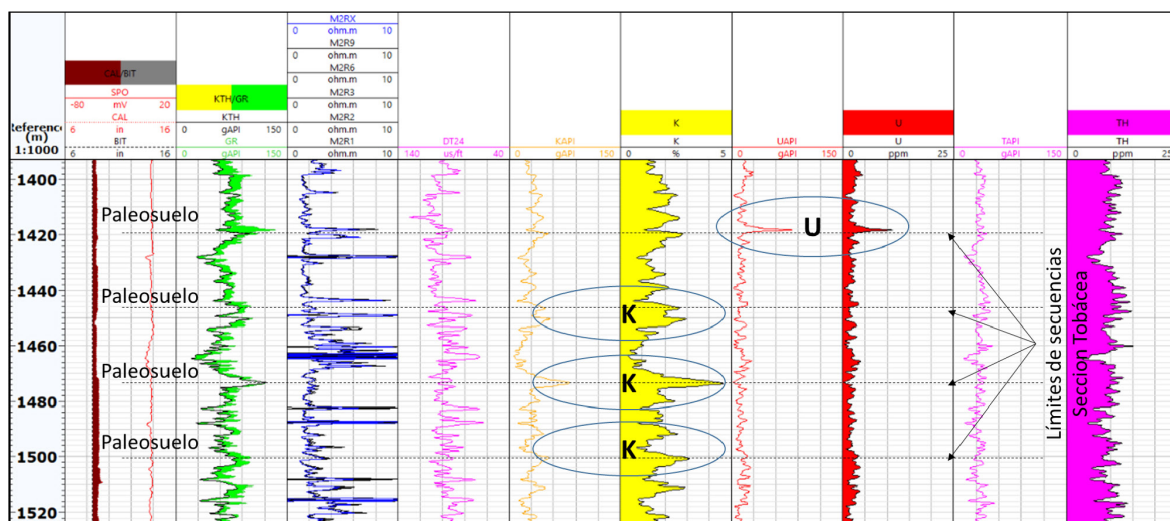


Figura 6. Esquema con agrupación de perfiles de rayos gamma, resistividad y espectros de radiactividad separados entre señal de Potasio (K), Uranio (U) y Torio (Th) en API, % y/o ppm. Máximos de GR controlados por la presencia mayoritaria de K y U.

Por lo general, altos valores de GR se asocian a litologías de grano fino, principalmente debido a la abundancia relativa de potasio en illita y/o por la adsorción de Torio (Th), Uranio (U) y/o Potasio (K), en la superficie de minerales arcillosos, vegetación o en materia orgánica en ambientes reductores (Rider 1990, 1999). En el caso de SPC-PC, habiendo previamente asociado los máximos de GR con la presencia de paleosuelos, se confirman, para estos mismos intervalos, altos valores relativos de Potasio y Uranio como variables dominantes en la generación de la respuesta del perfil de rayos gamma (Fig. 6).

La exposición subaérea y condiciones estables, necesarias para el desarrollo de suelos habrían ocurrido en momentos de mínima caída de cenizas, con disminución o interrupción de la agradación de las llanuras de inundación, interfluvios y los rellenos de canal. Por lo general, el desarrollo lateral de estos paleosuelos es de carácter regional, solo viéndose interrumpidos en posición donde la red de drenaje se mantuvo activa (Fig. 4b – Zona sin desarrollo de suelos por presencia de canales fluviales). En la misma figura 4b se esquematiza la continuidad lateral de los niveles correspondientes a paleosuelos, los cuales se correlacionan en la mayoría de los pozos perforados, no solo en SPC-PC, sino también en los bloques MS y LH. De la misma manera, los límites de secuencia a tope y base de la Sección Tobácea, tienen representación propia en la información sísmica (Fig. 7), y al igual que con la información de pozo, han sido interpretados a lo largo de las cuatro áreas de concesión.

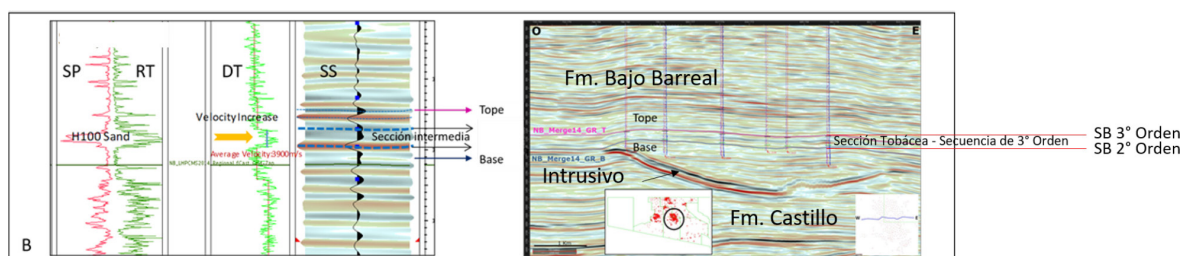


Figura 7. Expresión del intervalo rH100 en perfiles de potencial espontáneo (SP), Resistividad (RT), lentitud de ondas compresionales (DT) y sismograma sintético (SS). Línea sísmica arbitraria con interpretación de horizontes sísmicos a tope y Base de la secuencia como líneas temporales y límites de secuencia de 3° orden, interpretados a lo largo de todo el yacimiento (modificado de Lema *et al.* 2018).

El muestreo de cortes horizontales sobre cada cubo de atributos sísmicos, (saltos de entre 2 ms y 4 ms), (Fig. 8), permitió la identificación e interpretación de múltiples figuras canaliformes distribuidas a lo largo de las 4 áreas estudiadas (Fig. 9). Por lo general, las figuras interpretadas tienen orientación S-N variando preferencialmente a lineaciones NO-SE hacia el sur del bloque LH. En promedio, el ancho de las figuras es de 200 m con extremos de 50 m y 700 m.

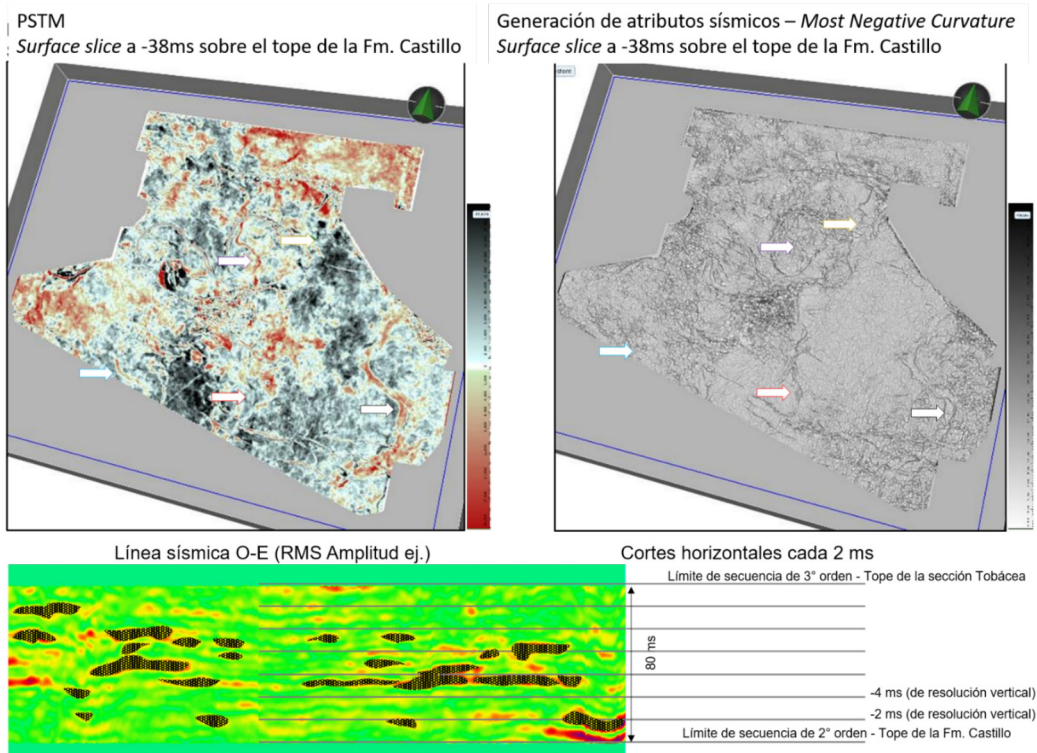


Figura 8. Vista en perspectiva de del time slide -38ms sobre el tope de las Fm. Castillo sobre los cubos de horizontalizados de amplitudes PSTM y de curvatura. Flechas blancas señalando algunas de las figuras canalizadas identificadas. Línea sísmica O-E ilustrativa de la resolución vertical asignada para cada uno de los cubos de atributos sísmicos. Espesor sísmico total del intervalo de 80 ms con muestreo entre 2 y 4 ms.

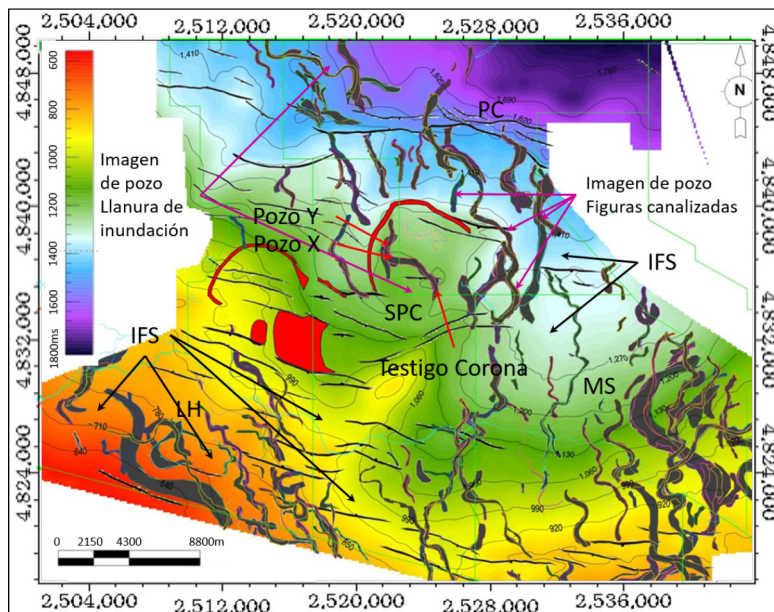


Figura 9. Mapa estructural en tiempo al tope de la sección tobácea. Polígonos con orientación preferencial ONO-ESE, correspondientes trazas de fallas. Figuras canaliformes orientadas S-N y NO-SE, identificadas mediante interpretación de la información sísmica del campo (polígonos grises sinuosos de anchos variables). Áreas con flexuras debido a la intrusión de lopolitos (polígonos en rojo). Ubicación de testigo corona e imágenes resistivas de pozos dentro y fuera de las figuras canalizadas. ITF- Interfluvios sísmicos.

A partir de la información provista por los sondeos perforados en el bloque, se confirma la presencia de depósitos arenosos tanto dentro como fuera de las figuras canalizadas. La principal diferencia entre estos depósitos está dada por su espesor, ya que dentro de las figuras canalizadas alcanzan a desarrollar espesores que varían entre 8 m y 25 m mientras que, por fuera, los depósitos promedian los 3 m de espesor y nunca superan los 9 m de espesor (Fig. 10). La visualización sísmica de las figuras canalizadas de mayor espesor (canales principales) y la dificultad de identificación de estas figuras en zonas de interfluvios (Fig. 9 - ITF), podría deberse a que sus espesores están por debajo de la resolución sísmica.

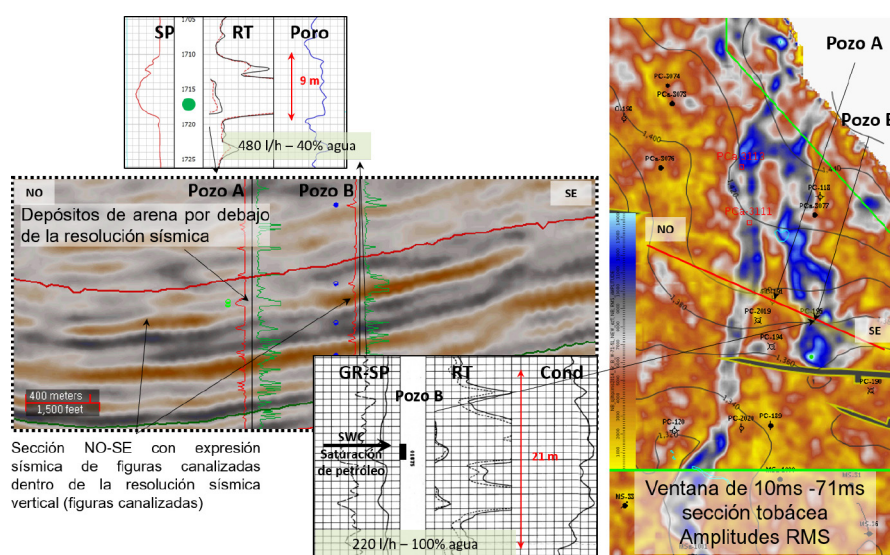


Figura 10. Sección sísmica NO-SE sobre mapa de extracción de amplitudes RMS donde se visualizan figuras canalizadas en intervalo superior sección tobácea. Comparación entre espesores de reservorios atravesados fuera y dentro de las figuras sísmicas canalizadas (pozos A y B respectivamente).

El espesor y el tamaño de grano de los depósitos de desborde debería reducirse con la distancia a los canales principales. Sin embargo, estas son características de difícil comprobación por la baja densidad de datos disponibles (pozos distanciados 300 m en promedio). No obstante, este punto constituye un aspecto sobre el cual profundizar para un mejor entendimiento del modelo de depositación del intervalo analizado. Con este objetivo, mediante la interpretación de imágenes de pozo, se han medido direcciones de paleo-corrientes dentro y fuera del ámbito de las figuras canalizadas. Los valores presentan una amplia dispersión, hasta representar direcciones de flujo diametralmente opuestas (Sur a Norte, Oeste-Este y viceversa). La señal de Macizo del Deseado en la composición mineralógica de las areniscas (Limarino y Giordano 2016a y 2016b), indicaría una dirección de paleo flujo aproximada S-N. Ya sea por la baja densidad de datos o por la naturaleza desconocida de los mecanismos de generación de derrames (difusión o advección) (Adams *et al.* 2004), no será sencillo establecer una relación directa entre los diferentes elementos del sistema fluvial.

Empíricamente, se ha comprobado que todos los sondeos atraviesan facies de reservorio en esta sección de la columna. Los depósitos de canal de menores dimensiones se encuentran dispuestos “aleatoriamente” a lo largo del espesor de cada una de las tres secuencias, mientras que las figuras canalizadas tienden a desarrollarse en las secciones media y superior de las mismas (Pozo X y Pozo Y en Fig. 4b).

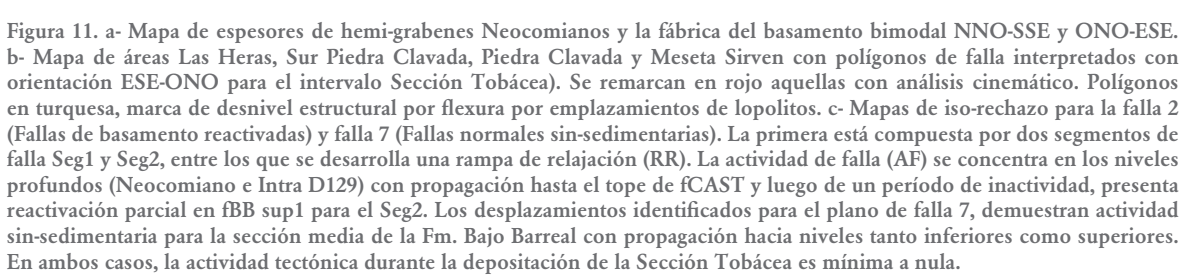
Factores de control sobre la red de drenaje

La dinámica de un ambiente de depositación está controlada por factores como la actividad tectónica, la eustasia, el clima, la glacio-isostasia, descarga fluvial, regímenes de viento o disponibilidad de sedimentos, sobrecarga de sedimentos y compactación, aunque la prevalencia de uno sobre otro varía de un caso de estudio a otro (Catuneanu 2019). Para la CGSJ, Paredes *et al.* (2018) y Rodríguez *et al.* (2022) proponen al proceso de caída de cenizas como potencial factor de influencia adicional sobre la arquitectura de secuencias fluviales en un contexto regional alejado de cualquier línea de costa.

Tectonismo

La reconstrucción del desplazamiento de las estructuras mediante análisis cinemático de fallas (Morley *et al.* 2007), posibilitó la identificación de diferentes periodos de actividad tectónica a lo largo de la historia geológica del yacimiento. La fábrica del basamento contiene dos familias de fallas con orientación bimodal NNO-SSE y ONO-ESE formadas durante el Jurásico medio-tardío vinculadas al desmembramiento de Gondwana y la apertura del Atlántico sur (Storey y Alabaster 1991). La orientación que presentan los hemigrábenes de edad Neocomiana (Fig. 2), está determinada por la fábrica del basamento (Fig. 11a).

Con la depositación del Grupo Chubut (en estadio *post-rift* → subsidencia termal, Fig. 2), se registran varias fases extensionales, que en ocasiones reutilizan las fallas previas (de basamento) o generan nuevas fallas con disposición preferencial ESE-ONO (Fig. 11b). Las fallas normales gravitacionales sin-sedimentarias reflejan varios episodios de extensión durante la depositación del Grupo Chubut, y de acuerdo con su orientación responderían a un campo de esfuerzos NNE-SSO (Foix *et al.* 2012); Paredes *et al.* 2013). Una visión generalizada sobre la actividad estructural en el área permite identificar una amplia variedad de lineamientos activos durante la depositación de la Fm. Pozo D129 y Bajo Barreal superior, pero con desplazamiento mínimos a nulos para Bajo Barreal inferior y la Fm. Castillo (Fig. 11c). Como consecuencia, durante la depositación del intervalo inferior de la Fm. Bajo Barreal – Sección Tobácea, no habría habido modificación del relieve de la región y, en consecuencia, tampoco de las redes de drenaje.



Es evidente que la actividad volcánica desempeña un rol en la modificación, en mayor o menor medida, de las condiciones climáticas de una región (Rampino y Self 1992; Stuiver *et al.* 1995;

Aún no son claros los efectos de la actividad volcánica sobre el clima o si hubo variaciones climáticas durante la depositación de la Sección Tobácea. Discernir los efectos del control climático sobre las redes de drenaje que caracterizan a esta unidad, implica la realización de estudios adicionales que permitan identificar potenciales variaciones cíclicas del clima que permita explicar los patrones observados en el arreglo de las secuencias.

Disponibilidad de sedimentos

La alternancia de aporte de material piroclástico habría controlado el tipo de sistemas de drenaje, la composición y granulometría del material transportado y depositado y la arquitectura y ciclicidad de las secuencias descriptas.

Los estadios de mayor actividad volcánica se relacionan con depósitos de flujos de detritos hiper-concentrados (Paredes 2005). Los eventos de ríos entrelazados someros multi-canalizados de baja sinuosidad habrían generado cuerpos amalgamados multi-laterales de características petrofísicas regulares a malas. Por otro lado, el relleno de los canales correspondientes a los rasgos canaliformes identificados en el dato sísmico, responde a una alternancia de niveles de clastos extra-cuencas con participación variable de intra-clastos, según se hayan depositado en etapas

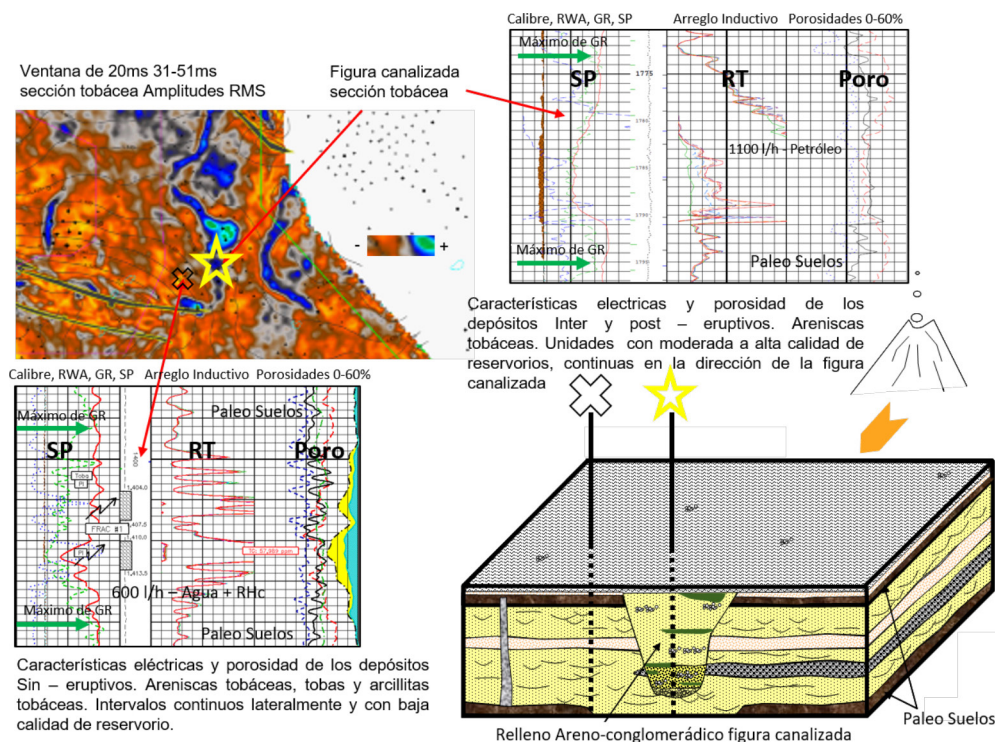


Figura 12. Mapa de extracción de amplitudes ventana de 31 a 51ms por encima del tope de la Fm. Castillo (sector centro-Este del campo Piedra Clavada). Características eléctricas y variación espesores y de propiedades petrofísicas cualitativas para unidades de areniscas atravesadas por sondeos, dentro y fuera de las trazas de las figuras canalizadas.

dominantemente inter o sin eruptivas respectivamente (Limarino *et al.* 2017). Aún con variaciones significativas, la calidad petrofísica de estos depósitos se ve incrementada en relación con los depósitos lindantes y externos de las figuras canalizadas (Rodríguez *et al.* 2011) (Fig. 12).

La interpretación de imágenes resistivas de pozo confirma las estimaciones de la Limarino *et al.* (2017). Se describieron intervalos principalmente de canales multi-episódicos y con facies eléctricas de abandonos de canal poco representadas. Las bases son principalmente erosivas, aunque en ocasiones se desarrollan con contacto neto, no siendo frecuente la identificación de estructuras de carga. Las estratificaciones más frecuentes son de tipo entrecruzada planar y en artesa de mediana a baja energía y se ubican con mayor frecuencia en las porciones medias y media superior del conjunto arenoso. En las secciones inferiores de los depósitos de canal, las facies son principalmente masivas, aunque en ocasiones se observa tenue estratificación paralela de alta energía. La granulometría de relleno de canal es arenosa y con menor frecuencia conglomerados finos.

En las facies de imagen correspondientes a planicie de inundación proximal, con frecuencia se presenta una alternancia rítmica de areniscas fangosas, conservando dirección de estructuras del depósito subyacente. De la misma manera, las muestras de roca tomadas de las unidades que colmatan la principal figura canalizada del bloque SPC (Fig. 9 – testigo corona), confirman la presencia de areniscas medianas y gruesas y conglomerados con estratificación entrecruzada tabular planar y en artesa con eventuales intercalaciones de fangolitas con diferente intensidad de bioturbación.

Modelo genético conceptual

La participación de material piroclástico de caída constituye un factor de control alóctono en la dinámica fluvial. El aporte súbito en exceso de estos materiales produce la “dilución mineralógica” simultánea con el aumento de la carga promedio básica del sistema fluvial, tanto en el lecho como en suspensión, y como tal, debe traducirse en la expresión de la organización o reorganización de la red de drenaje (Umazano *et al.* 2014, Paredes *et al.* 2019).

Rodríguez *et al.* (2011) adoptaron un modelo de depositación explicativo para estas secuencias en el que se contemplan episodios sin-eruptivos e inter-eruptivos. La alta tasa de aporte de sedimentos en forma de caída de cenizas se expresa en la somerización y ensanchamiento de las fajas de canales (Fig. 12 - facies atravesadas fuera de las figuras canalizadas). En etapas de desaceleración o interrupción del proceso eruptivo, se reorganizaría el sistema fluvial, desarrollando eventuales valles incisos (Fig. 12 - facies atravesadas dentro de las figuras canalizadas), que finalmente se reconocen como las figuras canalizadas características de la Sección Tobácea.

Los resultados del presente trabajo permiten proponer un modelo alternativo. En periodos de alto aporte de material piroclástico, tanto fajas de canales como planicies de inundación e

interfluvios experimentaron agradación. Las relaciones entre variaciones en la tasa de agradación controla la frecuencia de episodios de desborde (Heller *et al.* 2015). La naturaleza del material piroclástico contribuye al aumento de cohesividad de las llanuras de inundación acompañado de una consecuente reducción en la tasa de avulsión y a una mayor permanencia de los cursos en su posición original (Herrera *et al.* 2007). Como resultado, se habría reducido la frecuencia en la que se alcanza el nivel de los depósitos de desborde y de la propia llanura de inundación (Heller y Paola, 1996). Los episodios de desborde habrían dado origen a cuerpos arenosos de poco espesor que estarían por debajo de la resolución sísmica pero que podrían contribuir a una mayor conectividad areal y vertical entre depósitos permeables.

Las imágenes de figuras canalizadas de las figuras 9, 10 y 12, se disponen como canales únicos sin evidencias de puntos nodales a partir de las cuales inferir zonas de avulsión. De esto último se desprende que aun cuando la tasa de agradación dentro de las fajas de canales pudiera haber superado a la tasa de agradación de la llanura de inundación, con la consecuente generación de eventuales depósitos de desborde, la avulsión de los canales fluviales principales que drenaron el área durante la depositación de la Sección Tobácea fue prácticamente nula.

Las condiciones de estabilidad, durante los momentos de desaceleración o interrupción de caída de cenizas, fueron favorables para el desarrollo de suelos. Estos mismos suelos representan intervalos de líneas de tiempo que funcionan efectivamente como los límites de cada una de las tres secuencias identificadas.

CONCLUSIONES

A las preguntas planteadas: ¿Es razonable desde el modelo geológico, prospectar bloques análogos en la región que contengan estos reservorios de alta productividad? ¿Es esperable la ocurrencia de estos reservorios en bloques aledaños a SPC-PC? Los resultados de este trabajo aportan elementos para una respuesta afirmativa.

La correlación de detalle de la curva de rayos gamma permitió confirmar la presencia de niveles recurrentes de valores de máximos relativos de GR. Estos presentan distribución regional y constituyen niveles geológica y estratigráficamente significativos ya que litológicamente, consisten en paleosuelos y como tales representan líneas de tiempo y pueden funcionar como límites de secuencias. Cada secuencia se desarrolla entre dos máximos relativos en la curva de GR. Internamente, los valores de GR gradan desde un máximo, a valores bajos, para volver a crecer hasta alcanzar el próximo máximo relativo. La sección tobácea queda así dividida en 3 secuencias de entre 20 m y 35 m de espesor que constituyen un marco marco estratigráfico secuencial de alta resolución para el yacimiento SPC-PC. La expresión sísmica de los límites superior e inferior para el conjunto de las tres secuencias posibilitó extrapolar regionalmente el modelo.

Mediante la interpretación de un conjunto de atributos sísmicos, se identificó la ubicación de múltiples figuras canaliformes que constituyen los principales objetivos para el desarrollo de la región.

La escasa a nula actividad tectónica documentada durante la depositación de la sección inferior de la Fm. Bajo, descarta la modificación del relieve por este factor, como el principal control sobre las redes de drenaje. La abundancia de material piroclástico en la sección tobácea plantea la posibilidad del impacto de la actividad volcánica sobre el clima de la región y por lo tanto en el diseño las redes de drenaje. Sin embargo, se requieren estudios adicionales que permitan explicar la relación entre potenciales variaciones cíclicas del clima y los patrones observados en el arreglo de las secuencias.

La caída de cenizas debería ser considerada como potencial factor de control sobre la arquitectura sedimentaria de esta sección en todos los yacimientos de la región, ya que la agradación de la llanura de inundación por la acumulación de este material alóctono habría mantenido estable la posición de los cursos de agua posibilitando el desarrollo de depósitos de arenas de gran espesor (hasta 25 m de espesor).

La combinación del marco conceptual estratigráfico (extrapolable regionalmente), junto con la identificación de los reservorios contenidos por las figuras canalizadas, ha sido y continúa siendo el pilar fundamental para la expansión del desarrollo hacia zonas alejadas de campos ya maduros en las áreas de concesión Piedra Clavada, Sur Piedra Clavada, Las Heras y Meseta Sirven.

REFERENCIAS CITADAS

- Adams, P. N., Slingerland, R. L., Smith, N. D., 2004. Variations in natural levee morphology in anastomosed channel flood plain complexes. En ELSEVIER eds., *Geomorphology*, v.61, p. 127-142.
- Acuña, C., Schiuma, A., Parra, D., Droeven, C., Bernedo, M., Paredes, J.M., 2011. Modelo paleoambiental de la Formación Mina del Carmen en el Yacimiento Cerro Dragón, Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. In: VIII Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, Mar del Plata, p. 419-439.
- Archangelsky, S., Bellosi, E. S., Jalfin, G. A., Perrot, C., 1994. Palynology and alluvial facies from the mid-Cretaceous of Patagonia, subsurface of San Jorge Basin, Argentina. *Cretaceous Research*, v.15 (2), p.127-142.
- Barandica, M., Tejada Argañaraz, S., 2013. Visualización sísmica del paleodrenaje fluvial durante el Cretácico Superior en el bloque El Valle, Provincia de Santa Cruz, Argentina. *Primeras Jornadas de la Cuenca del Golfo San Jorge*, p. 25-26. Comodoro Rivadavia.
- Barreda, V., Archangelsky, S., 2006. The southernmost record of tropical pollen grain in mid-Cretaceous of Patagonia, Argentina. *Cretaceous Research*, v.27, p. 778-787.
- Catuneanu, O. 2006. Principles of sequence stratigraphy. Primera edición, Ed. ELSEVIER. p.387.
- Catuneanu, O. 2019. Model-independent sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews* 188, p. 312-388.

- Castillo Gamarra, F., Lema, M., Paredes, J. M., 2018. Spectral gamma-ray logging of Cerro Ballena Anticline, Santa Cruz province: date driven model for facies classification, with implication for subsurface oilfield development. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Evaluación de formaciones, CD ROM. Mendoza, p. 153-176, Argentina.
- Chelotti, L.A., 1997: Evolución tectónica de la Cuenca del Golfo San Jorge en el Cretácico y Terciario; algunas observaciones desde la interpretación sísmica. Boletín de Informaciones Petroleras, Buenos Aires, v.49, p. 62-82.
- Dal Corso, J., Gianolla, P., Newton, R.J., Franceschi, M., Roghi, G., Caggiati, M., Raucsik, B., Budai, T., Haas, J., Preto, N., 2015. Carbon isotope records reveal synchronicity between carbon cycle perturbation and the "Carnian Pluvial Event" in the Thetys realm (Late Triassic). Glob. Planet. Change 127, p. 79-90. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.013.
- Dal Corso, J., Gianolla, P., Rigo, M., Franceschi, M., Roghi, G., Mietto, P., Manfrin, S., Raucsik, B., Budai, T., Jenkyns, H. C., Reymond, C. E., Caggiati, M., Gattolin, G., Breda, A., Merico, A., Preto, N., 2018. Multiple negative carbon-isotope excursions during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic). Earth (2018), doi:10.1016/j.earscirev.2018.07.004.
- Dal Corso, J., Mietto, P., Newton, R. J., Pancost, R. D., Preto, N., Roghi, G., Wignall, P. B., 2014. Discovery of a major negative $\delta^{13}\text{C}$ spike in the Carnian (Late Triassic) linked to the eruption of Wrangellia flood basalts. The Geological Society of America - Geology 2012, v. 40, p. 79-82. doi: 10.1130/G32473.1..
- Embry, A.F., Johannessen, E.P., 1992. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic- Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. In: Vorren, T.O., Bergsager, E., Dahl-Stamnes, O.A., Holter, E., Johansen, B., Lie, E., Lund, T.B. (Eds.), Arctic Geology and Petroleum Potential. vol. 2. Norwegian Petroleum Society (NPF), pp. 121-146 (Special Publication).
- Ferreira, L., Santangelo, A., Georgieff, S. M., 2011. Modelo geológico para la Fm. Bajo Barreal (Cretácico): integración y optimización entre datos de superficie y subsuelo. Cuenca del Golfo San Jorge, provincia de Santa Cruz, Argentina. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, p. 327-352.
- Feruglio, E. 1950, Descripción geológica de la Patagonia: Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales, vol. 3: 431 p. Buenos Aires.
- Figari, E., Strelkov, E., Laffitte, G., Cid de la Paz, M.S., Courtade, S.F., Celaya, J., Vottero, A., Lafourcade, P., Martínez, R., y Villar, H. J., 1999. Los sistemas petroleros de la Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica. 4° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas 1: 197-237. Mar de Plata, Argentina.
- Figari, E., Strelkov, E., Cid de la Paz, M., Celaya, J., Laffitte, G., Villar, H., 2002. Cuenca del Golfo San Jorge: Síntesis estructural, estratigráfica y geoquímica, en: M. J. Haller (ed.), Geología y Recursos Naturales de Santa Cruz. Relatorio del 15° Congreso Geológico Argentino, v. 3, p. 571-601, El Calafate.
- Fitzgerald, M., Mitchum Jr. R., Uliana, M. A., Biddle, K., 1990. Evolution of the San Jorge Basin American Association Petroleum Geologists, Bulletin, vol. 74: 879-920.

- Foix, N., Paredes, J.M., Giacosa, R.E., 2012. Upper Cretaceous-Paleocene extensional phase in the Golfo San Jorge basin (Argentina): growth-fault model, paleoseismicity and paleostress analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, v 33 (1), p.110-118.
- Gianni, G.M., Echaurren, A., Fennell, L., Navarrete, C., Quezada, P., Tobal, J., Giménez, M., Dávila, F.M. y Folguera, A., 2018. Cretaceous Orogeny and Marine Transgression in the Southern Central and Northern Patagonian Andes: Aftermath of a Large-Scale Flat-Subduction Event? En Folguera, A., Contreras Reyes, E., Heredia, N., Encinas, A., Iannelli, S., Oliveros, V., Dávila, F., Collo, G., Giambiagi, L., Maksymowicz, A., Iglesia Llanos, M. P., Turienzo, M., Naipauer, M., Orts, D., Litvak, V. D., Alvarez, O., Arriagada, C. (eds.) *The evolution of the Chilean-Argentinian Andes*, Chapter 12, Springer Earth System Sciences, pp. 291-328.
- Giménez, J. E., 2020. Características y clasificación de suelos volcánicos. *Suelos y vulcanismo: Argentina / Adriana Mehl et al.; editado por Perla Imbellone; Osvaldo Andrés Barbosa- 1a ed.- Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo -AACS, 2020. Libro digital, PDF - ISBN 978-987-46870-2-9. Capítulo 2, pp. 33-69.*
- Hechem, J.J., Homovc, J.F. y Figari, E.G., 1990. Estratigrafía del Chubutiano (Cretácico) en la Sierra de San Bernardo, Cuenca del Golfo San Jorge, Chubut, Argentina. *XI Congreso Geológico Argentino*, Ac. 3: 173-176.
- Heller, P.L., Paola, C., 1996. Downstream changes in alluvial architecture: an exploration of controls on channel-stacking patterns: *Journal of Sedimentary Research*, 66: 297-306.
- Heller, P. L., Ratigan, D., Trampush, S., Noda, A., Mcelroy, B., Drever, J. y Huzurbazar, S., 2015. Origins of bimodal stratigraphy in fluvial deposits: an example from the Morrison Formation (Upper Jurassic), Western U.S.A.. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, v. 85, pp. 1466-1477 - Research Article DOI: <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2015.93>.
- Herrera, M.C., Lizcano, A., Santanmarina, J.C., 2007. Colombian volcanic ash soils, in Tan, T.S., Phoon, K.K., Hight, D.W., and Leroueil, S., (Eds.), *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, Volume 3: London, Taylor & Francis, p. 2385-2409.
- Heslop, A., 1974. "Gamma-ray Log Response Of Shaly Sandstones." *The Log Analyst* 15 pp.16-21.
- Jalfin, G.A., Bellosi, E., Zanagua, J., Villar, H., 2000. Procesos múltiples de migración, alteración y mezcla en petróleos de la Cuenca del Golfo San Jorge: Una evolución geoquímica integrada. *IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, Actas 1:445-465. Mar del Plata, Argentina.
- Larson, R. L., Pitman, W. C., 1972. World-wide correlation of Mesozoic magnetic anomalies and its implications: *Geological Society of America Bulletin*, vol. 83: 3645-3662.
- Legarreta, L., Uliana, M., Larotonda, C.A., Meconi, G.R., 1993. Approaches to nonmarine sequence stratigraphy - theoretical models and examples from Argentine basins. In: Eschard, R., Doliez, B. (Eds.), *Subsurface Reservoir Characterization from Outcrop Observations. Collection Colloques et Séminaires*, v. 51. Editions Technip, p. 125-145, Paris.
- Lema, M., Bufaliza, N., Sandoval, N., Tejada, S., 2018. An integrated workflow to reconstruct cretaceous fluvial paleo morphology in San Jorge basin, Argentina.

- Landmark Innovation Forum & Expo, LIFE2018, Houston-Texas, United State of America.
- Lenge, D., Galarza, A., 2005. Detección de rasgos fluviales en el flanco sur de la Cuenca del Golfo San Jorge. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata, p. 195-206, Argentina.
- Lesta, P. 1968. Estratigrafía de la Cuenca del Golfo San Jorge. III Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 1: 251-280. Buenos Aires.
- Limarino, C. O. Giordano, S. R., 2016a. Análisis de modas detríticas de areniscas: Identificando múltiples áreas de proveniencia en el Flanco sur de la Cuenca del Golfo San Jorge. 2° Jornadas de Geología de la Cuenca del Golfo San Jorge, Libro de resúmenes 60-61. Comodoro Rivadavia, Argentina.
- Limarino, C., Giordano, S. R., 2016b. Unraveling multiple provenance areas using sandstone petrofacies and geochemistry: An example in the southern flank of the Golfo San Jorge Basin (Patagonia, Argentina). En ELSEVIER eds. Journal of South American Earth Sciences v.66, p.208-231.
- Limarino, C., O, Giordano, S. R., Rodriguez Albertani, R., 2017. Diagenetic model of the Bajo Barreal Formation (Cretaceous) in the Southern Flank of the Golfo San Jorge Basin (Patagonia, Argentina). Marine and Petroleum Geology, Ed. ELSEVIER, v. 88, p.907-931.
- Mancuso, A. C., Benavente, C. A., Irmis, R. B., Mundil, R., 2020. Evidence for the Carnian Pluvial Episode in Gondwana: New multiproxy climate records and their bearing on early dinosaur diversification. Gondwana Research. Ed. ELSEVIER v. 86, pp. 104-125.
- Mitchum Jr., R.M., Vail, P.R., Thompson III, S., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: Payton, C.E. (Ed.), Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, vol. 26. pp. 53-62.
- Morley, C.K., Gabdi, S., Seusutthiya, K., 2007. Fault superimposition and linkage resulting from stress changes during rifting: examples from 3D seismic data, Phitsanulok Basin, Thailand. Journal of Structural Geology 29, 646-663.
- Paredes, J. M., 2005. Análisis paleo-ambiental de la formación Castillo en el ámbito de la Sierra de San Bernardo. REPSOL-YPF. Trabajo inédito.
- Paredes, J. M., Blanco Dufau, P., Giordano, M., 2019. A modern analog for meandering rivers of the Mina del Carmen Formation (Albian) at Cañadón Seco oilfield, Golfo San Jorge Basin, Patagonia. En ELSEVIER eds. Journal of South American Earth Sciences, v. 95 p.14.
- Paredes, J. M., Giordano, S. R., Olazábal, S.X., Valle, M. N., Allard, J. O., Foix, N., Tunik, M. A., 2020. Climatic control on stacking and connectivity of fluvial successions: Upper Cretaceous Bajo Barreal Formation of the Golfo San Jorge basin, Patagonia. Marine and Petroleum Geology v. 113, pp.20.
- Paredes, J. M., Giordano, S. R., Valle, M. N., Allard, J. O., Foix, N., 2018. Spectral gamma-ray logging of Cerro Ballena Anticline, Santa Cruz province: an outcrop analogue to subsurface characterization and well-log correlation of fluvial sandstone reservoirs. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Evaluación de formaciones, CD ROM. Mendoza, p. 189-206, Argentina.
- Paredes, S. Plazibat, C. Crovetto, J.E. Stein, E. Cayo

- y A. Schiuma, 2013. Fault kinematics and depocentre evolution of oil-bearing, continental successions of the Mina del Carmen Formation (Albian) in the Golfo San Jorge basin, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, v.46, p.63-79.
- Paredes, J. M., Valle, M. N., Olazábal, S. X., Giordano, S. R., Foix, N., Allard, J. O., Tunik, M. A., 2022. Clima, apilamiento y conectividad en sucesiones fluviales: el anticlinal del Cerro Balena (Santa Cruz, Argentina). En Ed. Nicolas Foix, Asociación Geológica Argentina, Actas del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología de la Cuenca del Golfo San Jorge, Puerto Madryn-Chubut, pp. 1541-1542.
- Rampino, M. R., Self, S., 1992. Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba supereruption. *Nature Publishing Group*, v. 359, p. 49-52.
- Rider, M.H., 1990. Gamma-ray log shape used as a facies indicator: critical analysis of an oversimplified method. In: Hurst, A., Lovell, M.A., Morton, A.C. (Eds.), *Geological application of wireline logs: Geological Society of London Special Publication*, 48: 27-37. London.
- Rider, M.H., 1999. *The Geological Interpretation of Well Logs*. Whittles Publishing Services, Dunbeath.
- Rodriguez, R. J., P. A. Caprioglio, M. L. Loss y H. D. Aguirre, 2011. Caracterización de reservorios y modelo estático. Delineando un yacimiento complejo. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mar del Plata), CD ROM, p: 443-467.
- Rodriguez, R., Lema, M., Sandoval, N., Bufaliza, N., Limarino, O., 2022. Secuencias de 3° y 4° orden en la sección inferior de la Formación Bajo Barreal. Un Marco “model-independent” para un modelo de alcance regional. En Ed. Nicolas Foix, Asociación Geológica Argentina, Actas del XXI Congreso Geológico Argentino, Geología de la Cuenca del Golfo San Jorge, Puerto Madryn-Chubut, p. 2.
- Salomone, G., Biocca, M.I., Amoroso, A., Arocena, J.C., Ronanduan, G., Guerbeloff, D., Palacio, L., Giordano, S.R., Rodríguez, R.J., Limarino, C.O., Bufaliza, N., Caprioglio, P.A., Irigoyen, M., Niccoló, L., Suriano, C., Paredes, J.M., 2018. Los Reservorios del Flanco Sur. En: “Rocas Reservorio de las cuencas productivas de la Argentina” 2° Ed., Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (Eds.), p. 217-262. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Buenos Aires.
- Sanagua, J., J. Hlebszevitch y F. Suarez, 2002. Los reservorios del flanco oeste. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Rocas reservorio de las cuencas productivas de la Argentina, Los reservorios del flanco sur, p175-198.
- Simms, M.J., Ruffell, A.H., 1989. Synchronicity of climatic change in the Late Triassic. *Geology* 17, 265-8.
- Storey, B. y T. Alabaster. 1991. Tectonomagmatic controls on Gondwana break-up: evidence from the proto-Pacific margin of Antarctica. *Tectonics*, 10: 1274-1288.
- Sylwan, C. A. 2001. Geología de la Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. *Journal of Iberian Geology*, vol. 27: 123-157.
- Stuiver, M., Grootes, P. M., Braziunas, T. F., 1995. The GISP2 18O Climate Record of the Past 165,00 Years and the Role of the Sun, Ocean, and Volcanoes. *Quaternary Research*, v. 44, pp.341-354.
- Sylwan, C. A., C. Droeven, J. Iñigo, F. Mussel y D.

- Padva, 2011. Cuenca del Golfo San Jorge. Simposio de Cuencas Argentinas, VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, Argentina. CD ROOM.
- Tandon, S.K., Sinha, R., 2007. Geology of large river systems. In: Gupta, A. (Ed.), Large Rivers: Geomorphology and Management. John Wiley & Sons, pp. 7–28.
- Teruggi, M. E. y H. Rosetto, 1963. Petrología del Chubutiano del Codo del Río Senguerr: Boletín de Informaciones Petroleras, vol. 354: 18-35.
- Umazano, A.M., Krause, J.M., Bellosi, E.S., Pérez, M. y Visconti, G., 2014. Modification of fluvial style in a volcanoclastic setting: an example from the Cretaceous Cerro Barcino Formation, Patagonia, Argentina. Actas 12° Reunión Argentina de Sedimentología, p.271-272, Puerto Madryn.
- Umazano, A. M., Melchor, R. N. y Bellosi, E. S. 2005. Paleoenvironmental analysis and architecture of sandstone bodies of the Bajo Barreal Formation (Cretaceous), Westrn San Jorge Basin, Argentina. 6° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajo Técnico, CD ROM. Mar del Plata, Argentina.
- Van Nieuwenhuise, D. S. y A. R. Ormiston, 1989. A model for the origin of source-rich lacustrine facies, San Jorge Basin, Argentina. 1° Congreso de Exploración y Producción de Hidrocarburos. Acta 2: 853-883. Mar del Plata, Argentina.
- Varela, A.N., Veiga, G.D., Poiré, D.G., 2012. Sequence stratigraphic analysis of Cenomanian greenhouse palaeosols: a case study from southern Patagonia, Argentina. *Sediment. Geol.* 271-272, p. 67–82.
- Varela, A. N., Yestes, L. M., Viseras, C., García-García, F y Moyano Paz, D. 2021. Implications of palaeosols in low net-to-gross fluvial architecture reconstruction: Reservoir analogues from Patagonia and Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 577. Ed. Elsevier B.V, p.13.
- Wilson, MJ. 2019. The importance of parent material in soil classification: a review in a historical context. *Catena* Vol. 182. Article 104131.
- Wright, V.P., Marriott, S.B., 1993. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage. *Sediment. Geol.*, v. 86, p. 203-210.