

EVIDENCIAS SÍSMICAS DE GEOFORMAS DELTAICAS CRETÁICAS: APLICACIÓN EN LA PROSPECCIÓN DE HIDROCARBUROS EN LA CUENCA DEL GOLFO SAN JORGE, ARGENTINA

Gastón Iovine Palafox¹, Leonor Ferreira¹, Ricardo Clavijo¹

1: YPF S.A., Av. Del Libertador N° 520, Comodoro Rivadavia, Chubut.

gaston.iovinepalafox@ypf.com, leonor.ferreira@ypf.com, rsclavijom@ypf.com

Palabras clave: Slices sísmicos, atributos, sistema deltaicos

ABSTRACT

Seismic evidence of Cretaceous deltaic landform: Application in oil exploration in Golfo San Jorge Basin, Argentina

The Chubut Group is the second sedimentary fill of the Golfo San Jorge basin, and it is conformed, from base to top, by Pozo D-129, Castillo, and Bajo Barreal formations. Major geomorphic aspects of deltaic systems were delineated along the transition section between Pozo D-129 and Castillo formations. Deltaic environments and sub-environments were defined using seismic amplitude slices and seismic attributes on different reference levels. Present day examples were used to compare dimensions, proportions, and component parts of the delta system. The paleo-flow directions were inferred by time thickness maps as reference, and 3D seismic *horizon slices*.

A "variable coast line" model was interpreted for the transition of the different sedimentary environments between Pozo D-129 and Castillo Formation. This model is associated to a dynamic sedimentation process which is the contraction and expansion of a lake system, varying the position of the shoreline in the timing involved. Present industry context favors the delineation of these fluvial-deltaic sandstones as new productive hydrocarbon reservoirs and the development of unconventional prospects from these fine deposits (mainly lacustrine mudstones and tuffs). Knowledge of the morphology and spatial distribution of these reservoirs may have direct applications on development projects, well pattern distribution, layer mapping, reserves incorporation, static and dynamic modeling and secondary recovery projects.

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el alto grado de madurez y desarrollo que presentan los reservorios clásicos de la Cuenca del Golfo San Jorge, como es el caso de la Formación Bajo Barreal y sus equivalentes laterales, es de suma importancia analizar el potencial de los reservorios profundos conocidos y poco explorados. La gran cantidad de pozos perforados en los yacimientos maduros de la cuenca, nos brinda información para generar modelos de distribución de facies fluviales mediante perfiles, *cutting* y coronas de pozo. Las dificultades se incrementan en la Formación Castillo por la menor cantidad de

pozos disponibles que atraviesan su sección. Es por esto, que el conocimiento del tipo de ambiente es de vital importancia para predecir la presencia de reservorios y su posible calidad petrofísica. En el caso de la Formación Castillo, su mayor profundidad y los altos contenidos de material piroclástico deteriora la calidad petrofísica de sus reservorios y dificultan la predicción en la distribución de fluidos, esto ha limitado su explotación, resultando en una etapa de desarrollo inmaduro.

Este estudio se centra principalmente en la visualización de *horizon slices* en cubos sísmicos 3D con procesos de migración *pre-stack*, entre los años 2004 y 2006, caracterizando y comparando geoformas de la base de la Formación Castillo con ejemplos actuales. Dichas geoformas son mencionadas por primera vez en esta contribución. Las geoformas analizadas para la base de dicha formación y el tope de la Formación Pozo D-129 (Solórzano *et al.* 2012), pueden enmarcarse en un modelo paleoambiental de sistemas deltaicos que permitiría predecir potenciales zonas favorables para la prospección de hidrocarburos.

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca del Golfo San Jorge es una cuenca de intraplaca en la región central de la Patagonia Argentina (Figura 1). Se encuentra limitada al Norte por el Macizo Nord-Patagónico y al Sur por el Macizo del Deseado. Por el Este un alto basamental impidió su conexión atlántica durante todo el Cretácico y por el Oeste a partir del aptiano se perdieron las conexiones pacíficas neocomianas al levantarse en bloque toda el área de la Sierra del Carril, conformada por un basamento metamórfico (Clavijo 1986). Es una cuenca extensional cuyo sistemas de fallas normales de orientación ONO-ESE vinculadas al proceso del *rifting* jurásico, han ejercido el control sedimentario de la columna cretácica, que incluye los principales intervalos productivos del Flanco Oeste: Formaciones Bajo Barreal y Castillo, ambas de origen fluvial.

Al tren estructural distensivo se sobre-impone una serie de esfuerzos transpresivos levógiros de dirección NNO-SSE, producto de la orogenia terciaria. Los principales anticlinales productivos

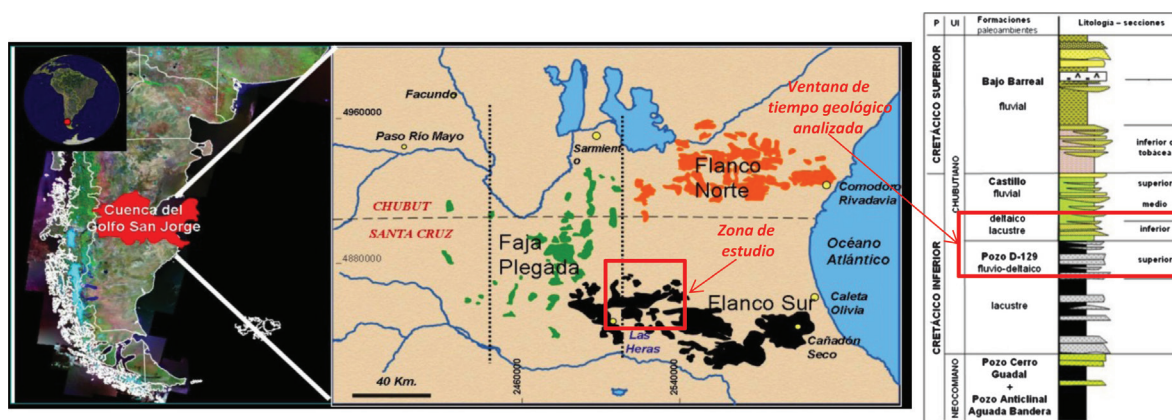


Figura 1. Ubicación de la Cuenca del Golfo San Jorge, zona de estudio, ventana de tiempo geológico analizada.

del Oeste de la cuenca han sido originados en algunos casos por reactivación compresiva de fallas normales preexistentes.

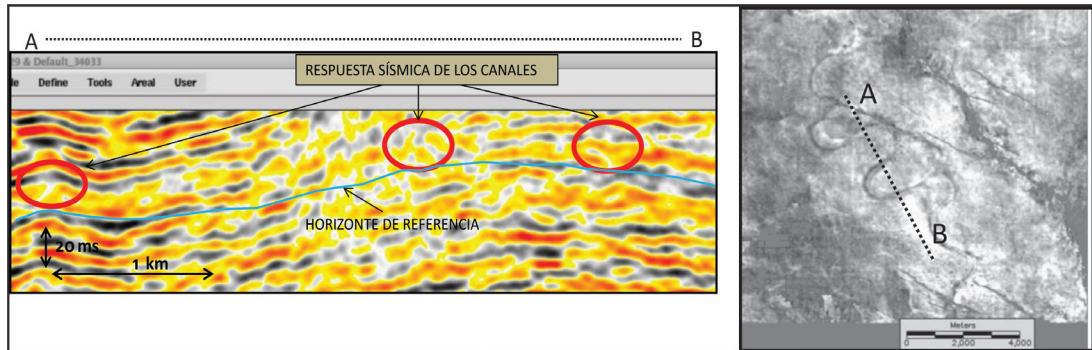


Figura 2. Visualización de geoformas fluviales a partir de un horizonte sísmico de referencia. Ejemplo tomado de la Cuenca del Golfo San Jorge, área Cañadón Vasco, Formación Bajo Barreal Inferior.

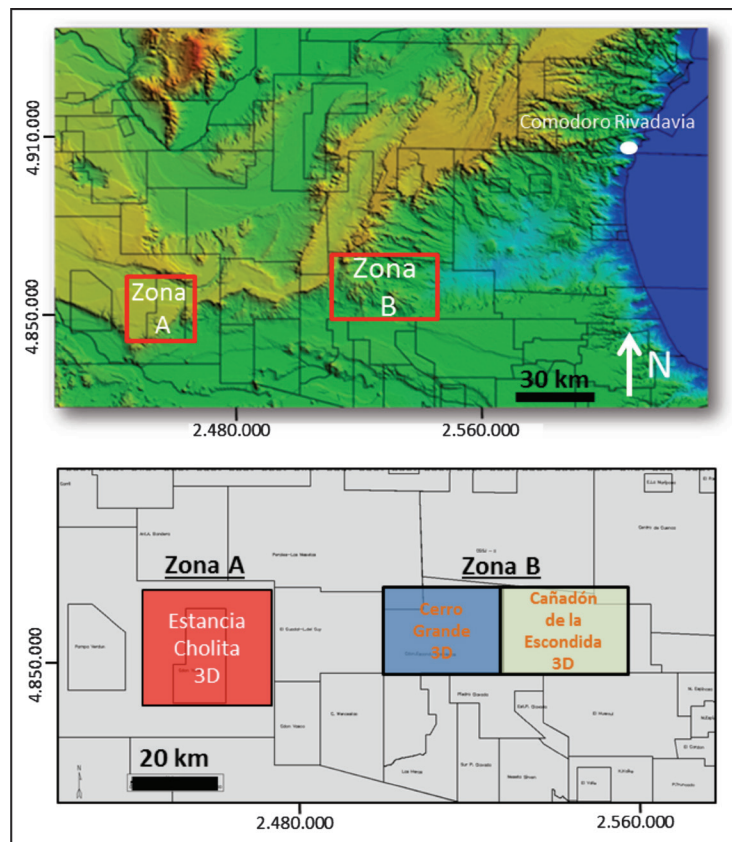


Figura 3. Ubicación zonas con eventos deltaicos visualizados en cubos sísmicos.

METODOLOGÍA PARA VISUALIZAR Y ANALIZAR GEOFORMAS EN LOS CUBOS SÍSMICOS

Para lograr imágenes sísmicas de geoformas, se toma un horizonte de referencia continuo y regional correspondiente a un tiempo de depositación único. Luego, el cubo sísmico es horizontalizado

a dicho nivel. En el caso que se mantenga el paralelismo entre las capas, es posible asumir que cualquier *time slice* de dicho cubo también corresponde a una paleosuperficie depositacional (Figura 2).

Cabe destacar que esta metodología ha sido ampliamente utilizada a nivel mundial en los últimos años para este tipo de ambientes continentales, donde la sísmica 3D no permite resolver la continuidad de los cuerpos arenosos de espesores promedios entre 5 - 20 metros, pero si detectarlos.

En la Cuenca del Golfo San Jorge la visualización de geocuerpos se restringe casi exclusivamente a la detección de canales fluviales. En esta oportunidad se interpretaron rasgos deltaicos bien desarrollados para diferentes intervalos geológicos, en dos zonas (zona A y zona B) espaciadas 70 kilómetros una de otra. En la zona A se utilizó un cubo sísmico 3D de 620 kilómetros cuadrados y en la zona B dos cubos sísmicos: Cerro Grande y Cañadón de la Escondida totalizando 850 kilómetros cuadrados de cobertura (Figura 3). La clasificación de clases sísmicas, combinando diversos atributos, tanto de frecuencia como amplitud en una ventana de tiempo de 20 ms, fueron utilizados para analizar geoformas y subambientes depositacionales.

CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LOS SISTEMAS DELTAICOS VISUALIZADOS

Se definen a los deltas como estructuras convexas que se destacan en una costa frente a la desembocadura de un río. Estos se forman cuando el aporte de sedimentos es mayor que la acción de los procesos que los redistribuyen. Pueden formarse en el mar o en cuerpos lacustres, y aunque su morfología final puede ser muy variable, el proceso de formación siempre es básicamente el mismo: las corrientes fluviales cargadas de sedimentos, desaceleran

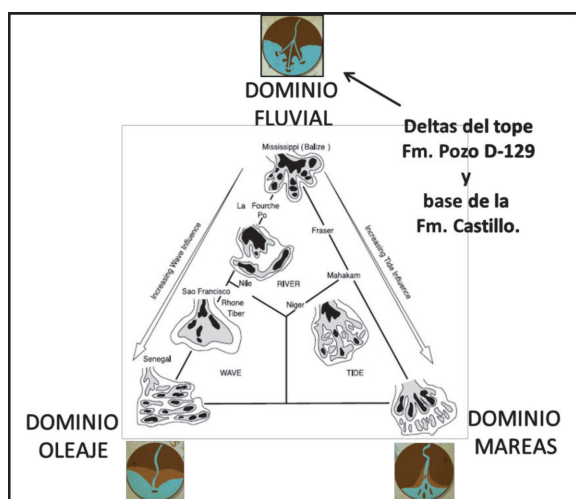


Figura 4. Clasificación según Galloway (1975) modificado con diagrama de ejemplos actuales de Bhattacharya (2006).

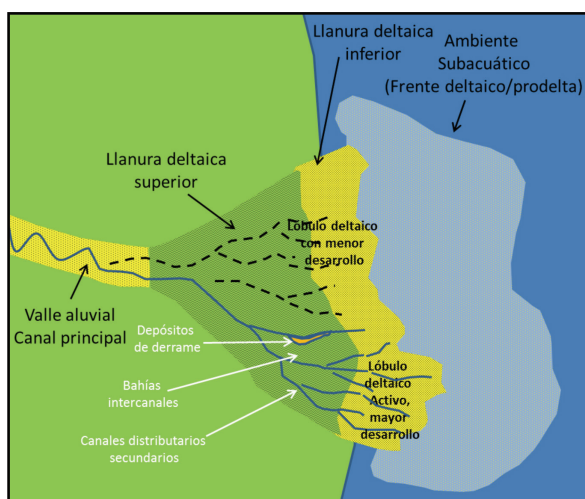


Figura 5. Esquema teórico de distribución de ambientes y subambientes en una zona deltaica.

y se expanden al entrar a un cuerpo de agua de grandes dimensiones, depositando gran parte o la totalidad de su carga sólida. Se puede producir una selección granulométrica con los sedimentos más gruesos acumulados cerca de la desembocadura y los más finos en áreas alejadas (Arche 1989).

La clasificación de deltas pueden realizarse atendiendo a una o a varias de sus características: forma, dinámica o estructura. La clasificación de mayor utilidad según diversos autores es la de Galloway (1975), que utiliza un diagrama triangular cuyos componentes extremos son los procesos fluviales, mareales y de olas, en su estado puro, de acuerdo a la influencia relativa de cada uno de ellos (Figura 4).

Todo delta posee dos partes bien diferenciadas: una subaérea o llanura deltaica y otra subacuática. Esta última dividida en una parte proximal o frente deltaico de pendiente acusada (1° - 5°) y otra distal o prodelta, de menor inclinación (Figura 5). La llanura deltaica también puede dividirse en dos partes: una superior o interna, siempre por encima del nivel de base dado por el cuerpo de agua (marino o lacustre) y dominada por procesos fluviales, y otra inferior o externa, donde se da la interacción de procesos fluviales y marinos o lacustres según sea el caso.

Normalmente el valle aluvial que ingresa en la llanura deltaica, se subdivide progresivamente dando lugar a los llamados canales distributarios y entre ellos hay una serie de subambientes, tales como bahías intercanales y depósitos de derrame (Figura 5). La llanura deltaica puede tener áreas activas y áreas abandonadas, pues el río tiende a buscar el camino más corto hacia su desembocadura, y abandona un lóbulo cuando ha crecido en demasía (Arche 1989). Mientras la parte activa crece, la abandonada es afectada por retrabajo de olas y corrientes, y los sedimentos se compactan por expulsión de aguas intersticiales.

En el sector subacuático se encuentran, las barras de desembocadura, frente deltaico y prodelta (Figura 5).

Varios de estos ambientes y subambientes han sido identificados con la sísmica 3D, a lo largo de este estudio. Teniendo en cuenta los conceptos teóricos básicos recopilados sobre sistemas deltaicos (Bhattacharya 2006, Arche 1989, entre otros) y a partir de la visualización de *horizon slices* y lectura de atributos sísmicos, se interpretan, ambientes sedimentarios y la posible litología dominante.

En la zona A, se detectó una geoforma deltaica para el tope de la Formación Pozo D-129 que fuera corroborada con la perforación de 50 pozos.

En el caso de la zona B, la más oriental, presenta una muy clara expresión en la base de la Formación Castillo, tanto en *slices* de amplitud como en los diversos atributos sísmicos que se le aplicaron (Figuras 6 y 7). En esta área se centra el análisis morfológico ya que presenta las mayores perspectivas exploratorias, contando con un solo pozo (YPF.SC.ECa.x-1) que llega a las profundidades analizadas.

En la zona de estudio se visualiza una geoforma deltaica con muy buena continuidad lateral

en los 20 ms basales de la Formación Castillo. La misma cubre una superficie de unos 110 km², con dimensiones de 13 km de largo por 18 km de ancho aproximadamente. Se distingue claramente el valle aluvial principal de alta sinuosidad con una extensión de 15 km de largo y 600 metros de ancho.

En la llanura deltaica se destacan los canales distributarios secundarios, con longitudes y ancho que llegan a 13 kilómetros y 400 metros respectivamente. Los depósitos inferidos por modelos teóricos indicarían canales distributarios activos, muy parecidos a canales fluviales (Figura 7).

Pequeñas geoformas sísmicas semicirculares fueron asociadas a ambientes de bahías intercanales (Figura 10). Son zonas situadas entre los canales activos, caracterizados por depósitos de muy poca profundidad y poca agitación. El pozo YPF.SC.ECa.x-1 interceptó estos depósitos y los mismos se describen como una sucesión formada por arenas con ondulitas, material fangoso con abundantes raíces y material carbonoso con tendencia estratocreciente. En el frente deltaico y prodelta no se logra identificar geoformas que permitan realizar una caracterización.

El cambio en la amplitud sísmica (Figura 6) coincidente con el cambio de pendiente entre el canal principal alimentador y la llanura deltaica (Figura 7B), indicaría una zona de *bypass* arenoso para el canal y deposición para los canales secundarios de la llanura deltaica. La paleopendiente regional se infiere a partir del mapa de espesor en tiempo de la Formación Castillo y el corte sísmico A-B horizontalizado a la misma formación, donde los espesores aumentan hacia el ENE (Figuras 8A y B), coincidiendo con las paleocorrientes esperadas a partir de las geoformas fluvio-deltaicas detectadas (Figuras 6 y 7).

La aplicación de diversos atributos sísmicos (Figura 7) en una ventana de 20 ms por encima del tope de la Formación Pozo D-129, permitió generar un mapa de clasificación de facies sísmicas (Figura 9A). El aporte de este mapa fue de utilidad para aseverar lo antes descripto mediante una metodología diferente. Se interpretaron 4 subambientes sedimentarios: F1 = bahías intercanales (dato amarrado por el pozo de referencia), F2 = canales distributarios secundarios, F3 = ambiente subácueo / indiferenciado y F4 = ambiente subácueo / indiferenciado. Las litologías inferidas de manera indirecta para las facies F2, F3 y F4 es meramente conceptual, teniendo en cuenta su posición en un ambiente de este tipo.

A su vez, se utilizó la comparación con un sistema deltaico actual, como es el del lago Baikal en Rusia, desarrollado en un ambiente similar al estudiado (Figura 10). Este ejercicio permitió entender dimensiones y hallar similitudes en las geometrías a diferentes escalas. A un nivel macro, la relación largo / ancho es 1,3 para el sistema fósil y 1,5 para el delta del lago Baikal. A una escala de observación de mayor detalle, en posiciones distales de la llanura deltaica, la F1 (bahías intercanales) presenta cierta analogía tanto en la ubicación espacial como en sus dimensiones (diámetros que fluctúan entre 1,5 y 1,8 kilómetros) con el modelo actual, al igual que los canales secundarios (F2).

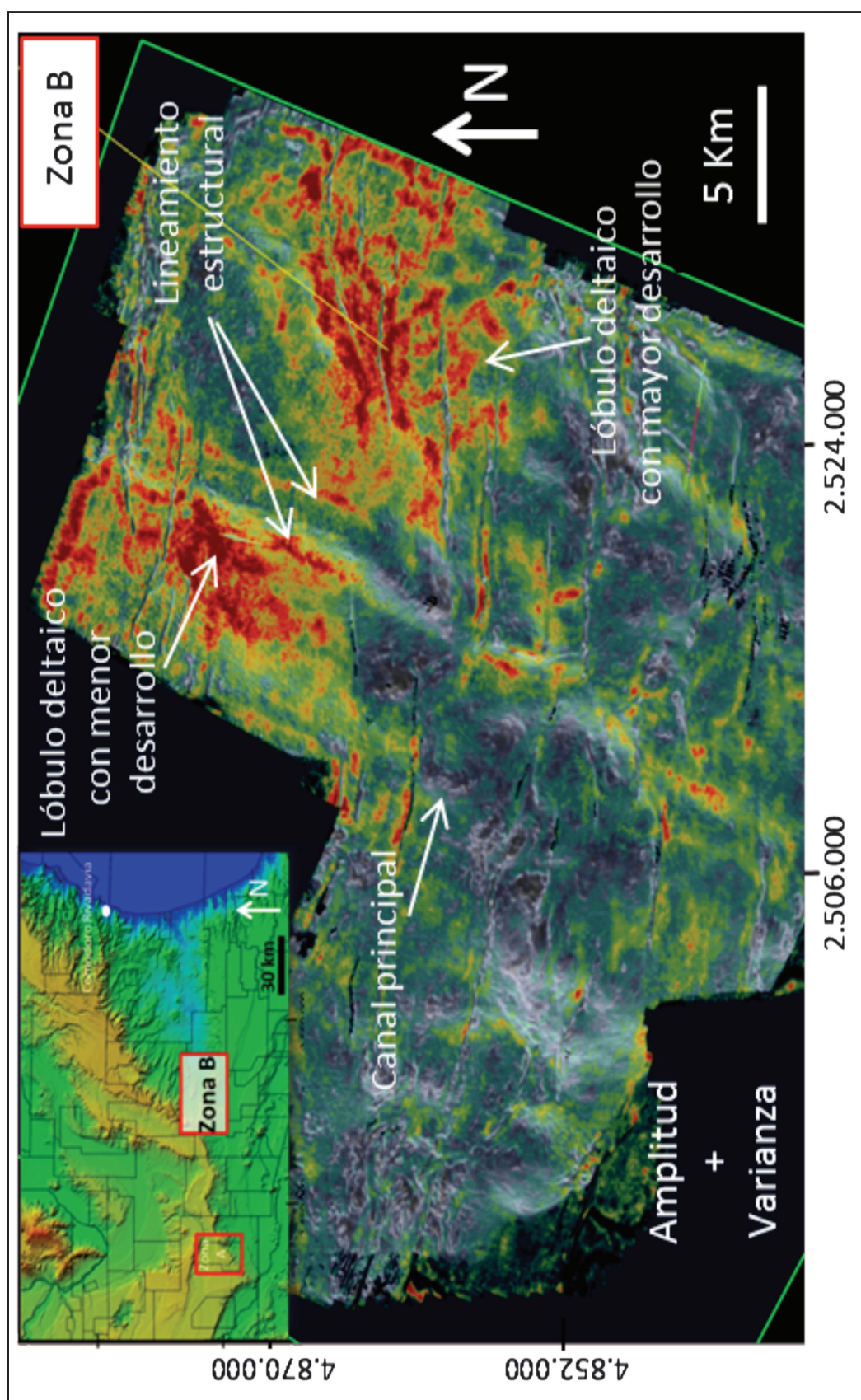


Figura 6. *Horizon Slice* 20 ms basales de la Formación Castillo (zona B, cubo 3D de Cerro Grande) combinando la amplitud y la varianza.

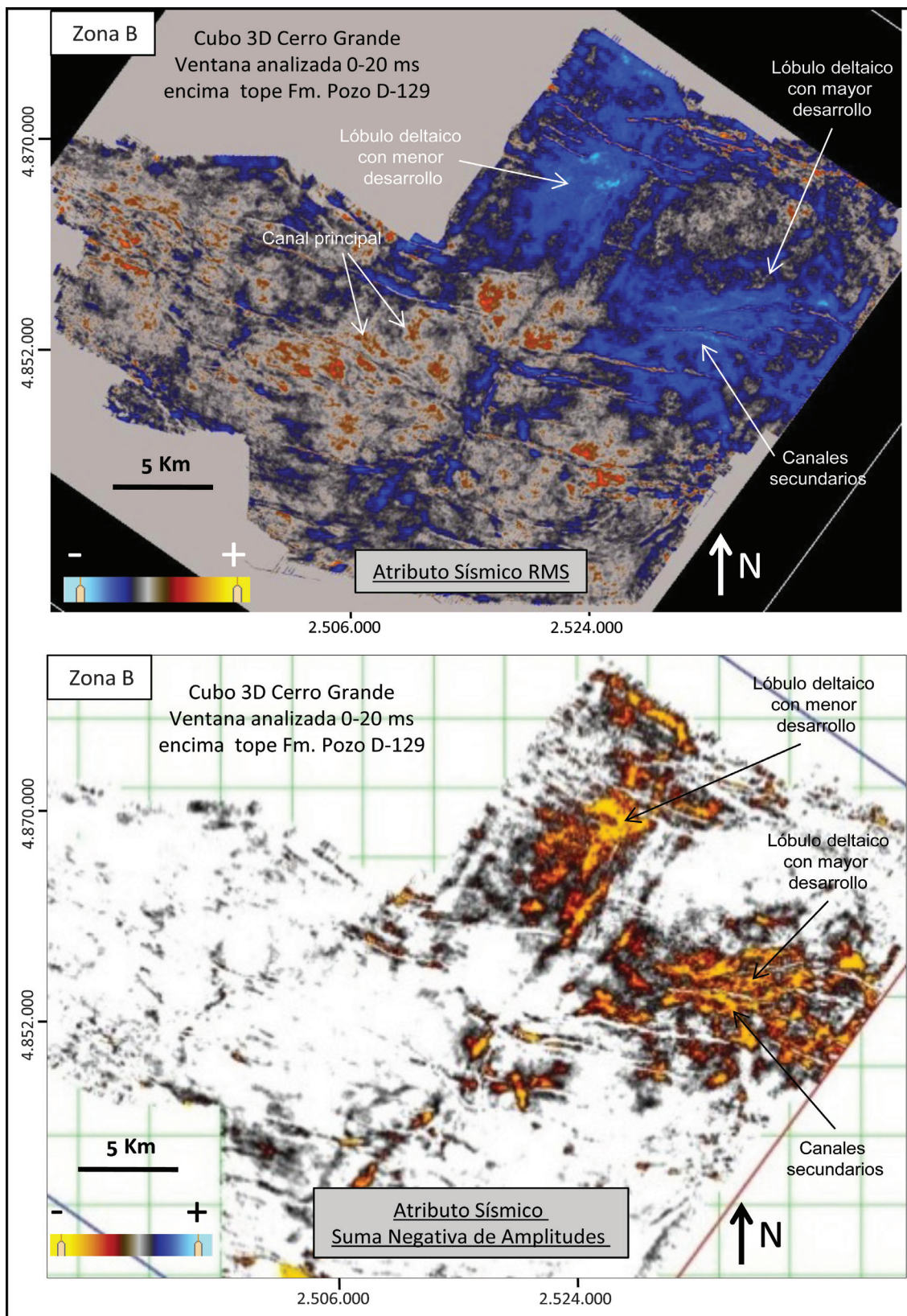


Figura 7. Diferentes atributos sísmicos para una ventana de tiempo de 20 ms basales de la Formación Castillo, resaltando la geoforma visualizada en los slice sísmicos.

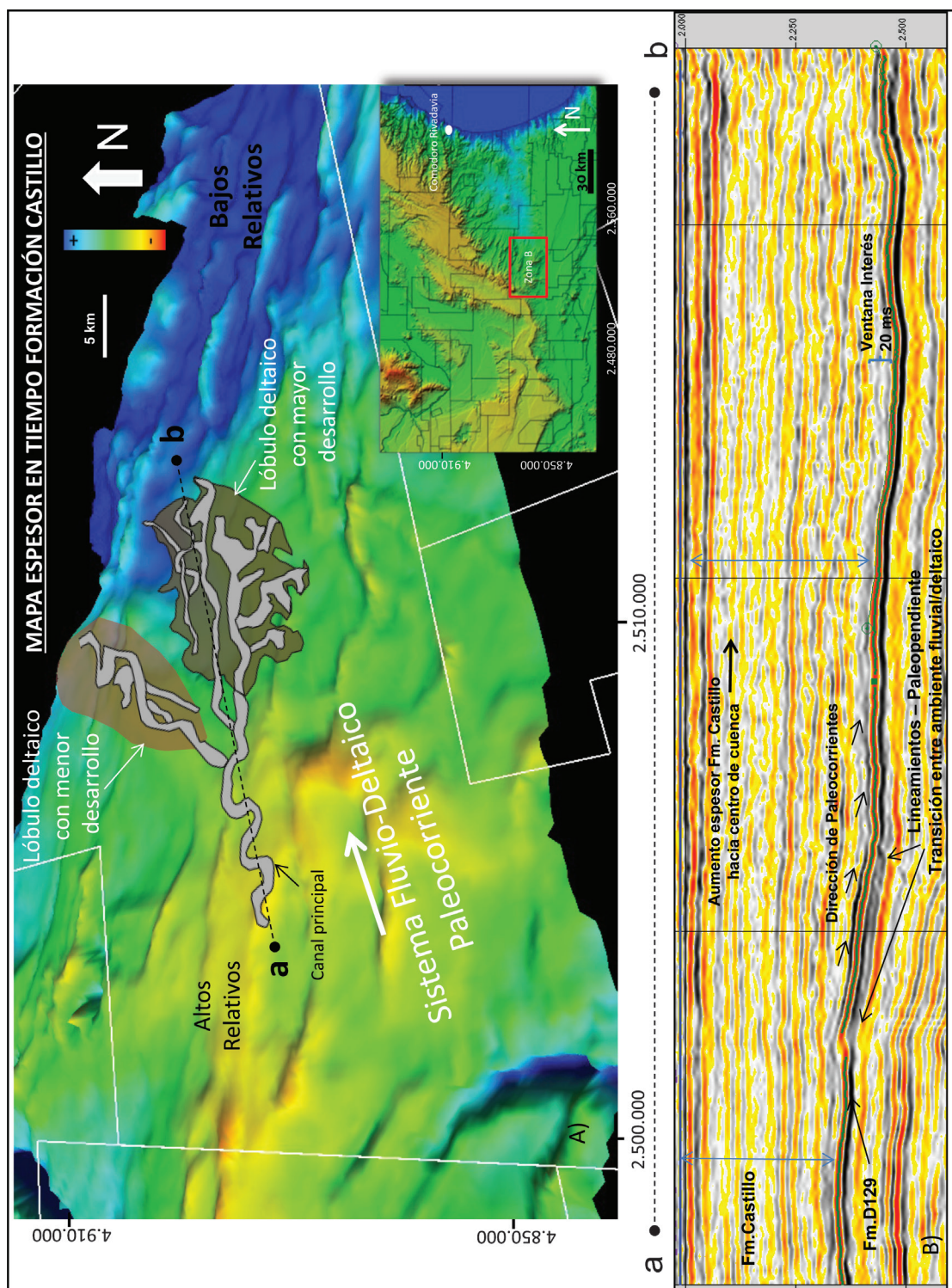


Figura 8. A) Mapa de espesor en tiempo Fm Castillo, altos y bajos relativos, dirección de paleocorriente. B) Corte sísmico A-B, cambio en la paleopendiente, lineamientos estructurales, transición entre ambiente fluvial y deltaico.

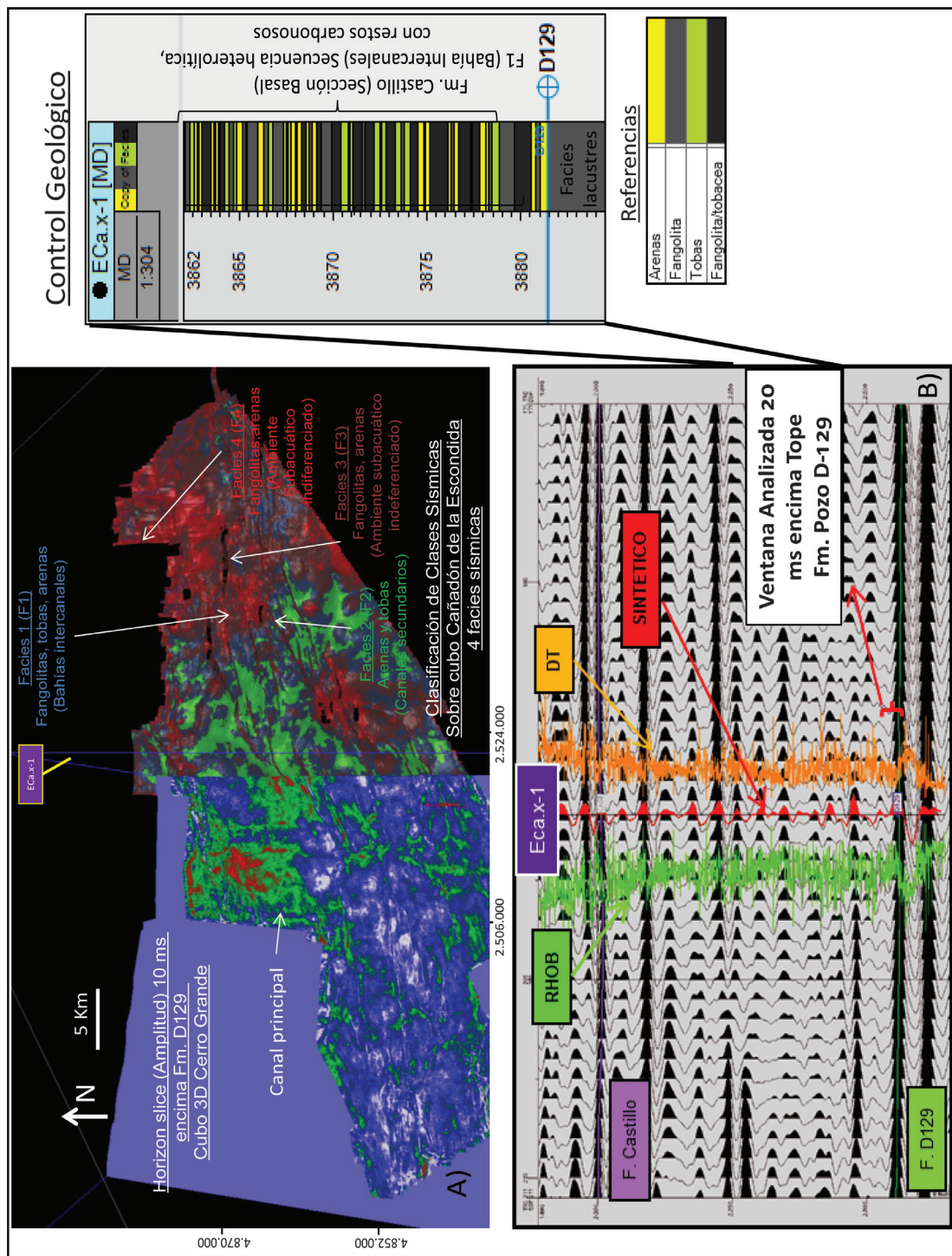


Figura 9. A) Solape entre *slice* sísmico (cubo 3D Cerro Grande) y mapa de clasificación de facies sísmicas (cubo 3D Cañadón de la Escondida) a partir de diversos atributos sísmicos, detectando facies con potencial prospectivo. B) Sismograma sintético del único pozo que llega a profundidad objetivo.

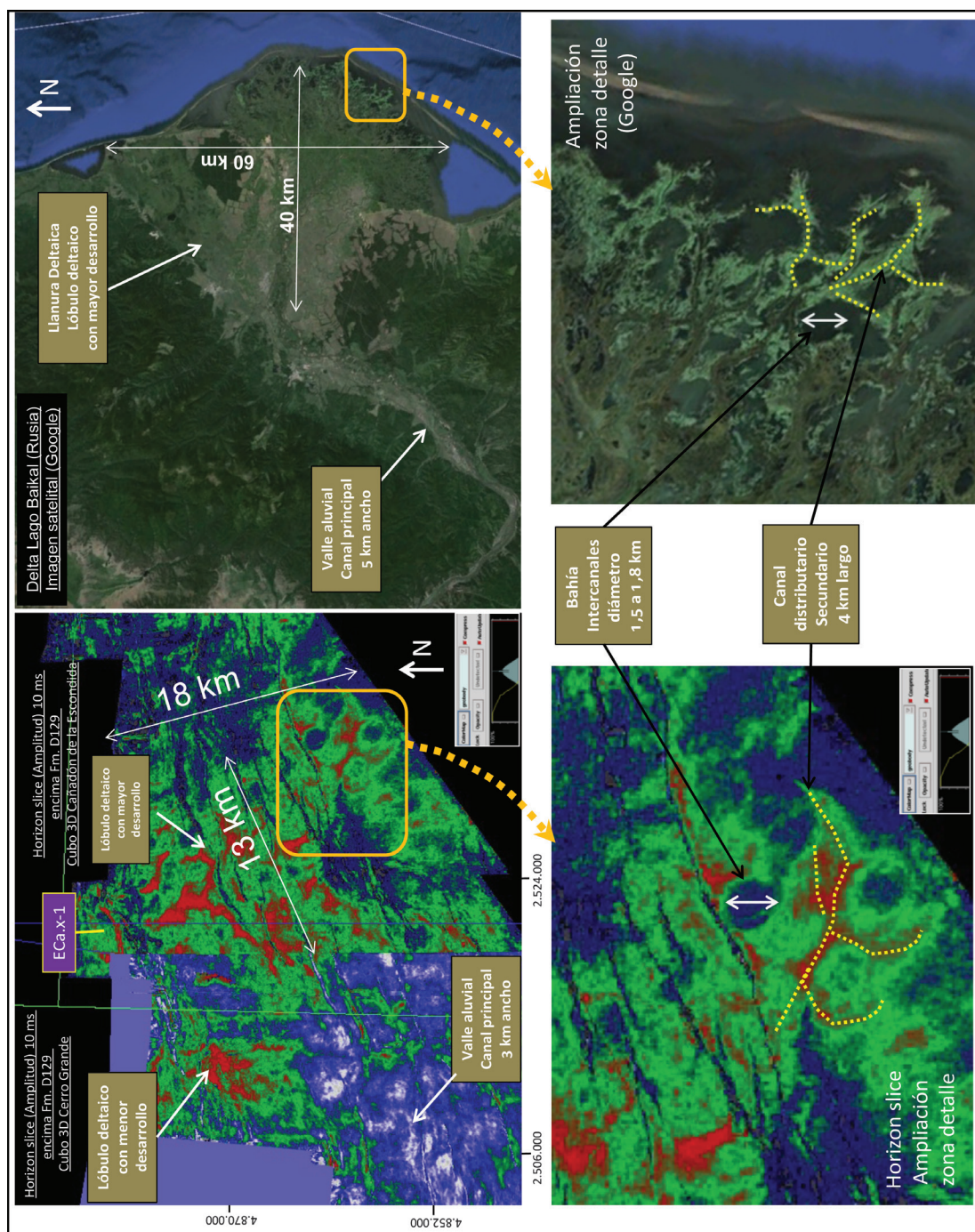


Figura 10. Comparación entre *slice* sísmico correspondiente al delta visualizado en la base de la Fm Castillo y el delta del lago Baikal en Rusia. Ambos presentan una proporción ancho/largo que varía entre 1,3 a 1,5. Las dimensiones de bahías intercanales y de canales secundarios muestran gran similitud.

INTEGRACIÓN CON EL MODELO PALEOAMBIENTAL REGIONAL

Las interpretaciones paleoambientales (previas a este trabajo) para la sección superior de la Formación Pozo D-129 y la sección inferior de la Formación Castillo proponen una sedimentación de depósitos de ambiente lacustre y fluvial. El análisis realizado mediante integración e interpretación de perfiles eléctricos, registros de imágenes, testigos coronas, interpretación y análisis de atributos sísmicos (Iovine *et al.* 2013), permitió caracterizar a estas dos secciones como desarrolladas en un paleoambiente de transición entre sistemas fluviales y lacustres. A partir de las evidencias sísmicas visualizadas para los diferentes tiempos geológicos en los slice sísmicos, se interpreta una evolución del paleoambiente desde la etapa final de la Formación Pozo D-129 hasta inicios de la Formación Castillo. Para eso hemos definido 3 tiempos geológicos desde el más antiguo al más nuevo, como T₁, T₂, T₃, (Figura 11). Definiendo para el tiempo T₁ (evento 1), a la sección superior de la Formación Pozo D-129, una geoforma deltaica comprobada y calibrada con datos de pozos (Zona A - Yacimiento Estancia Cholita). Esta geoforma deltaica está relacionada a estadios de nivel de base estable o levemente regresivos permitiendo la construcción de un cuerpo deltaico, en el sector occidental de la cuenca, como se visualiza en la Figura 12. Inmediatamente por encima, se interpreta una línea de costa (Iovine, *et al.* 2013) producto de un evento transgresivo al cual denominamos T₂ (Figuras 11

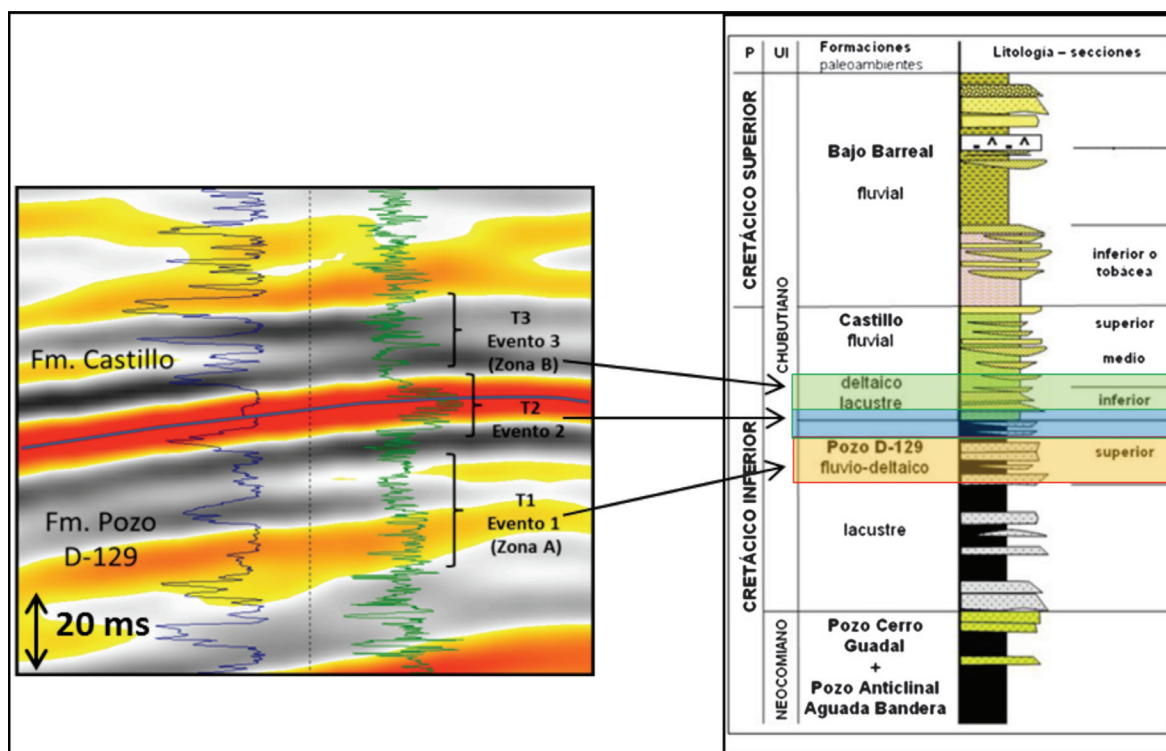


Figura 11. Los tres eventos sísmicos definidos, nivel superior de la Fm Pozo D-129 (T1), tope de la Fm Pozo D-129 (T2), base de la Fm Castillo (T3).

y 12), evidenciado por el claro contraste entre amplitudes sísmicas y cambios en los perfiles sónicos de los pozos entre las zonas propuestas de ambiente fluvial y las zonas consideradas de ambiente lacustre (Figura 12). En un tiempo T_3 (Figuras 11 y 12), base de la Formación Castillo, los sistemas deltaicos se desplazan a sectores más orientales de la cuenca, representado por la geoforma deltaica de la zona B (Figuras 6 y 12), producto de la contracción del cuerpo lacustre. Por encima de estos niveles los sistemas deltaicos habrían migrado a un sector más restringido de la cuenca, evidenciado por geoformas fluviales mapeadas a lo largo de 9 cubos sísmicos en el Flanco Oeste (Foster y Iovine, 2008).

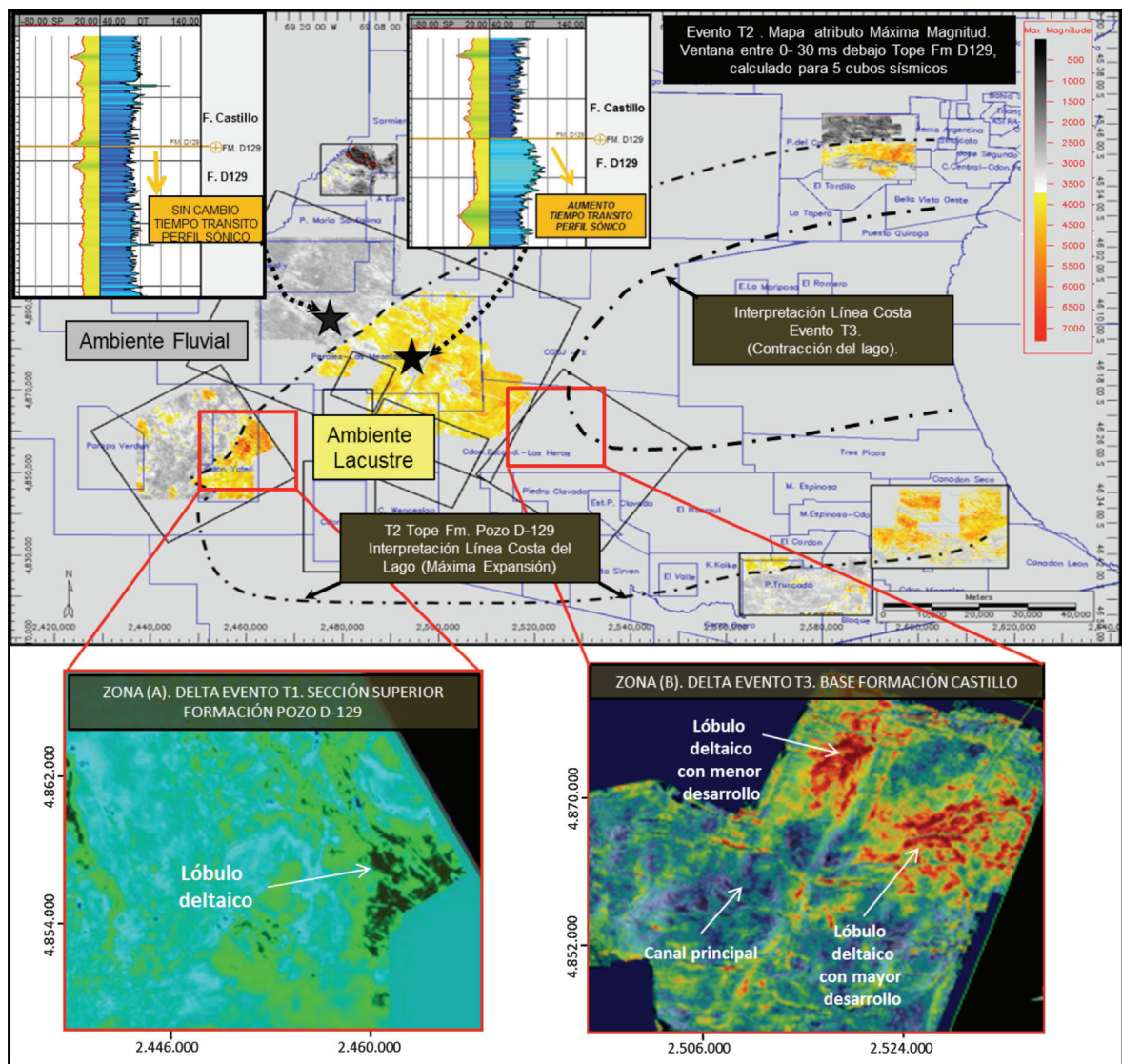


Figura 12. Mapa base de atributo de Máxima Magnitud, en una ventana de 0 a 30 ms debajo del tope Fm Pozo D-129, delimitando ambiente lacustre de fluvial, en 5 cubos sísmicos distribuidos en los 3 flancos de la cuenca, para el evento T2.

CONCLUSIONES

A partir del análisis sísmico, mediante *horizon slices* se identifican características propias de geoformas deltaicas correspondientes a la sección superior de la Formación Pozo D-129 e Inferior de la Formación Castillo en cubos sísmicos 3D de ambas zonas estudiadas.

El análisis de clasificación de facies sísmicas generado a partir de la combinación de diversos atributos sísmicos, en una ventana de tiempo de 20 ms, ayudó a discriminar subambientes, resaltando los rasgos visualizados en los slices sísmicos.

La comparación de las geoformas visualizadas con cuerpos deltaicos actuales (delta Lago Baikal, en Rusia), de proporciones semejantes (entre 1,3 a 1,5) permitió entender y vincular los subambientes, interpretados tanto en slices sísmicos como en el mapa de facies sísmicas.

La interpretación propuesta avala el modelo de “línea de costa variable”, para la transición de los ambientes sedimentarios entre la Formación Pozo D-129 y la Formación Castillo. Este modelo hace referencia a un proceso de sedimentación dinámica, contracción y expansión de un cuerpo lacustre, modificando la posición de la paleocosta en el intervalo de tiempo mencionado.

Este escenario geológico (expansión-contracción) habría controlado el desplazamiento espacial y arquitectural de los deltas. El modelo propuesto resulta predictivo en la búsqueda de potenciales reservorios en areniscas fluviales y deltaicas.

En la industria petrolera este contexto paleoambiental favorece la delineación de nuevos prospectos exploratorios y yacimientos convencionales. En lo que respecta a yacimientos no convencionales, los depósitos de interés serían principalmente las tobas y pelitas lacustres.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a YPF S.A. por el permiso para la publicación de este artículo, a Luis Pianelli, Osvaldo Ferraris, Juan Soldo, Martín Foster, Octavian Catuneanu, al grupo de exploración y desarrollo por las observaciones y discusiones compartidas. Arturo Aberastain y Norman Urrez por el esfuerzo en llevar adelante las operaciones de los proyectos exploratorios.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|--|--|
| Arche Alfredo, 1989. Sedimentología, Volumen 1. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, p. 395-446. | Bhattacharya, J.P. Facies Model Revisited. Society for Sedimentary Geology (SEPM), p. 237-292. |
|--|--|

- Clavijo, R., 1986. Estratigrafía del Cretácico Inferior en el sector occidental de la Cuenca del Golfo San Jorge, Argentina. Boletín de Informaciones Petroleras V (9): p.15-32.
- Foster, M. y G. Iovine, 2008. Geometría de los sistemas fluviales de la Formación Castillo y Sección Tobácea, Cuenca del Golfo San Jorge. Actas VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 575-586. Mar del Plata, Argentina.
- Galloway, W. E., 1975: Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of the deltaic system. Deltas, Models for exploration, M.L Broussard (Ed.). Houston Geology Society, p. 87-98.
- Iovine, G., L. Ferreira, M. Foster, y A. Santangelo, 2013. "Nuevas consideraciones paleoambientales de la Formación Pozo D-129, en el área de la provincia de Santa Cruz: integración de datos". Primeras Jornadas Geológicas de la Cuenca del Golfo San Jorge, p. 59-60. Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.
- Solórzano P., G. Nicora, A. Santangelo, J. Marcaida, 2012. Mejorando la caracterización y definición de reservorios multicapa en ambientes fluviales utilizando variadas técnicas determinísticas y estocásticas en un ambito integrado, Yacimiento Estancia Cholita, Cuenca del Golfo San Jorge. Jornadas de recuperación secundaria (EOR), IAPG, Argentina.