

PROCESOS ASOCIADOS A LA GENERACIÓN DE FALLAS POLIGONALES, CASO DE ESTUDIO EN EL *OFFSHORE* ARGENTINO

Facundo J. Pagán¹, Ofelia Silio¹, Emilio A. Rojas Vera¹, Juan Pablo Lovecchio¹, Sebastián Arismendi¹,
Tomás D'Biassi¹, Néstor Bolatti¹

1: YPF, facundo.j.pagan@ypf.com; ofelia.silio@ypf.com; emilio.a.rojas@ypf.com; juan.lovecchio@ypf.com;
sebastian.arismendi@ypf.com; tomas.dbiassi@ypf.com; nestor.bolatti@ypf.com

Palabras clave: Fallas Poligonales, Cuenca del Colorado, offshore argentino

ABSTRACT

The external high that separates the Colorado basin from the Argentine Basin has significant exploratory potential. In 2005, a 2.000 km² 3D seismic cube was recorded, covering a part of it. The interpretation of this cube revealed a polygonal fault system (PFS) that affects a discrete stratigraphic interval of Upper Cretaceous age (Campanian-Maastrichtian) exceeding the area of the cube, which suggests a great lateral continuity beyond the seismic data analyzed.

This PFS affects a transgressive wedge in slope position, correlated with the Pedro Luro Formation defined at depth further west, it is characterized by a high density of normal faults with scarce displacement or slip with an almost isotropic orientation. In plan it has a polygonal honeycomb pattern with an average radius of 700 meters. Although it is superimposed on the regional faulting deformation regime that affects the sedimentary column in the area since the Upper Triassic, its origin seems not to be linked to tectonic processes. The upper limit of the zone affected by the PFS is a net contact, close to the Cretaceous-Cenozoic limit, with a stratigraphic interval composed of mass-transported sediment deposits (MTD) by gravitational processes and not affected by faulting. On the other hand, the lower limit is transitional since the thickness affected by the PFS varies between 100 and 250 meters and is not conditioned by variations in seismofacies or discrepancies. Moreover, there seems to be a direct correlation between the sedimentation rate associated with the pulses of the MTDs that overlay it and the thickness of the sedimentary column affected by the PFS. Other characteristics that seem to be necessary for its genesis (grain size and lithology) would be present in the sediments that host this PFS, Pedro Luro Formation, mainly composed of more than 350 meters of shales from a marine environment.

Understanding the origin of this type of faulting can be key in certain petroleum systems as it could influence the geometry of the reservoirs, fluid distribution and efficiency of the seals. Its stratigraphic value as a correlation tool is also recognized for covering large areas and for the conditions necessary for its formation.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de fallas poligonales (SFP) pueden ser identificados por sus fallas normales de bajo desplazamiento, con una geometría en planta de tipo poligonal y desarrollo confinado entre capas no deformadas en un intervalo estratigráfico determinado (Cartwright 2011). Se caracterizan por su gran extensión de cientos a miles de kilómetros cuadrados y desarrollo de depósitos de grano fino, afectando espesores de decenas a centenas de metros.

Si bien estos SFP son bastante recurrentes y han sido reconocidos en más de 100 cuencas del mundo, en Argentina, los mejores ejemplos sólo están presentes en la Cuenca Austral (Belotti *et al.* 2012) con su continuidad en la Cuenca de Magallanes (Pinto *et al.* 2018) y en la Cuenca del Colorado (Anka *et al.* 2014). Esto último coincide con el 90% de ocurrencia en márgenes continentales divergentes, ya que en general se localizan en sistemas depositacionales próximos al talud donde las secuencias de granulometría fina predominan (Cartwright 2011).

Existe consenso en que este tipo de fallamiento está asociado a la expulsión de fluidos del sistema poral y compactación de sedimentos de grano fino (Cartwright 2003). Por otro lado, los mecanismos que dan origen a los SFP aun no son completamente entendidos. Las principales hipótesis desde que su origen no tectónico fue revelado con la utilización de datos sísmicos 2D, confinadas en un intervalo estratigráfico y 3D, geometría en planta, se pueden resumir (según Wrona *et al.* 2017) en: a) inversión de densidad por compactación diferencial de la sucesión hospedante del SFP y los estratos suprayacentes (Henriet *et al.* 1988; Watterson *et al.* 2000), b) extensión interna de los estratos paralelos de la sucesión hospedante impulsada por deslizamiento gravitacional (Higgs and Mc Clay, 1993; Clausen *et al.* 1999); c) fracturamiento hidráulico debido a compactación diferencial y acumulamiento de sobrepresión (Cartwright 1994 a, b); d) sinéresis, es decir, la contracción espontánea de un gel de agua-sedimento (Dewhurst *et al.* 1999); e) bajos coeficientes de fricción residual que serían demasiado bajos para sostener in situ tensiones a lo largo del plano de falla (Goult 2001, 2002, 2008), f) disolución de partículas durante la diagénesis (Shin *et al.* 2008; Cartwright 2011) y g) zona de fluencia, donde se describe el comportamiento dinámico de las arcillas no capturado en el criterio clásico de Mohr-Coulomb o Drucker-Prager (Laurent *et al.* 2012).

El objetivo de este trabajo es el de caracterizar un sistema de fallas poligonales bien desarrollado en el Campaniano-Maastrichtiano de la Cuenca del Colorado, resaltando el posible mecanismo generador y su propagación en el intervalo estratigráfico afectado. Las interpretaciones están basadas íntegramente en datos sísmico 3D ya que la zona de estudio es una frontera exploratoria que aún no cuenta con datos de pozos.

Contexto geológico del área de estudio

La Cuenca del Colorado es una cuenca extensional de rumbo oeste-este emplazada en la Plataforma Continental Argentina, limitada al norte por el Alto de Tandilia que la separa de la Cuenca del Salado, al sur por el Alto de Rawson, al oeste por el Macizo Nordpatagónico y al este por el Alto Externo que la separa del talud y la Cuenca Argentina (Fig. 1 A, véase Gerster *et al.* 2011). La cuenca se originó a partir de un complejo proceso de *rifting* de varias etapas a través del Triásico-Jurásico, finalizando con el *rifting* asociado a la apertura del Atlántico Sur en el Cretácico Temprano (Lovecchio *et al.* 2018, 2020).

El relleno estratigráfico de la cuenca está conformado por una sección de synrift con capas continentales fluviales, aluviales y posiblemente lacustres. El proceso de ruptura continental está registrado por extensas cuñas volcánicas con intercalaciones de sedimentos continentales a marinos someros, conocidas como SDR (*Seaward Dipping Reflectors*) (Kress *et al.* 2021) que se emplazan en la actual zona de transición entre las cortezas continental y oceánica. La apertura del Atlántico Sur en el Hauteriviano-Barremiano trajo aparejada la formación de una discordancia regional en la cuenca, la *breakup unconformity*, por encima de la cual se habrían depositado los primeros sedimentos marinos de edad barremiana-aptiana, producto de una transgresión marina que habría logrado atravesar el Alto Externo de la Cuenca del Colorado hacia el oeste, alcanzando la zona del depocentro (Figs. 1 A y B). Esta secuencia marina aptiana ha sido interpretada como el principal intervalo de potencial roca madre en la zona de estudio. Por encima de la transgresión aptiana, comienza a desarrollarse un margen pasivo abierto hacia el este, con desarrollo del clinoformas que progradan en esa dirección. Durante el Cretácico Superior, la mayor parte de la cuenca se encuentra en condiciones de sedimentación continental, con una zona costera y quiebre de plataforma en la zona del talud actual. A partir del Campaniano-Maastrichtiano, y hasta el Daniano, una importante transgresión marina vuelve a inundar completamente y en varios pulsos la cuenca, produciendo la depositación de secuencias pelíticas de plataforma, englobadas en la Formación Pedro Luro, que es el intervalo de interés de este trabajo (Fig. 1 C) por presentar el desarrollo de fallas poligonales observadas en la interpretación sísmica. Esta secuencia está compuesta por reflectores muy continuos, que muestran agradación y onlap hacia el continente, y su límite superior está dado por otra discordancia regional denominada internamente como NTK (Near Top Cretaceous). El resto del Paleógeno se caracteriza por baja tasa de sedimentación en la cuenca, mientras que, en el Neógeno, un nuevo ciclo sedimentario genera la plataforma actual, más retirada hacia el continente que la del Cretácico Tardío (Fig. 1 B).

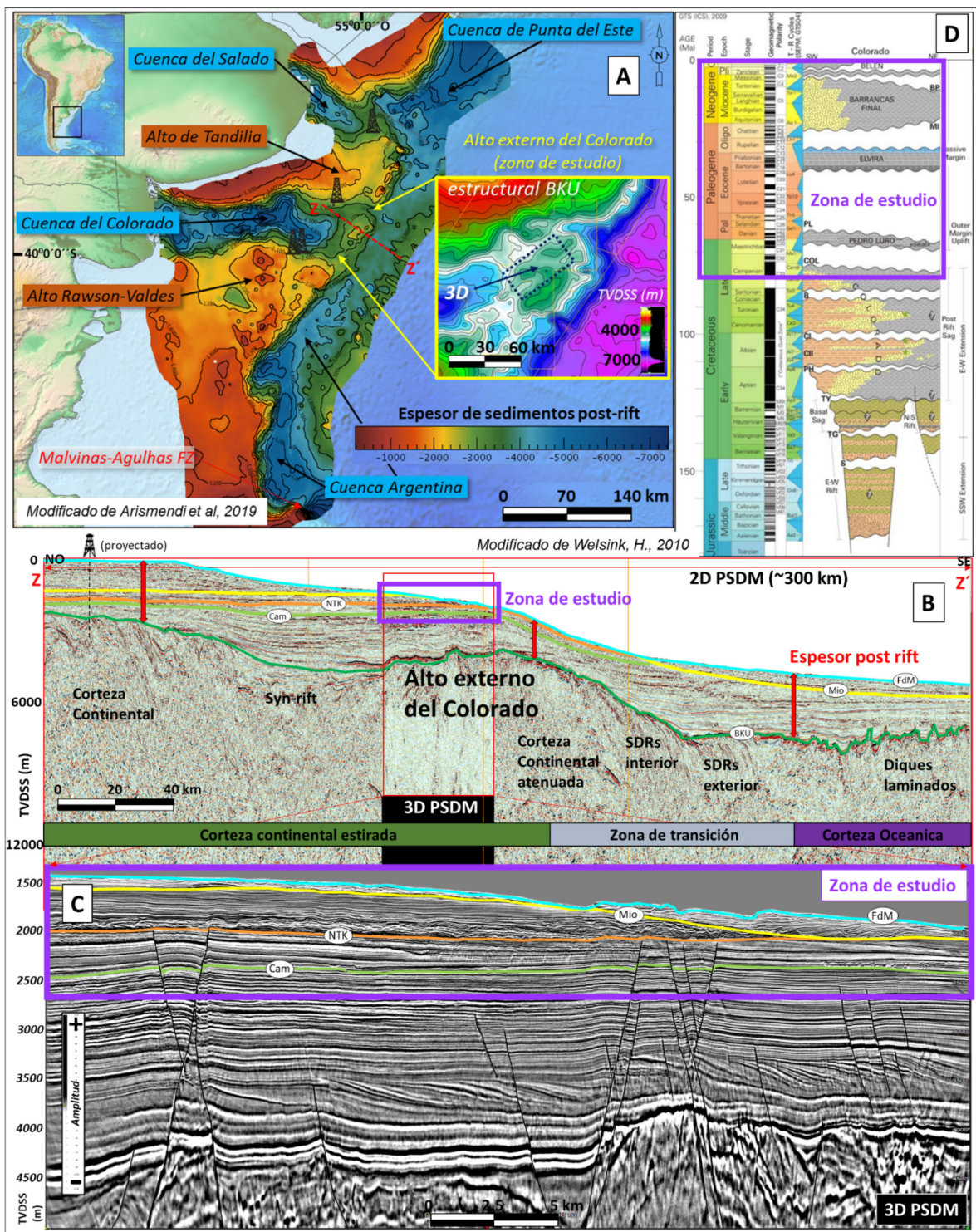


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. A) Mapa de espesor post rift (modificado de Arismendi *et al.* 2019) entre BKU y FdM. Resaltan las Cuenca del Colorado y del Salado separadas por altos de basamento y su orientación perpendicular a las Cuenca Argentina y Punta del Este. La zona de estudio se encuentra sobre la estructura del Alto Externo entre la intersección de la Cuenca del Colorado y Argentina. B) Sección sísmica 2D-3D a lo largo de la Cuenca del Colorado y Argentina. La zona de estudio comprende el rango de tiempo que se extiende entre el Campaniano (Cam) y la actualidad (FdM). C) Sección sísmica 3D donde se resalta la zona de estudio y los marcadores sísmicos asociados. D) Columna cronoestratigráfica de la Cuenca del Colorado (Welsink 2010; Gester *et al.* 2010) y la zona de estudio comprendida entre el Cretácico Tardío y Paleoceno, Formación Pedro Luro. BKU= brek up unconformity; Cam= Campaniano; NTK= next to Tertiary-Cretaceous; Mio= Mioceno; FdM= fondo del mar.

Datos y metodología de trabajo

Este estudio está basado en la sísmica 3D adquirida en el año 2005 sobre parte del Alto Externo del Colorado. En el año 2021 fue reprocesada obteniendo como resultado un dato de gran calidad, con mayor contenido de frecuencia y mejor resolución cubriendo 2.000 km² (Figura 1). Las interpretaciones y atributos se realizaron a partir de datos sísmicos migrados en profundidad (PSDM) con un bin de 12 metros de lado y 4 metros de resolución vertical, que tienen una excelente correlación con la campaña de adquisición 2D realizada en el 2018 en el borde de la plataforma. Para el área de interés se mapearon todos los reflectores (pico, valle, cruce por cero) siguiendo un flujo de trabajo semi-automático con el que se generó un modelo geológico de edades relativas (RGTM) y que permitió analizar múltiples atributos en todos los horizontes, entre los que se destacaron la Amplitud RMS, Coherencia y Dip-Azimuth. Con esta metodología de trabajo se obtuvieron interpretaciones de mayor robustez e imágenes con buena resolución a pequeña escala. Las fallas fueron interpretadas siguiendo un flujo semiautomático y aplicando diferentes filtros según su jerarquía (tectónicas vs poligonales).

Aún no se cuenta con datos de pozos en la región para calibración, ya que es una zona de frontera exploratoria a más de 300 km de la costa y 1.500 metros de profundidad media del mar. Los pozos existentes en la cuenca se encuentran perforados en un ámbito geológico diferente al área de interés y sólo fueron utilizados para correlaciones cronoestratigráficas de las principales secuencias estratigráficas.

RESULTADOS

El sistema de fallas poligonales identificado en el Alto Externo de la Cuenca del Colorado (Welsink 2010, Gerster *et al.* 2011, Autin *et al.* 2013; Loegering *et al.* 2013), podría superar los 5.000 km² de superficie, prolongándose más allá de los límites de esta región morfoestructural (Fig. 1 A y B). Esto, surge de la interpretación de SFP en los 2.000 km² de sísmica 3D y extrapolados hacia los datos 2D adyacentes.

Este sistema poligonal tiene un claro límite superior que coincide con una discordancia regional (NTK) correlacionable con datos bioestratigráficos obtenidos en pozos perforados a más de 100 km hacia el ONO (Fig. 1b) en dirección al continente. La secuencia afectada por este fallamiento tendría edades correspondientes próximas al contacto Cretácico Superior-Terciario Inferior (Campaniano-Maastrichtiano-Paleoceno), es decir, asociadas a la Formación Pedro Luro (Fig. 1 D). En general, la sucesión estratigráfica comprende potentes pelitas marinas interestratificadas con secuencia arenosas.

En la sección de la Figura 1C y Figura 2 A se reconoce la expresión sísmica y las relaciones estratigráficas del SFP Cretácico Superior-Terciario Inferior que lo han deformado de forma

variable. La secuencia es afectada por fallas normal de escaso rechazo que rondan los 15 metros en promedio en su zona central, disminuyendo hacia el límite superior e inferior. En una sección con mayor detalle (Fig. 3 A) se evidencia el límite superior contra el cual el sistema de fallas termina abruptamente, pero conservando parte de su rechazo máximo mientras que el límite inferior es más irregular y difuso hasta el punto en que el rechazo desaparece. Este límite superior coincide con la discordancia regional NTK que posee un carácter erosivo y su límite inferior, varía en profundidad en toda su extensión, generando una superficie imaginaria ondulante próxima al marcador Campaniano. Por este motivo se ha podido subdividir la zona afectada por este tipo de fallamiento por el espesor de fallas poligonales que varía entre 270 m de espesor máximo en la faja este, 100 m en la faja central y 210 m en la faja oeste. Estas fajas en su conjunto poseen una orientación NNE-SSO sobre el Alto Externo del Colorado (Fig. 2 A) y la extensión es de al menos 32 km de ancho y 74 km de largo en el área de la sísmica 3D (Fig. 2 B) ya que en el dato 2D la resolución no permite una interpretación clara.

A partir de un mapeo sistemático, en una vista en planta (Figs. 3 A y B) los SFP se reconocen por un característico patrón geométrico donde cada polígono de la compleja red varía entre formas rectangulares a hexagonales y con tamaños de 200 a 800 metros en su diagonal. Hacia los bordes de las fajas, los polígonos se vuelven incompletos hasta desaparecer. El sistema alcanza una alta madurez (según Cartwright 2011) en la zona central donde se registra una alta conectividad de fallas y es en apariencia la zona de nucleación. Hacia el límite superior la conectividad decrece hasta un nivel intermedio de madurez mientras que, hacia el límite inferior, la conectividad entre fallas presenta un nivel inmaduro. La faja Este se caracteriza por un predominio de fallas con un arreglo sutil en pares conjugados que pueden reconocerse como una doble línea en los atributos (Figs. 3 B y C). La faja Oeste en cambio presenta un arreglo con fallas individuales.

En general las fallas poligonales mapeadas muestran una distribución de sus planos de falla cercanos a la isotropía (Fig. 3 D) sin una aparente relación entre su orientación, extensión o rechazo. Estas observaciones en su conjunto sugieren un origen no tectónico para el sistema.

La discordancia regional asociada a una edad próxima al límite Cretácico-Terciario (marcador NTK) tiene un marcado carácter erosivo que está evidenciado por la angularidad de las secuencias infrayacentes y las incisiones (hasta 2 km de largo por 50 m de profundidad) generadas por los sucesivos depósitos transportados en masa (más conocidos por sus siglas en inglés MTD, mass transport deposits), (Figs. 4 A, B y C). En el área de estudio pudieron mapearse al menos tres eventos/pulsos de MTD consecutivos que en conjunto superan los 300 m de espesor (Figs. 4 D y E). Si bien, el sentido general de depositación de todo ellos es hacia el ESE, se pueden reconocer variaciones internas propias de los flujos turbulentos y otras asociadas a paleocorrientes (perpendiculares al paleo fondo marino). A diferencia de la superficie mapeada como discordancia regional NTK (Figs. 4 A y F), donde se reconoce la impronta (por compactación diferencial) del fallamiento asociado al régimen tectónico, los sucesivos pulsos de MTD suavizan aquella paleo

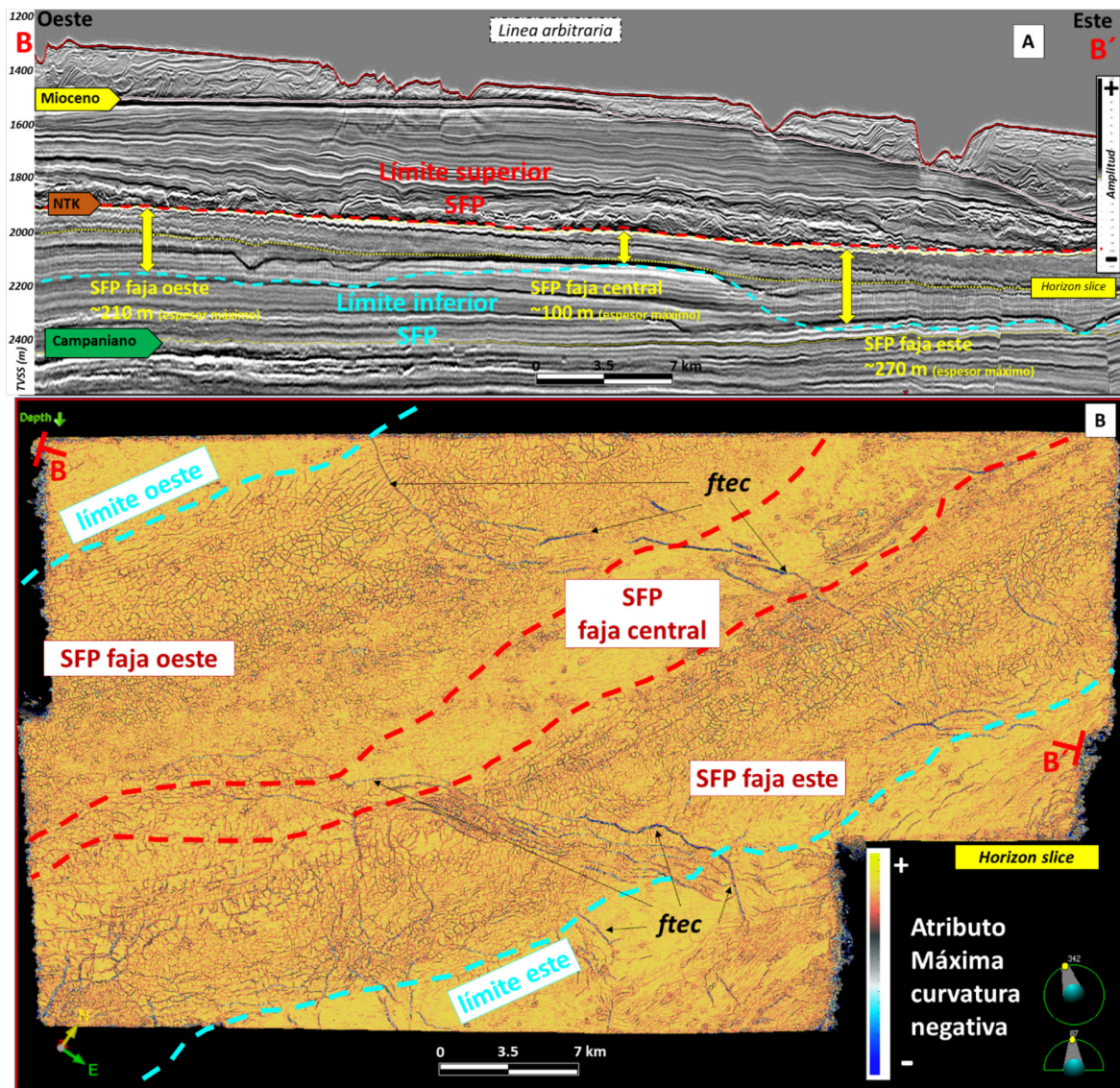


Figura 2. Identificación de SFP en sísmica 3D. A) sección arbitraria Oeste-Este. El SFP se desarrolla como un intenso fallamiento entre el límite superior, marcador sísmico NTK, y el límite inferior, asociado a la desaparición del fallamiento y por encima del marcador Campaniano. El espesor es variable y podría dividirse en tres sectores según su desarrollo en profundidad: SFP faja oeste, SFP faja central y SFP faja este. B) Mapa de atributo de máxima curvatura negativa generado sobre un horizon slice dentro del SFP. Se reconoce el patrón geométrico e identifican los tres sectores en que se puede dividir el SFP según el espesor de desarrollo del fallamiento. Se reconocen fallas de origen tectónico (ftec) que presentan mayores rechazos y afectan a gran parte de la columna sedimentaria cretácica. Los límites oeste y este restringen el espesor total de la faja a 32 km en la zona de la sísmica 3D.

superficie dejando de manifiesto la inactividad tectónica general del área de estudio, con excepción de algún segmento de falla individual en el Mioceno. Estos eventos/pulsos de MTD han sido mapeados sobre datos 2D y superan ampliamente los 5.000 km² de superficie, sobrepasando la zona de estudio. Otros depósitos de características similares y correlacionables en edad fueron reconocidos (Arismendi *et al.* 2019) en sectores más profundos de la cuenca, pero alcanzando dimensiones de hasta 30.000 km².

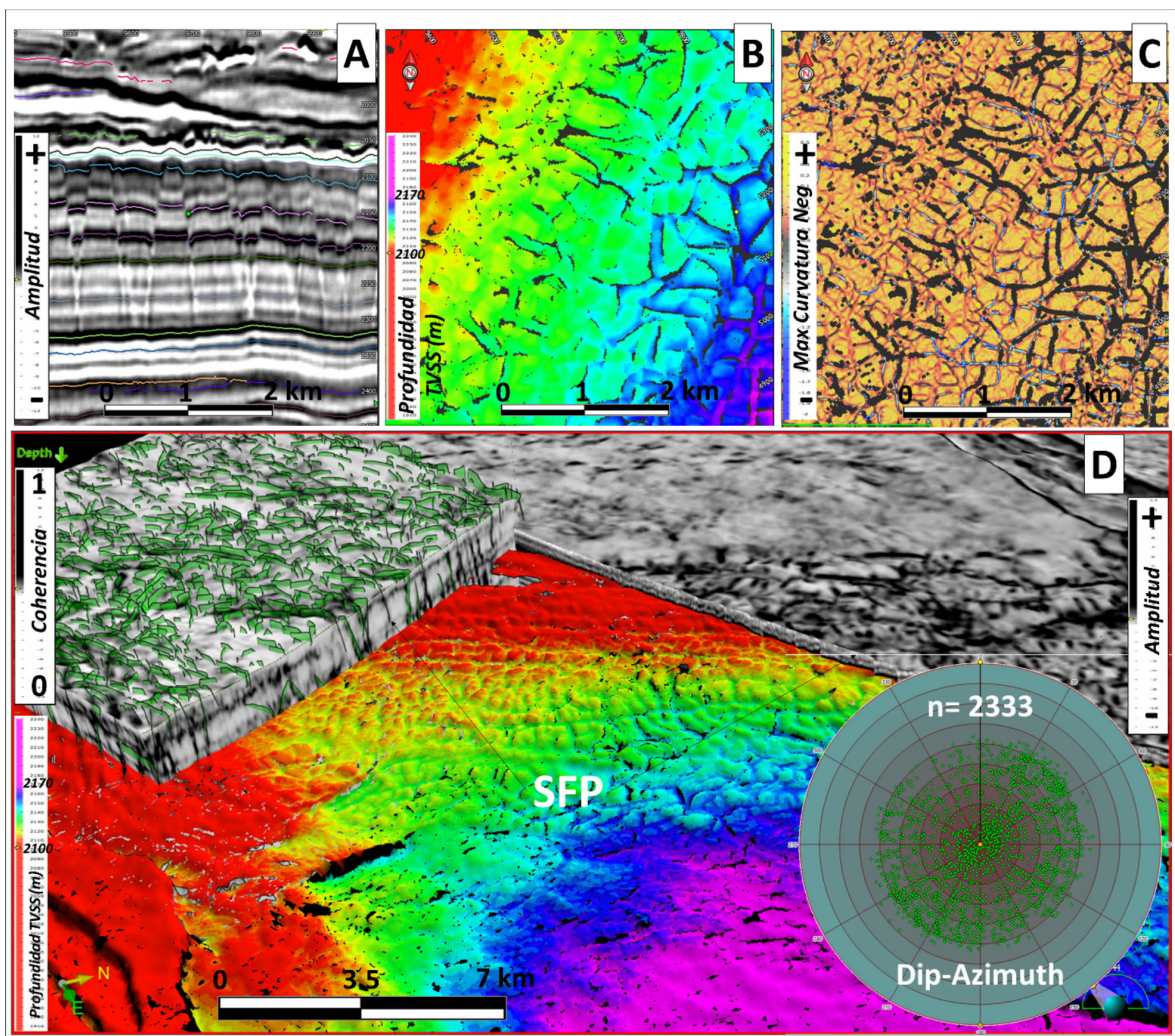


Figura 3. Caracterización del SFP en 3D. A) Vista en sección de la secuencia estratigráfica afectada por un intenso fallamiento que se caracteriza por fallas directas, de bajo rechazo (15 metros en promedio) y alto ángulo (entre 40 y 80 grados). B) El SFP sobre un mapa estructural. En una vista en planta se reconoce un claro patrón poligonal, en donde cada polígono individual tiene una extensión entre 200 y 600 metros sobre su diagonal. C) El SFP sobre un mapa de máxima curvatura negativa. D) Vista 3D del SFP. Sobre el cubo de coherencia se observan los planos de fallas mapeados con una distribución casi anisotrópica como lo muestra la red estereográfica de Dip-Azimuth (para una muestra de 2.333 fallas).

DISCUSIÓN

A partir del reconocimiento de un sistema de fallas poligonales (SFP) y la posibilidad de caracterizarlo gracias al dato sísmico 3D, surgen interrogantes acerca de su origen, propagación y estado de equilibrio. Como fuera mencionado inicialmente, el abanico de hipótesis es amplio. Sin embargo, otros elementos identificados y analizados en conjunto pueden simplificar significativamente las opciones.

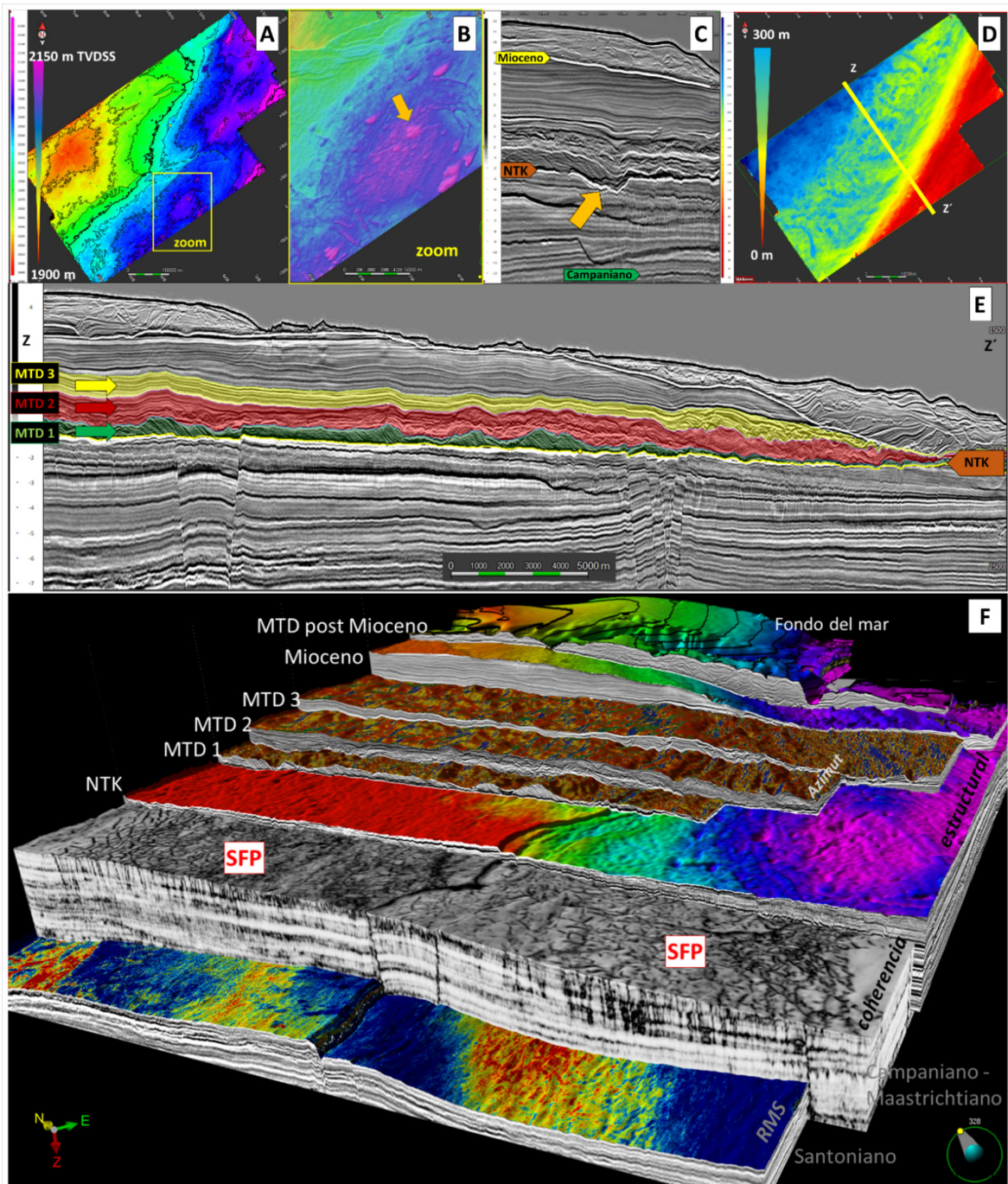


Figura 4. Caracterización del MTD asociado al marcador NTK. A) Mapa estructural del marcador sísmico NTK. B) Mapa estructural de detalle (zoom) del marcador sísmico NTK. Se pueden reconocer numerosos rasgos erosivos asociados a los MTD. C) Sección arbitraria 3D, se resalta el carácter erosivo y patrón de apilamiento interno de tipo caótico de uno de los eventos/pulsos (flecha naranja en Figura 4 B) del MTD. D) Mapa de espesor total de los tres eventos/pulsos de MTD identificados. E) Sección arbitraria 3D, se reconocen al menos tres eventos/pulsos de MTD sobre el marcador sísmico NTK. F) Vista 3D de los eventos/pulsos de MTD sobre el marcador sísmico NTK.

Modelo de generación de fallas poligonales en el Alto Externo del Colorado

En la Figura 5, la presencia de la discordancia NTK (límite superior de SFP) y sus características erosivas podrían vincularse genéticamente a los eventos/pulsos de MTD. También se cuenta con el conocimiento regional de los paleo ambientes depositacionales, y por ser un ámbito silicoclástico distal (Gerster *et al.* 2011), predominan los procesos de decantación de partículas de grano fino tamaño arcilla. La tasa de sedimentación espacio-temporal es baja para la región de estudio y se la adopta como normal o de referencia. Se asumen sedimentos poco litificados. En contraposición, los procesos generadores de los MTD (Mulder *et al.* 2014; Bull 2020; Posamentier y Martinsen 2011) son casi instantáneos y, por lo tanto, de alta tasa de sedimentación. Su génesis involucra expulsión de agua de los sedimentos involucrados y, por ende, el resultado es un depósito más denso que el original. De esta manera se estarían incorporando por encima de sedimentos poco litificados otros de mayor densidad, generando así una compactación acelerada y expulsión de fluidos. Estas asunciones hacen suponer que la hipótesis más probable sea la de inversión de densidad como disparador del SFP en la sucesión cretácica superior.

Luego del MTD sobre yacente a la discordancia NTK, se reconoce un nuevo ciclo de sedimentación normal o de referencia (baja tasa de sedimentación), seguido por un nuevo evento MTD sobre una discordancia regional (marcador Mioceno) de carácter erosivo. Sin embargo, en esta nueva sucesión estratigráfica no se habrían generado fallas poligonales, aun manteniendo los mismos postulados que en la sucesión estratigráfica anterior. Al menos dos hipótesis podrían explicar esta diferencia: 1) el espesor de MTD debería alcanzar un cierto umbral para ejercer una presión capaz de generar una compactación suficientemente alta como para vencer la presión poral y así lograr la expulsión de fluidos; 2) las fallas poligonales se encuentran en un grado evolutivo de baja madurez y la resolución del método sísmico no es suficiente para identificarlo. La escala de tamaño del patrón de los SFP podría estar asociado al gradiente de reducción de contenido de agua (Berndt *et al.* 2012).

La magnitud y ciclicidad de los influjos de sedimentos de edad terciaria a la cuenca podrían estar vinculados con la tectónica Andina. La subducción en la Cordillera de los Andes comienza hacia el Jurásico (régimen extensional), tal como lo evidencian las rocas magmáticas de arco alojadas en la cordillera a estas latitudes, continuando con una etapa de *sag*. Hacia el Cretácico Superior, se registra el primer levantamiento de la Cordillera de los Andes, generando los depósitos del Grupo Neuquén, que aportan datos en su base de unos 90 Ma (comienzo de la sedimentación sinorogénica) (Tunik *et al.* 2010; Mescua *et al.* 2014). A partir de datos de termo cronología (Rojas Vera *et al.* 2015; Folguera *et al.* 2015; Sánchez *et al.* 2018; Galetto *et al.* 2021), en el levantamiento de los Andes Neuquinos se registran edades que van desde los 100 Ma a los 45 Ma, coincidente con el clímax y expansión de las cuencas de *foreland* en todo el orógeno andino (Horton 2018).

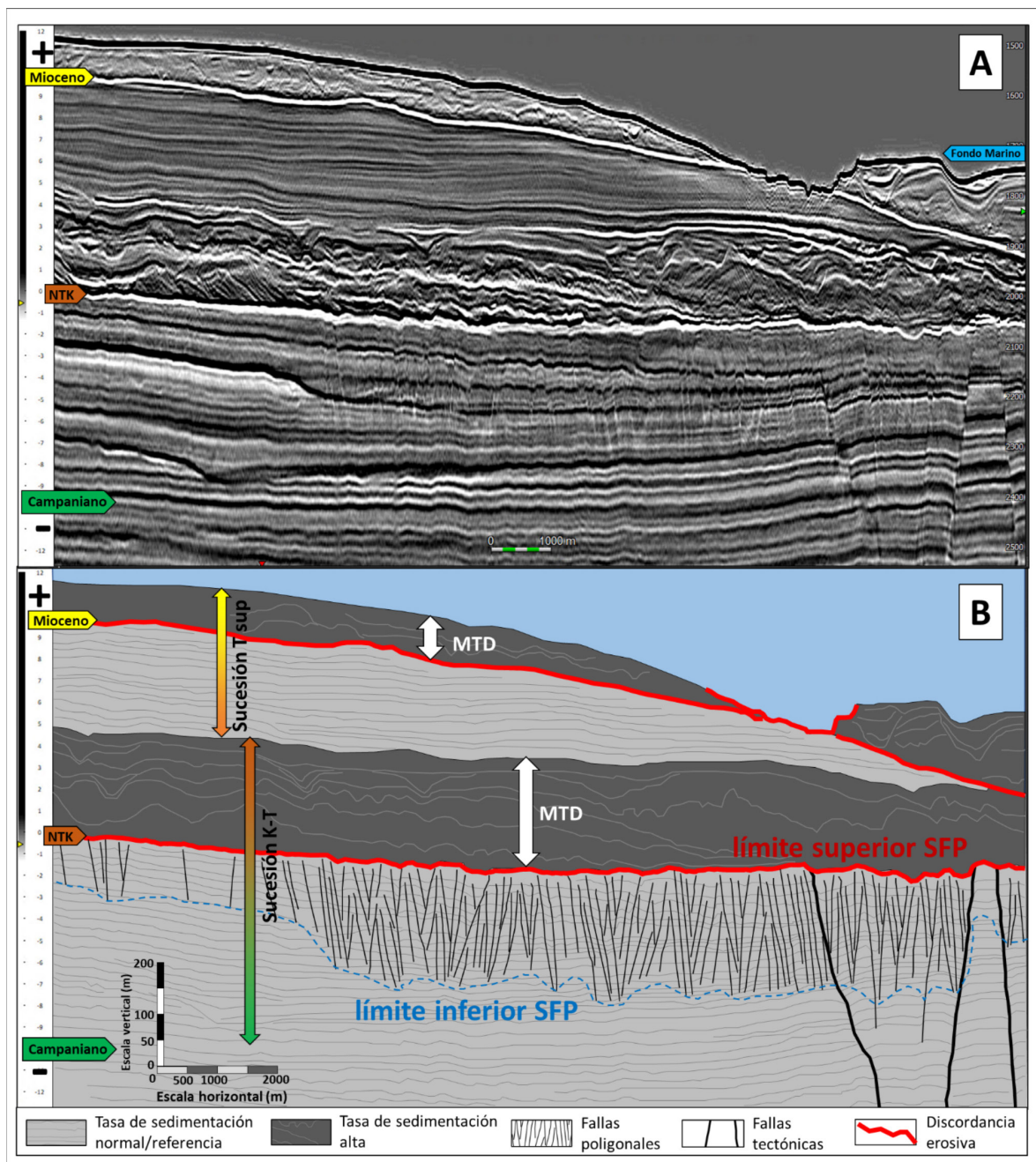
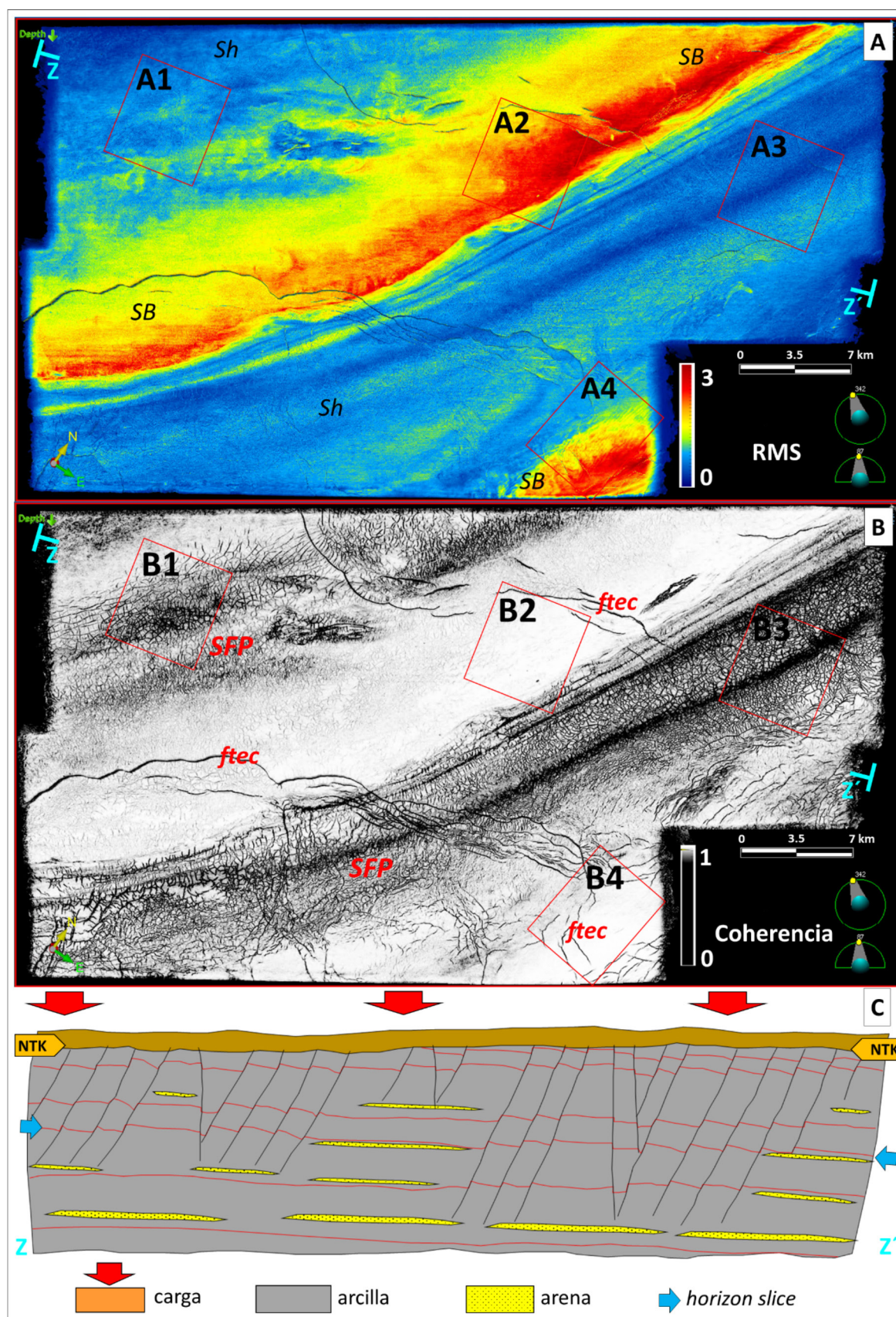


Figura 5. Modelo de generación de fallas poligonales. A) Sección sísmica arbitraria 3D sin interpretar de la zona de estudio. B) Esquema geológico interpretado sobre sísmica 3D. Se reconocen dos sucesiones estratigráficas (K-T y T Sup.) caracterizadas por una sucesión con una tasa de sedimentación normal (o de referencia) erosionada por un MTD de alta tasa de sedimentación. El SFP se encontraría desarrollado sólo en la sucesión K-T y asociado a la discordancia erosiva NTK (límite superior).

Durante este intervalo de tiempo se pudieron haber registrados pulsos de alta tasa de sedimentación que llegaron hasta el margen continental. Actualmente existen registros de eventos catastróficos como el desagote del Lago Carri Lauquén por actividad neotectónica (Ramos 2017; Groeber 1916), que generaron inundaciones y altas tasas de sedimentación a lo largo de toda la Cuenca del Río Colorado, alcanzando el Océano Atlántico.



Propagación del SFP

Otro punto destacable que surge de la interpretación del sistema de fallas poligonales en el Alto Externo del Colorado es su desarrollo en profundidad. Así como se reconoció un claro límite vertical (discordancia erosiva NTK) para el SFP, se destacó que el límite inferior no es uniforme y pudo dividirse en 3 fajas según el espesor del desarrollo del fallamiento (Figs. 2 A y B). La dirección de estas fajas es SO-NE y son perpendiculares al sentido en que profundiza la cuenca y que evolucionan los ambientes depositacionales. La hipótesis que podría ajustarse a las observaciones es aquella que propone que la propagación de las fallas poligonales se detiene frente a una pronunciada variación de facies (Cartwright 2011), por ejemplo, desde un intervalo predominantemente rico en arcillas (SFP presentes) a otro intervalo rico en arenas (SFP ausentes). La propagación de las fallas también se puede ver alterada frente a intercalaciones de unidades delgadas de arenas en unidades estratigráficas potentes de grano fino, ya que el desarrollo del fallamiento se concentrará en el grano fino (Stuevold *et al.* 2003).

La zona de estudio no cuenta con pozos para calibraciones litológicas pero el análisis de la interpretación sísmica en detalle permitió inclinarse por la hipótesis de variación de facies para la propagación de fallas. Teniendo en consideración que la sucesión estratigráfica afectada por un SFP se correlaciona al intervalo Campaniano-Masstrichtiano y que es asignada a un ambiente marino somero de la Formación Pedro Luro (Gerster *et al.* 2010) que se encuentra en un cortejo transgresivo (Kress *et al.* 2021) se logró analizar la interpretación sísmica de un modo integral. En la Figura 6 se sintetiza el modelo de propagación de las fallas poligonales. Uno de los ejemplos interpretados (Fig. 6 A) muestra un depósito de barras de *shoreface* (grano grueso) en un ambiente dominado por sedimentación por suspensión (grano fino). En los sedimentos gruesos, la propagación del fallamiento poligonal no es eficiente (Fig. 6 B).

Figura 6. Propagación de fallas poligonales. A) Atributo de RMS generado con ventana de 5 muestras (~20 metros) sobre un horizon slice debajo de la discordancia erosiva NTK. Se reconocen unas geoformas que se las pueden asociar a barras arenosas (SB= sand bars) de offshore en un paleoambiente de plataforma donde predominan procesos de decantación y sedimentos finos tamaño arcilla (Sh=shale). B) Atributo de Coherencia generado con una ventana de 5 muestras (~20 metros) sobre un horizon slice debajo de la discordancia erosiva NTK. Se reconocen sectores una intensidad variable de fallamiento poligonal (SFP), así como también fallamiento de origen tectónico (ftec). En los recuadros A1-B1 y A3-B3 se reconoce que las zonas donde predominan los sedimentos finos se encuentran intensamente deformadas por el sistema de fallas poligonales. En los pares A2-B2 y A4-B4 se reconoce que en las zonas con predominio de arenas sólo se propagan el fallamiento de origen tectónico y no el fallamiento poligonal. C) Modelo esquemático de la secuencia cretácica superior afectada por fallas poligonales (no tectónicas), donde se resalta la propagación del fallamiento más eficientemente dentro de los sedimentos de grano fino.

Estado de equilibrio del SFP

La hipótesis de inversión de densidad como generador de fallas poligonales plantea el cuestionamiento acerca si las secuencias estratigráficas sometidas a una compactación repentina (producto de una alta tasa de sedimentación por MTD) pueden estar en equilibrio desde el punto de vista de presiones porales, es decir, presión normal o anormal (Bowers, 2002).

En la Figura 7 se puede observar sobre una sección sísmica en amplitud (+/-) la superposición de las velocidades interválicas (m/s). Si bien el método de Eaton (Eaton 1975) es el más utilizado para la estimación de la presión de poro, éste se calcula a partir del tiempo de tránsito registrado en perfiles de pozos. Por la ausencia de pozos en la región para poder estimar presiones y calibrar las velocidades interválicas, se decidió utilizarlas de modo cualitativo. La resolución de las velocidades interválicas interpretadas (200 metros por lado en la horizontal y 20 m en la vertical) permitió identificar un aumento normal de las velocidades con el incremento de la profundidad. Un mapa de velocidades interválicas en las secuencias estratigráficas subyacentes a los MTD reconocidos no muestra variaciones laterales significativas. Esto indicaría que las presiones se habrían redistribuido en el tiempo, dejando al sistema en equilibrio o con presión normal.

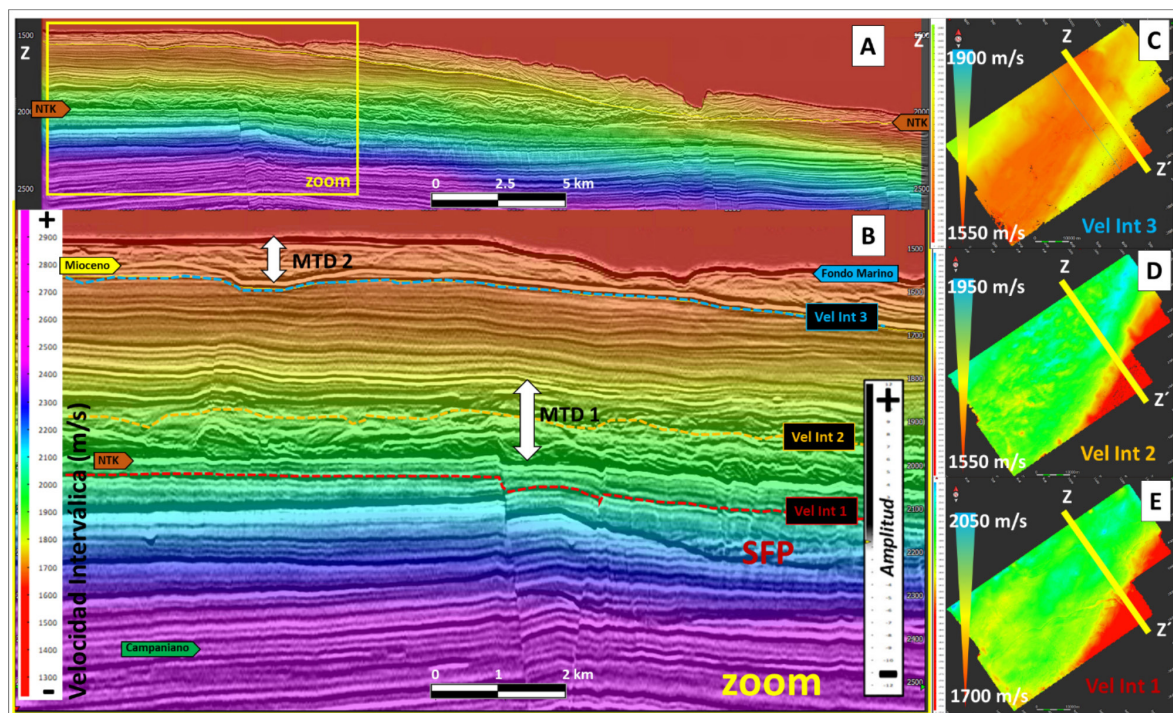


Figura 7. Estado de equilibrio del SFP. A) sección sísmica de orientación NO-SE donde se superponen el dato de amplitud (+/-) y velocidades interválicas (m/s) generadas para el PSDM. B) Vista en detalle donde se reconocen los principales marcadores sísmicos de la zona de estudio, los MTD y el SFP. Se reconoce un aumento gradual de las velocidades interválicas con el aumento de la profundidad, no se observan anomalías de velocidad. Los mapas en C, D y E muestran las velocidades interválicas extraídas sobre horizon slice en las zonas de SFP, MTD 1 y debajo de MTD respectivamente. En todos ellos las variaciones laterales de velocidades interválicas son suaves y no se observan anomalías.

CONCLUSIONES

Sobre la base de la integración de las observaciones realizadas en la interpretación sísmica de datos 2D y 3D se reconoció un sistema de fallas poligonales (SFP) en el Cretácico Superior que podría desarrollarse sobre una extensión de más de 5.000 km² en la región del Alto Externo de la Cuenca del Colorado. La caracterización se realizó sobre un dato sísmico 3D PSDM de alta resolución, identificando un patrón poligonal que se desarrolla en una faja de orientación NNE-SSO, con 32 km de ancho y 74 km de largo. Este fallamiento afecta a secuencias marinas con predominio de grano fino, asociadas a un paleo ambiente de plataforma externa y correlacionables con la Fm. Pedro Luro (Cretácico Superior-Paleoceno). Su origen está relacionado con procesos diagenéticos y se sobre impone a la deformación tectónica.

El modelo genético propuesto vincula a este SFP con el primer pulso de levantamiento de la Cordillera de los Andes y se asocia a la discordancia erosiva NTK como respuesta a múltiples eventos/pulsos de alta tasa de sedimentación, del tipo de depósitos transportados en masa (MTD) reconocidos y caracterizados en este trabajo. Si bien hay un segundo pulso de levantamiento en el Mioceno, no habría tenido el impacto (en esta región) del pulso Cretácico Superior. Los MTD serían responsables de una inversión de densidades, generando una importante carga sobre sedimentos poco consolidados y su posterior compactación (casi instantánea) y escape de fluidos desde las secuencias de grano fino.

Se reconoció que la propagación del fallamiento en profundidad sobre las secuencias marinas es variable. En zonas donde predominan un apilamiento de secuencias litológicas de grano fino, el fallamiento tiene un desarrollo vertical mayor que en zonas donde se intercalan secuencias litológicas arenosas o menos compactables. Por este motivo se pudo subdividir la zona afectada por el SFP en tres sub-fajas paralelas según el espesor fallado, que varía entre 100 y 270 metros. Si bien la región no cuenta con pozos perforados para calibrar la litología, la paleo geomorfología sísmica interpretada fue una herramienta muy útil para disminuir la incertidumbre.

El análisis cualitativo de las velocidades intervállicas del dato PSDM sugirieron que las secuencias litológicas afectadas por los MTD tendrían presiones porales en equilibrio con el sistema, ya que no se observan anomalías de velocidades en el sentido vertical y lateral. Las variaciones de las velocidades intervállicas aumentan de forma suave y gradual con la profundidad.

Como los SFP poseen una gran extensión lateral y su formación está fuertemente relacionado con la litología y el tamaño de grano, es posible utilizarlos como una herramienta de correlación estratigráfica.

Investigaciones futuras podrán profundizar su entendimiento e impacto en el sistema petrolero local.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a YPF S.A. por su apoyo en las investigaciones en el offshore argentino y por el permiso para publicar el trabajo.

Los autores agradecen también a los equipos de Exploración de YPF, Equinor y Shell por su estrecha colaboración y soporte; a los revisores que permitieron mejorar la calidad de este manuscrito y un agradecimiento especial a Pedro Kress por las discusiones y contribuciones.

REFERENCIAS CITADAS

- Anka, Z., Loegering, M.J., di Primio, R., Marchal, D., Rodríguez, J.F. y Vallejo, E., 2014. Distribution and origin of natural gas leakage in the Colorado Basin, offshore Argentina Margin, South America: seismic interpretation and 3D basin modelling. *Geologica Acta*, Vol.12 N4, Alago Special Publication. December 2014, p.269-285.
- Arisemendi, A., Flores, G., Kress, P., Gerster, R. y Bolatti, N., 2019. Huge Mass Transport Complexes in the Argentina Basin, Offshore South America: Morphology and Seismic Facies. Abstract and Oral Presentation, AAPG, International Conference and Exhibition, 27-30 August Buenos Aires, Argentina.
- Autin, J., Scheck-Wenderoth, M., Loegering, M.J., Anka, Z., Vallejo, E., Rodríguez, J.F., Dominguez, F., Marchal, D., Reichert, C., di Primio, R. y Götze, H.-J., 2013. Colorado Basin 3D structure and evolution, Argentine passive margin. *Tectonophysics*, 604, p. 264–279. doi:10.1016/j.tecto.2013.05.019
- Belotti, H., Pagan, F., Mazas, A. Pérez, Agüera, M., Rodríguez, J., Porras, J., Köhler, G., Weiner, G., Conforto, G. y Cagnolatti, M., 2012. Geologic Interpretation and Assessment of Early Cretaceous Shale Oil and Gas Potential in Austral Basin, Santa Cruz, Argentina. [Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, 12-14 August 2013, p. 926–935. doi:10.1190/urtec 2013-094
- Berndt, C.; Jacobs, C., Evans, A., Gay, A., Elliott, G., Long, D. y Hitchen, K., 2012. Kilometer-scale polygonal seabed depressions in the Hatton Basin, NE Atlantic Ocean: Constraints on the origin of polygonal faulting, p. 332-334. doi:10.1016/j.margeo.2012.09.013
- Bowers, G., 2002. Detecting high overpressure. *The Leading Edge*, 21(2), p. 174-177.
- Bull, S., Browne, G.H., Arnot, M.J., Strachan y Lorna J., 2020. Influence of mass transport deposit (MTD) surface topography on deep-water deposition: an example from a predominantly fine-grained continental margin, New Zealand. *Geological Society, London, Special Publications*, SP500-2019-192, p. 2-47. doi:10.1144/SP500-2019-192
- Cartwright, J. A., 1994a. Episodic basin-wide fluid expulsion from geopressed shale sequences in the north-sea basin. *Geology* 22, p. 447–450. doi: 10.1130/0091-7613(1994)0222.3.CO;2
- Cartwright, J. A., 1994b. Episodic basin-wide hydrofracturing of overpressured early cenozoic mudrock sequences in the north-sea basin. *Mar. Petrol. Geol.* 11, p. 587–607. doi: 10.1016/0264-8172(94)90070-1

- Cartwright, J., James, D., y Bolton, A., 2003. The genesis of polygonal fault systems: a review. *Subsurf. Sedim. Mobilizat.* 216, p. 223–243. doi: 10.1144/GSL.SP.2003.216.01.15.
- Cartwright, J., 2011. Diagenetically induced shear failure of fine-grained sediments and the development of polygonal fault systems. *Mar. Petrol. Geol.* 28, p. 1593–1610. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2011.06.004
- Clausen, J., Gabrielsen, R., Reksnes, P., y Nysaether, E., 1999. Development of intraformational (Oligocene–Miocene) faults in the northern North Sea: influence of remote stresses and doming of Fennoscandia. *J. Struct. Geol.* 21, p. 1457–1475. doi: 10.1016/S0191-8141(99)00083-8
- Dewhurst, D. N., Cartwright, J. A. y Lonergan, L., 1999. The development of polygonal fault systems by syneresis of colloidal sediments. *Mar. Petrol. Geol.* 16, p. 793–810. doi: 10.1016/S0264-8172(99)00035-5
- Eaton, B. A., 1975. The equation for geopressure prediction from well logs. SPE 5544 (Society of Petroleum Engineers of AIME, 1975), p. 1-11. doi:10.2118/5544-MS
- Folguera, A., Bottesi, G., Duddy, I., Martín-González, F., Orts, D., Sagripanti, L., Rojas Vera, E.A. y Ramos, V.A., 2015. Exhumation of the Neuquen Basin in the southern Central Andes (Malargüe fold and thrust belt) from field data and low-temperature thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 64 (2015) p. 381-398. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2015.08.003>
- Galetto, A., Georgieva, V., García, V. H., Zattin, M., Sobel, E. R. y Glodny, J., 2021. Cretaceous and Eocene rapid cooling phases in the Southern Andes (36°–37°S): Insights from low-temperature thermochronology, U-Pb geochronology, and inverse thermal modeling from Domuyo area, Argentina. *Tectonics*, 40, p. 1-30, e2020TC006415. <https://doi.org/10.1029/2020TC006415>
- Gerster, R., Welsink, H., Ansa, A. y Raggio, F., 2011. Cuenca del Colorado. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Simposio Cuencas Argentinas: Visión actual. IAPG, p. 65-80.
- Goulty, N., 2001. Polygonal fault networks in fine-grained sediments– an alternative to the syneresis mechanism. *First Break* 19, p. 69–73. doi: 10.1046/j.1365-2397.2001.00137.x
- Goulty, N., 2002. Mechanics of layer-bound polygonal faulting in fine grained sediments. *J. Geol. Soc. Lond.* 159, p. 239–246. doi: 10.1144/0016-764901-111
- Goulty, N., 2008. Geomechanics of polygonal fault systems: a review. *Petrol. Geosci.* 14, p. 389–397. doi: 10.1144/1354-079308-781
- Groeber, P. 1916. Informe sobre las causas que han producido las crecientes del río Colorado (territorios del Neuquén y La Pampa) en 1914. Dirección General de Minas, Geología e Hidrología, Boletín 11, Serie B (Geología): p. 1-29, Buenos Aires.
- Henriet, J., De Batist, M., Van Vaerenbergh, W., y Verschuren, M., 1988. Seismic facies and clay tectonic features of the Ypresian clay in the southern North Sea. *Bull. Belgische Veren. Geol.* 97, p. 457–472.
- Higgs, W. y McClay, K., 1993. Analogue sandbox modelling of Miocene extensional faulting in the Outer Moray Firth. *Geol. Soc. Lond.* 71, p. 141–162. doi: 10.1144/GSL.SP.1993.071.01.07
- Horton, B.K., 2018. Sedimentary record of Andean Mountain building. *Earth Science Reviews* 178, p. 279-309. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2017.11.025>

- Horton, B. K., 2018. Tectonic regimes of the central and southern Andes: Responses to variations in plate coupling during subduction. *Tectonics*, 37, p. 402–429. <https://doi.org/10.1002/2017TC004624>
- Kress, P., Catuneanu, O., Gerster, R. y Bolatti, N., 2021. Tectonic and stratigraphic evolution of the Cretaceous Western South Atlantic. *Marine and Petroleum Geology*, 133, p.105-197. doi:10.1016/j.marpetgeo.2021.1051
- Laurent, D., Gay, A., Baudon, C., Berndt, C., Soliva, R. y Planke, S., 2012. High-resolution architecture of a polygonal fault interval inferred from geomodel applied to 3D seismic data from the Gjallar Ridge, Vøring Basin, Offshore Norway. *Mar. Geol.* 332, p. 134–151. doi: 10.1016/j.mar-geo.2012. 07.016
- Loefering, M.J., Anka, Z., Autin, J., di Primio, R., Marchal, D., Rodríguez, J.F., Franke, D. y Vallejo E., 2013. Tectonic evolution of the Colorado Basin, offshore Argentina, inferred from seismic-stratigraphy and depositional rates analysis. *Tectonophysics*, 604, p. 245–263. doi:10.1016/j.tecto.2013.02.008
- Lovecchio, J.P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N., Kress, P., Gerster, R. y Ramos, V., 2018. Multi-stage *rifting* evolution of the Colorado basin (offshore Argentina): Evidence for extensional settings prior to the South Atlantic opening. *Terra Nova*, p. 1-24. DOI: 10.1111/ter.12351
- Lovecchio, J.P., Rohais, S., Joseph, P., Bolatti, N. y Ramos, V., 2020. Mesozoic *rifting* evolution of SW Gondwana: a poly-phased, subduction- related, extensional history responsible for basin formation along the Argentinean Atlantic margin. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, 2020, 203, p.103-138. 10.1016/j.earscirev.2020.103138. hal-02553358
- Mescua, J.F., Giambiagi, L.B., Tassara, A., Gimenez, M. y Ramos, V.A., 2014. Influence of pre-Andean history over Cenozoic foreland deformation: Structural styles in the Malargüe fold-and-thrust belt at 35°S, Andes of Argentina. *Geosphere*, Vol. 10, number 3, p. 1-25; doi:10.1130/GES00934.1
- Mulder, T. y Etienne, S., 2014. Discovery of an outcropping Mass Transport Deposit (MTD) in the Palaeogene subalpine synclines of southeastern France: Implications on flexural sub-basin deformation. *Comptes Rendus Geoscience*, 346(1-2), p. 37–44. doi:10.1016/j.crte.2014.02.001
- Pinto, J. A., González, D.L., González, Á.P., Zapata, R.A. y Mella, P.E., 2018. Polygonal Fault System in the Paleogene of the Magallanes Foreland Basin, Southern Chile. *Unconventional Resources Technology Conference*; Houston; Texas; USA, p.1-16. doi:10.15530/urtec-2018-2903108
- Posamentier, H.W. y Martensen, O.J., 2011. The character and genesis of submarine mass-transport deposits: insights from outcrop and 3D seismic data. In: *Mass transport Deposits in Deepwater Settings* (Ed. by R.G. Shipp, P. Weimer, H.W. Posamentier), Spec. Publ. SEPM, 96, p. 7-38.
- Ramos, V.A., 2017. El aluvión del Río Colorado de 1914: Primera contribución geológica de Groeber desde su llegada a la Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74 (1), p. 9-18.
- Rojas Vera, E.A., Mescua, J., Folguera, A., Becker, T.P., Sagripanti, L., Fennell, L., Orts, D. y Ramos, V.A., 2015. Evolution of the Chos Malal and Agrio fold and thrust belts, Andes of Neuquen: Insights from structural analysis and apatite fission track dating. *Journal of South American Earth Sciences*, p. 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.001>

- Sánchez, N. P., Coutand, I., Turienzo, M., Lebinson, F., Araujo, V., y Dimieri, L. (2018). Tectonic evolution of the Chos Malal fold-and-thrust belt (Neuquén Basin, Argentina) from (U-Th)/He and fission track thermochronometry. *Tectonics*, 37, p.1-23. <https://doi.org/10.1029/2018TC004981>
- Shin, H., Santarnarina, J. C., y Cartwright, J. A., 2008. Contraction-driven shear failure in compacting uncemented sediments. *Geology* 36, p. 931–934. doi: 10.1130/G24951A.1
- Stuevold, L. M., Faereth, R. B., Arnesen, L., Cartwright, J., y Möller, N., 2003. Polygonal faults in the Ormen Lange field, Møre basin, offshore mid Norway. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 216, p. 263–281. doi: 10.1144/GSL.SP.2003.216.01.17
- Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V.A., 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquen Basin: constraints on the Andean uplift from U e Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics* 489, p. 258-273.
- Watterson, J., Walsh, J., Nicol, A., Nell, P. y Bretan, P., 2000. Geometry and origin of a polygonal fault system. *J. Geol. Soc. Lond.* 157, p. 151–162. doi: 10.1144/jgs.157.1.151
- Welsink, H., 2010. Regional tecno-stratigraphic framework offshore Argentina. YPF, Informe interno inédito.
- Wrona, T., Magee, C., Jackson, C.A-L., Huuse, M. y Taylor, K.G., 2017, Kinematics of polygonal fault systems—observations from North Sea: *Frontiers in Earth Science*, v. 5, p. 1-21.

