

REMOVILIZACIÓN E INYECCIÓN DE ARENA EN EL PALEOCENO-EOCENO DE LA CUENCA DE ANTEPAÍS MAGALLANES, CHILE: CARACTERÍSTICAS E IMPLICANCIAS PARA LA EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN PETROLÍFERA DEL PALEÓGENO

Jesús A. Pinto¹, Danilo L. González¹, Pablo E. Mella², Ricardo A. Zapata¹, Guillermo F. Aguirre¹,
Aldo A. Carpinelli², Enrique A. Zurita²

1: ENAP Magallanes, jpintor@mag.enap.cl, dagonzalez@mag.enap.cl, rzapatag@mag.enap.cl, gaguirre@mag.enap.cl

2: ENAP SIPETROL, pmellas@mag.enap.cl, acarpine@mag.enap.cl, ezurita@mag.enap.cl

Palabras clave: Chile, Cuenca de antepaís Magallanes, Paleógeno, removilización e inyección de arena

ABSTRACT

Sand remobilization and injection is a common geological process in deep-water depositional systems in many basins worldwide. Recent outcrop observations and drilling, together with 3D seismic interpretations, indicate widespread remobilization and injection of sandy sediments in the Paleocene-Eocene of the Magallanes foreland Basin. The purpose of this contribution is twofold: (1) to characterize the remobilized and injected features and (2) to highlight its influence on the Tertiary petroleum system of the basin.

In general, the Paleocene-Eocene stratigraphy of the Basin is dominated by marine fine-grained terrigenous punctuated by coarse-grained material, especially sandstones. In outcrops, 5 mm to ~1 m thick sandstone intrusions occur in mudstones and exhibit both simple and complex geometries with either upward or downward propagation. Contacts between injected sands and host strata are consistently sharp. Rafted clasts of the host lithology are locally embedded in the intrusions.

In the subsurface, the study section lies at a depth of ~2300-6000 m and old and new drilling indicate that the section is locally overpressured. Seismically, the expression of interpreted deep-water channels in the foreland ramp domain is commonly chaotic but locally a wing-like amplitude anomaly is clearly seen. Some of these features were recently penetrated by several exploration wells. Well log correlations and recovered drill cores indicate they are gas-saturated channelized sandstones with evidence of remobilization and clastic injection, implying a new type of potential reservoirs for the basin. In well logs, where the reservoirs have been remobilized, the sands tend to occur in thick packages and the gamma-ray shape is commonly blocky. Farther west, in the foredeep component, gas shows and blowouts were recorded in similar deposits.

The occurrence, both in outcrop and subsurface, of remobilized and injected sandstones in the Paleogene of the basin suggests that these events are widespread and more likely of regional scale. Because post-depositional deformation of a primary deposit can control reservoir architecture and maximum recovery, an understanding of the geometry and distribution of these hybrid-type reservoirs may provide important clues for future reservoir management, well planning and implementation of secondary recovery techniques (such as water injection). In addition, a better knowledge of these deposits may provide the base for more appropriate conceptual and numerical models for flow simulation at basin and reservoir scales. Although the Magallanes Basin is in a mature stage in the light of Cretaceous conventional resources, under the umbrella of the Tertiary potential, it continues to be attractive for further exploration.

INTRODUCCIÓN

La removilización pos-depositación e inyección de arena es un evento geológico común en muchas cuencas a escala global (Hurst y Cartwright 2007; Braccini *et al.* 2008; Huuse *et al.* 2010). Los depósitos y estructuras resultantes han sido documentados tanto en el subsuelo como en afloramientos, en sucesiones precámbricas a recientes (Hurst y Cartwright 2007), que representan una gran variedad de ambientes sedimentarios, incluyendo continentales (e.g., Larsen and Mangerud 1992; Williams 2001; Netoff 2002; Chan *et al.* 2007) y más comúnmente marinos (e.g., Jolly y Lonergan 2002; Jonk *et al.* 2005; Hurst y Cartwright 2007; Weimer and Slatt 2007; Cobain *et al.* 2017). Ejemplos particularmente instructivos ocurren en depósitos terciarios del Mar del Norte (e.g., Lonergan *et al.* 2000; Purvis *et al.* 2002; Huuse *et al.* 2009, 2010), donde los sistemas de removilización e inyección de arena pueden abarcar áreas de decenas a miles de kilómetros cuadrados.

La removilización e intrusión clástica no solo pueden modificar la geometría original de un cuerpo sedimentario (e.g., Dixon *et al.* 1995), sino también yuxtaponer litologías de manera más compleja y menos predecible dependiendo de la naturaleza del campo de esfuerzo local (e.g., Nichols 1995; Beyer y Griffith 2016). En esta contribución usaremos el término “depósito o yacimiento híbrido” (Weimer y Slatt 2007) para referirnos a un depósito primario deformado por estos procesos debido a que su geometría y distribución actual difieren de las originales. El término “inyectita” o “intrusión clástica” es reservado solo para las estructuras formadas por la intrusión forzosa y emplazamiento de arena en niveles adyacentes (roca caja) (e.g., Braccini *et al.* 2008). La relación estratigráfica de la intrusión con la roca caja puede ser discordante (dique) o concordante (sill o filón capa) (e.g., Jolly y Lonergan 2002).

Entre los principales eventos que pueden promover la inestabilidad, removilización e inyección de arena se encuentran ondas sísmicas producidas por terremotos o impactos de meteoritos (Cartwright 2010), carga cíclica por oleaje de tormentas (Allen 1982), esfuerzo tectónico (Winslow 1983), sobrepresión localizada relacionada a procesos de depositación tal como tasas altas de sedimentación (Dewille *et al.* 2010) y la generación y migración de hidrocarburos sobre-presurizados desde niveles más profundos de la cuenca (Jolly y Lonergan 2002; Cartwright 2010).

Desde el punto de vista de la exploración petrolera, estos cuerpos son de interés para la industria ya que local o regionalmente pueden contener cantidades comerciales de hidrocarburos, actuar como vías de migración de fluidos y comprometer la capacidad de sellos para el entrapamiento de fluidos (Hurst y Cartwright 2007; Huuse *et al.* 2010).

En la porción chilena de la Cuenca de antepaís Magallanes (Fig 1), las inyecciones clásticas se encuentran ampliamente distribuidas de norte a sur y han sido previamente documentadas en afloramientos tanto del Cretácico Superior como del Cenozoico (e.g., Winslow 1983; Hubbard *et al.* 2007). El complejo de diques arenosos parece extenderse mucho más al sur, en territorio

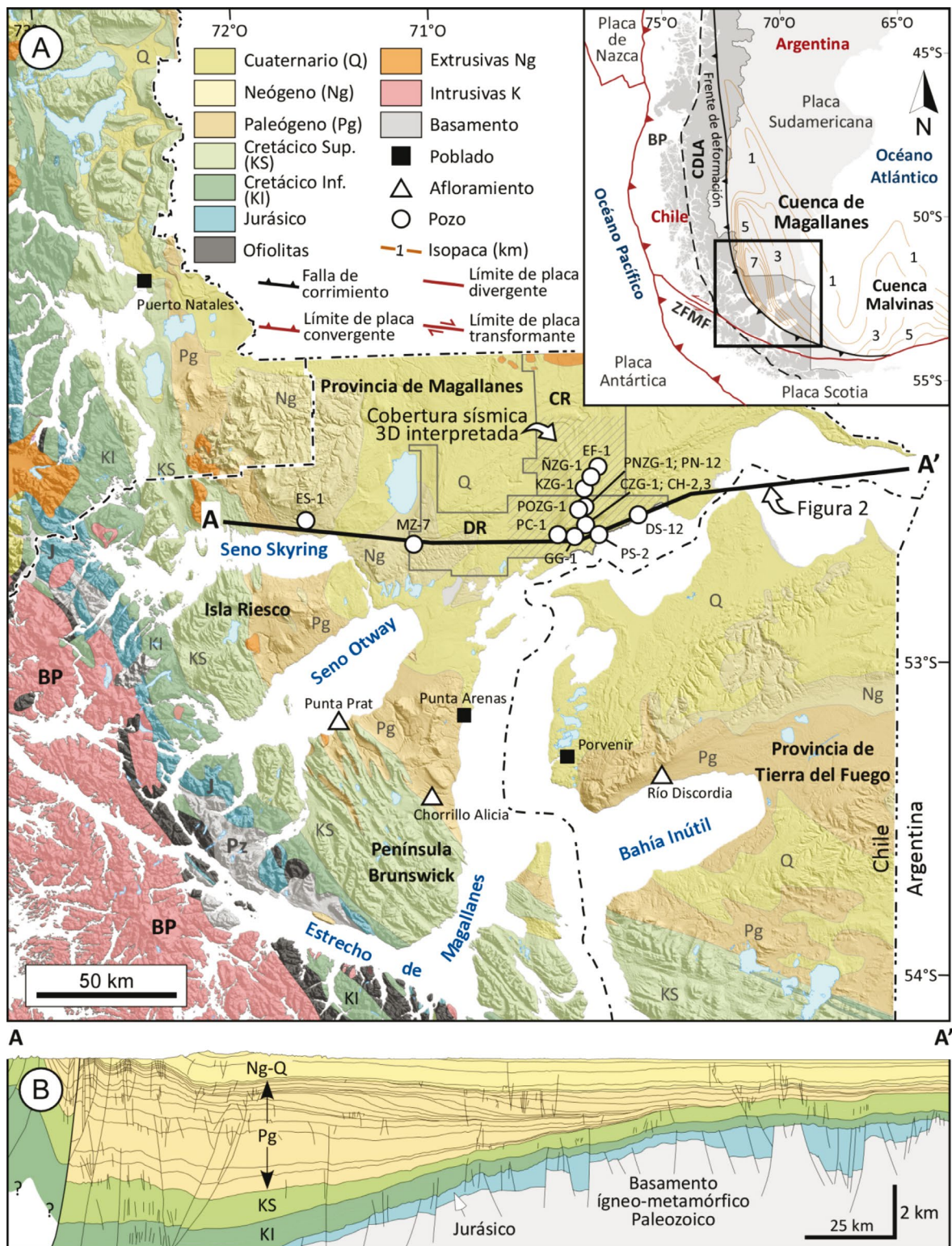


Figura 1. (A) Mapa geológico simplificado de la Región de Magallanes mostrando la distribución de las principales unidades cronoestratigráficas, ubicaciones relativas de afloramientos y pozos y la sísmica 3D incluidos en este estudio. (B) Sección geológica regional esquematizando la configuración y relleno de la Cuenca de antepaís Magallanes. Véase la Fig. 1 para ubicación relativa. BP = Batolito de la Patagonia, CDLA = cinturón de deformación de Los Andes, DR = Dorado-Riquelme, CR = Coirón, ZFMF = zona de fallas Magallanes-Fagnano.

argentino, donde ha sido observado en estratos que van desde el Cretácico Superior hasta el Mioceno (e.g., Ghiglione y Ramos 2005).

Esta contribución es parte de un proyecto mayor llevado a cabo por ENAP sobre la ocurrencia y distribución de recursos no convencionales en la región. Dentro de este amplio marco y basados en la integración de estudios detallados de afloramientos, interpretación de información de pozos y análisis de sísmica 3D, el propósito de este trabajo es presentar, con ejemplos de superficie y subsuelo, las características principales de depósitos híbridos e intrusiones clásticas en el Paleoceno-Eoceno de la Cuenca (Figs. 1-3) y discutir, en la medida de lo posible, las implicancias que pudieran tener en el sistema petrolífero Paleógeno de la región. Un mejor entendimiento de este tipo de depósitos permitirá no solo prever con mayor exactitud el comportamiento de yacimientos afines ya reconocidos, sino también expandir nuevas posibilidades de localización y desarrollo.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

La Cuenca de antepaís Magallanes es una depresión estructural alargada con orientación NNO-SSE y rellena con más de 7 km de rocas clásticas y volcanoclásticas depositadas durante el Cretácico Tardío-Cenozoico (Thomas 1949; Biddle *et al.* 1986; Fosdick *et al.* 2014) (Figs. 1-2). La cuenca es asimétrica y se profundiza hacia el oeste y suroeste hasta llegar a la sucesión fuertemente plegada y fallada del Jurásico Superior-Cretácico Inferior del Cinturón de Deformación de Los Andes (e.g., Winslow 1981). Hacia el este, del lado Atlántico, el Arco Río Chico-Dungeness la separa de las cuencas argentinas San Jorge (al norte) y Malvinas (al sur). Hacia el nor-noreste, la Cuenca continua en territorio argentino donde es comúnmente llamada Cuenca Austral (e.g., Wilson 1991; Ghiglione *et al.* 2010).

La evolución geológica de la Cuenca de antepaís Magallanes es compleja y está íntimamente vinculada a los procesos tectónicos ocurridos a lo largo del margen Pacífico de Sudamérica (Biddle *et al.* 1986; Wilson 1991) (Fig. 1). Los patrones de sedimentación y subsidencia indican tres fases principales de desarrollo de cuenca, cada una asociada con actividad ígnea prominente (e.g., Mobil 1979) (Fig. 2): (I) distensión y fragmentación continental (rifting) de los terrenos de Gondwana meridional durante el Jurásico Medio-Tardío (Bruhn *et al.* 1977; Biddle *et al.* 1986; Wilson 1991; Pankhurst *et al.* 2000), (II) extensión y desarrollo de una cuenca de tras-arco (Rocas Verdes) durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Dalziel 1981; Wilson 1991), y (III) inversión y establecimiento de una cuenca de antepaís durante el Cretácico Tardío-Plioceno (Natland *et al.* 1974; Winslow 1981; Biddle *et al.* 1986; Wilson 1991; Fildani y Hessler 2005).

La sucesión estratigráfica de la fase I, acumulada discordantemente sobre el basamento Ígneo-metamórfico paleozoico (Fig. 2), está dominada por rocas volcánicas, piroclásticas y clásticas asignadas a la Formación Tobífera. Esta sucesión estuvo íntimamente ligada a la fase temprana del desarrollo de la Cuenca de tras-arco Rocas Verdes (Dalziel 1986; Wilson 1991; Fosdick *et al.* 2014).

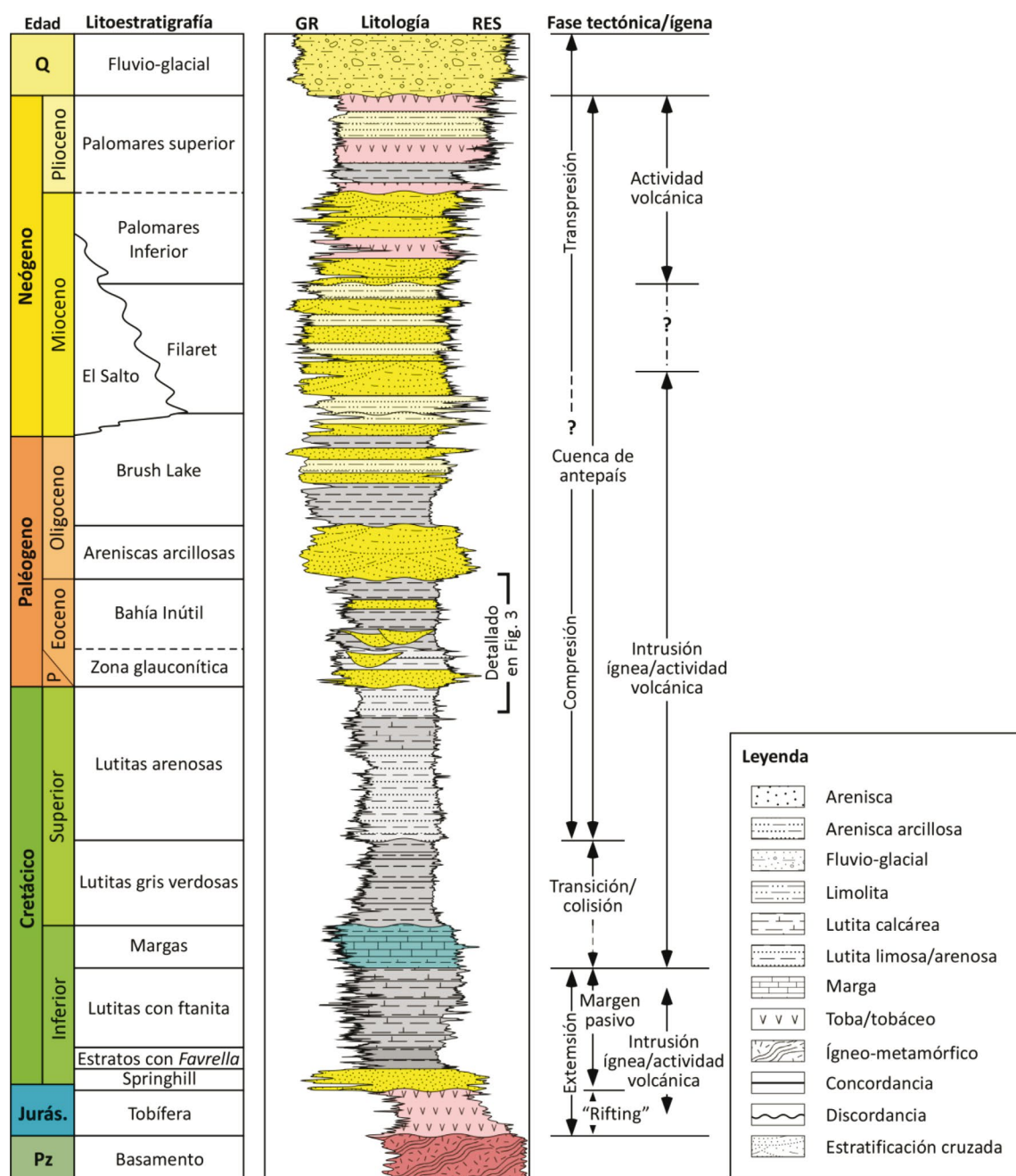


Figura 2. Columna estratigráfica generalizada para la porción centro-oriental chilena de la Cuenca de Magallanes. La litología es moldeada por curvas de rayos gamma (GR) y resistividad (RES).

La Formación Tobífera tiene localmente buena capacidad de yacimiento y contiene intervalos ricos en materia orgánica tipo I con potencial de roca madre (e.g., Herrero *et al.* 1999; Moraga *et al.* 2004). Durante el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano, la subsidencia térmica de la Cuenca Rocas Verdes provocó una transgresión generalizada y el depósito de una gruesa sucesión siliciclástica que incluye en la base las areniscas de la Formación Springhill, el principal yacimiento convencional de la cuenca, seguida de las lodolitas y lutitas de estratos con Favrella, rica en materia orgánica

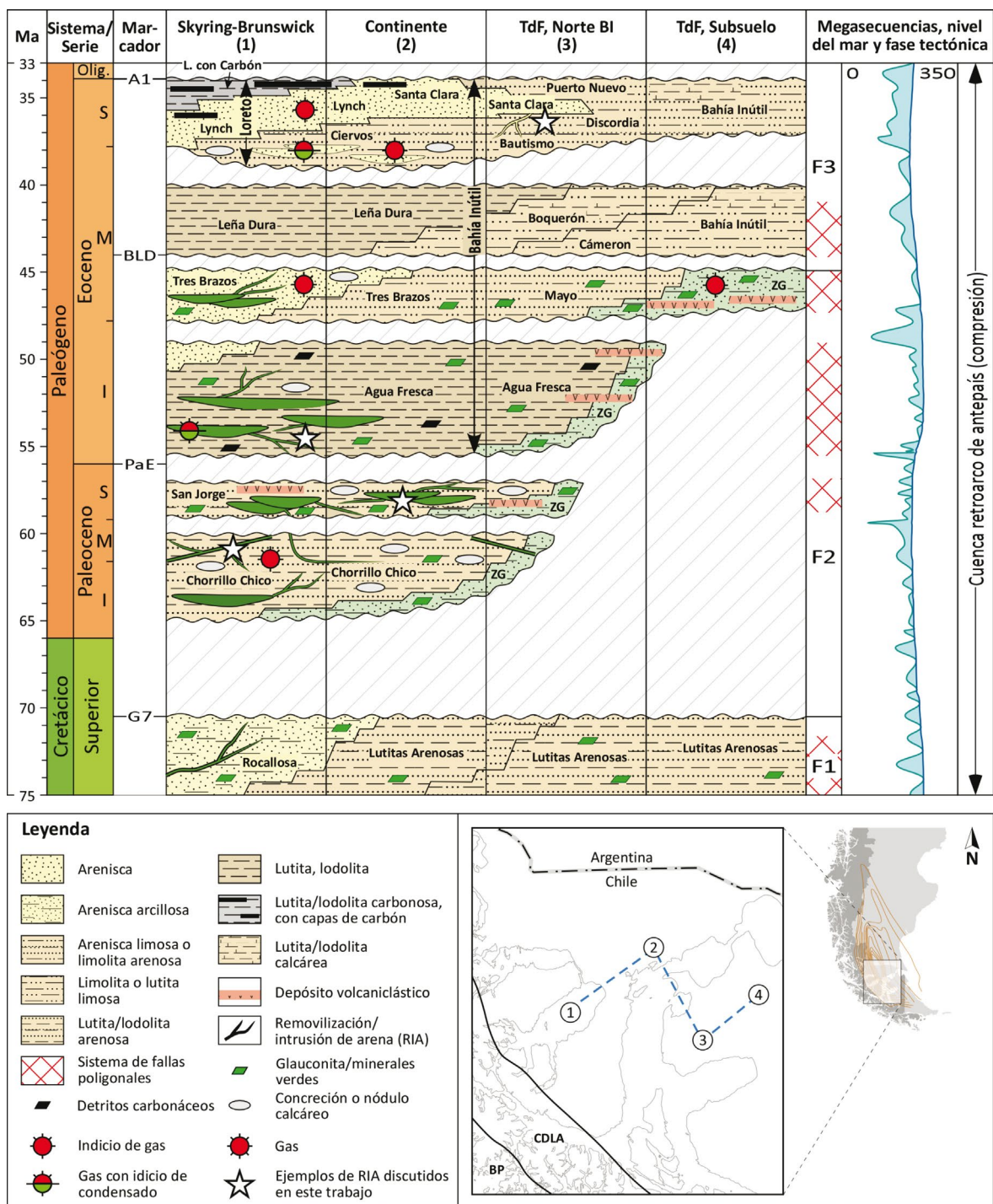


Figura 3. Diagrama estratigráfico para el Paleógeno en la porción chilena de la Cuenca de Magallanes mostrando esquemáticamente la nomenclatura estratigráfica, ocurrencia de depósitos arenos re-movilizados/inyectados, sistemas de fallas poligonales y potencial petrolífero de varios intervalos. Edades cronoestratigráficas y curvas del nivel del mar internacionales se derivan de Time Scale Creator 7.1. Definición de pisos estratigráficos locales según Natland *et al.* (1974) y Mobil (1979). Definición de megasecuencias (F1-3) según Mpodozis *et al.* (2011). BP = Batolito de la Patagonia, CDLA = cinturón de deformación de Los Andes.

tipo II, y que representa la roca madre por excelencia. El resto de la sucesión lo conforma lutitas con ftanitas, que también tiene potencial de roca madre, y margas, que actúa como sello regional.

La transformación de la Cuenca de tras-arco Rocas Verdes a la Cuenca de antepaís Magallanes estuvo asociada con los movimientos compresivos causados por la formación del cinturón de deformación de la Patagonia durante la transición Cretácico Temprano-Tardío (Biddle *et al.* 1986; Dalziel 1986; Wilson 1991; Fildani *et al.* 2008; Ghiglione *et al.* 2010) (Figs. 1A-2). La deformación y, consecuentemente, la fase inicial de antepaís, fue progresiva y diacrónica, estimándose una edad cercana al Aptiano-Albiano hacia el norte (Provincia de Última Esperanza) y Coniaciano o más joven cerca del límite meridional de la cuenca (Bernhardt *et al.* 2012; Malkowski *et al.* 2015). Este evento causó levantamiento y subsidencia por flexión diferenciales cuyo resultado fue el desarrollo progresivo de una discordancia regional y el depósito en los depocentros de una gran variedad de rocas terrígenas y volcánicas. La sucesión cenozoica, predominantemente de granulometría fina, puede alcanzar los 6 km de espesor en la parte más profunda de la cuenca (antefosa) (Figs. 1B). La base del intervalo de interés, compuesta por los depósitos de la zona glauconítica y facies equivalentes, registra una transgresión generalizada que caracterizó la región de Magallanes durante el Paleoceno-Eoceno. La sedimentación de esta unidad fue diacrónica (Hauser 1964; Biddle *et al.* 1986), más antigua en el oeste, hacia donde también es más espesa, y más joven hacia el este, en el ámbito de la Plataforma Springhill (Harambour 1978) (dominio 4, subsuelo de Tierra del Fuego en la Fig. 2). En algunas localidades, como por ejemplo, bloques Dorado-Riquelme-Coirón y suroeste del bloque Arenal (dominios 2 y 3, en la Fig. 2), la zona glauconítica incluye acumulaciones importantes de gas.

Luego de una disminución en los movimientos compresivos y la deformación, la región experimentó un régimen transpresivo y una sedimentación más continental acompañada de vulcanismo a partir del Neógeno (Winslow 1981) (Fig. 2).

El área de estudio se encuentra en la porción chilena de la Cuenca de antepaís Magallanes (Fig. 1), e incluye la Provincia de Magallanes y la parte septentrional de la Provincia de Tierra del Fuego. Desde el punto de vista petrolero, el área coincide con el Distrito Petrolero Terciario definido por Harambour (1978). Desde el punto de vista geológico, y en un contexto de antepaís, el área de estudio incluye los componentes antefosa y rampa de antepaís entre los estratos fuertemente plegados y fallados del Cinturón de Deformación de Los Andes al oeste y los estratos más estables y menos deformados de la Plataforma Springhill hacia el este (Fig. 3).

DATOS Y MÉTODOS

Este trabajo incorpora datos de afloramientos, de pozos y sísmicos 3D. Se estudiaron tres afloramientos (Fig. 1) ubicados en: (1) Punta Prat, costa noroeste de la Península Brunswick (inyectitas que afectan la Formación Chorrillo Chico del Paleoceno) (Figs. 3-5), (2) Chorrillo Alicia, tributario del Río Agua Fresca, sector centro-oriental de la Península Brunswick (inyectitas en la Formación Agua Fresca del Eoceno inferior) (Figs. 3 y 6) y (3) Río Discordia, norte de Bahía Inútil

(depósitos híbridos e inyectitas en la Formación Santa Clara del Eoceno superior) (Figs. 3 y 7).

Se seleccionaron varios pozos para construir un esquema de correlación estratigráfica y de intervalos deformados en dirección oeste-este que representa un perfil paleo-batimétrico de antefosa a rampa de antepaís de la cuenca (Figs. 1B y 8). Los datos de pozo incluyeron registros básicos (rayos gamma, resistividades, sónicos, etc.) y de imágenes resistivas (FMI), además de núcleos convencionales recuperados en intervalos con evidencia de deformación de arena, pozos ES-1, MZ-7, CZG-1, CH-2, PC-1, KZG-1, ÑZG-1 (ver Fig. 1 para ubicación). La identificación y caracterización de intrusiones clásticas en núcleos sirvió como base para la interpretación de estas estructuras a partir de FMI en intervalos adyacentes carentes de núcleos. Para esto se usaron tres criterios principales, alta resistividad, buzamiento diferente al de los estratos adyacentes y descripción de arenisca durante el registro de perforación.

El cubo sísmico 3D (PSTM) interpretado abarca respectivamente la parte oriental y meridional de los bloques operacionales Dorado y Coirón (Fig. 1). La calidad de los datos sísmicos es generalmente buena, con frecuencias dominantes de 33 Hz. La velocidad promedio para el Paleógeno es ~3400 m/s, implicando una resolución vertical de aproximadamente 26 m. Se crearon cubos de atributos sísmicos de amplitud, coherencia, curvatura y descomposición espectral para examinar el intervalo de interés tanto en perfiles como en planta.

RESULTADOS

De acuerdo con la información de afloramientos y datos de pozos, el Paleoceno-Eoceno de la Cuenca está dominado generalmente por terrígenos marinos de granulometría fina, interrumpidos por eventos esporádicos que representan sedimentación más gruesa, especialmente areniscas. En el subsuelo, la sección de interés yace a ~2300-6000 m de profundidad y los pozos perforados indican condiciones locales de sobrepresión.

Las figuras 4-7 ilustran ejemplos de removilización e inyección de arena en los tres afloramientos seleccionados para este trabajo. En Punta Prat, costa septentrional de la Península Brunswick, la sección expuesta está dominada por una alternancia de lodolitas y limolitas marino profundo asignadas a la Formación Chorrillo Chico, de edad Daniano-Selandiano (Paleoceno) (Fig. 3). Esta sucesión está cortada por diques clásticos compuestos por arenisca gris verdoso de granulometría fina a media (Fig. 4). El dique más grueso (~1 m de espesor) se extienden con ángulo bajo por decenas de metros en una dirección aproximada este-oeste, abarcando toda la extensión del afloramiento (Fig. 4A). A partir de este, emanan hacia abajo intrusiones más delgadas que en algunos casos se bifurcan y adelgazan hasta desaparecer en la roca caja (Fig. 4B), mientras que en otros pueden contener fragmentos de la roca caja que claramente fue incorporada en la intrusión (Fig. 4C). Estos clastos son sub-redondeados y suelen mostrar fracturas rellenas de calcita blanca muy poco comunes en las intrusiones. El contacto entre las intrusiones y la roca caja es invariablemente neto e irregular pero puede variar de suave a anguloso.

Un poco más al oeste (Fig. 5), las intrusiones clásticas son relativamente más delgadas y generalmente mantienen el carácter discordante (dique) con los estratos que atraviesa (Fig. 5A); no obstante, la relación también puede ser concordante (sill) (Fig. 5B). Localmente, la intrusión más extensa muestra plegamiento ptigmático dentro de la roca caja (Fig. 5C). En Punta Prat las fallas son comunes y afectan tanto a la roca caja como a las intrusiones arenosas (Fig. 5B); no se ha observado material inyectado a lo largo de las superficies de falla.

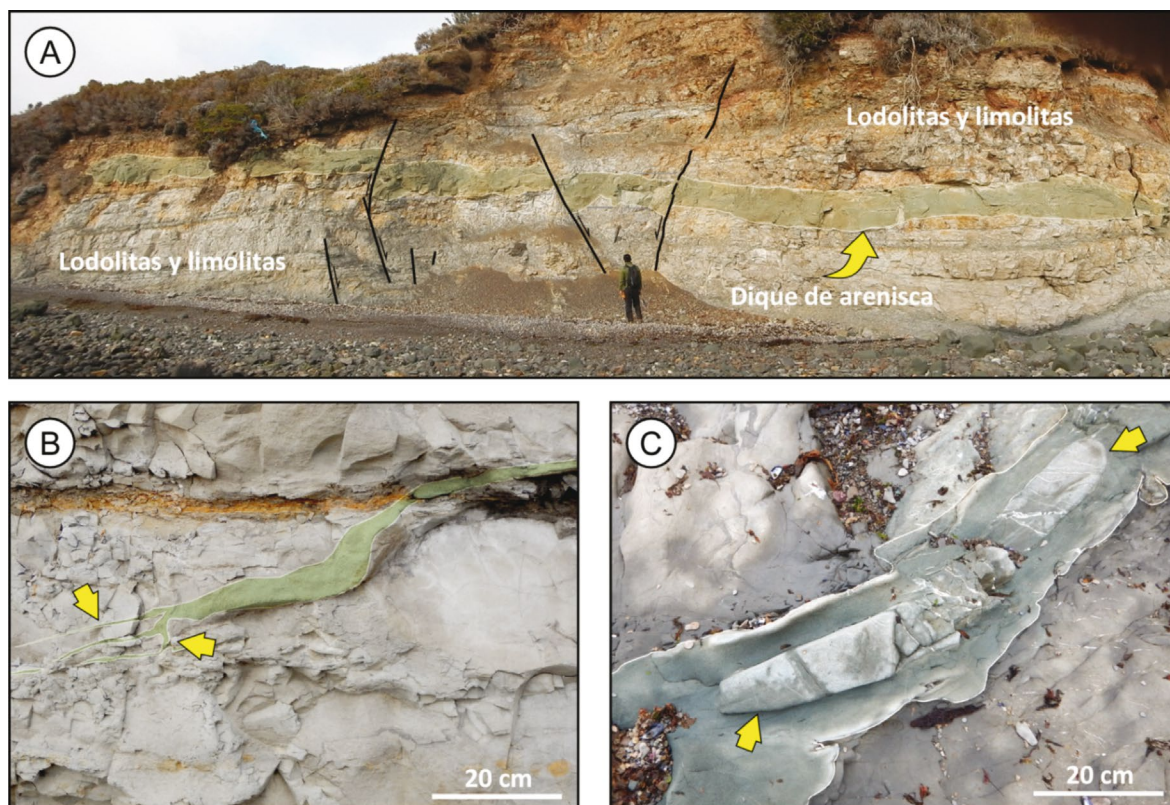


Figura 4. Fotografías de intrusiones clásticas en afloramientos de la Formación Chorrillo Chico (Paleoceno) en Punta Prat, costa septentrional de la Península Brunswick. (A) El dique principal tiene ~1 m de espesor (persona en la parte media inferior para escala) y corta varios metros de roca caja. Está conformado por un cuerpo de arenisca gris verdoso de granulometría fina de donde emanan intrusiones más delgadas hacia abajo (B-C). Fallas de ángulo alto afectan toda la sección. El contacto entre las intrusiones y la roca caja es neto e irregular. Localmente, las inyecciones se bifurcan y adelgazan hasta desaparecer hacia abajo (B) y pueden contener clastos sub-redondeados de la roca caja en las porciones más gruesas (C); estos clastos suelen mostrar fracturas rellenas de calcita blanca generalmente ausentes en las intrusiones. Fotografías tomadas mirando hacia el sur.

En la parte centro-occidental de la Península Brunswick, a lo largo de Chorrillo Alicia, tributario del Río Agua Fresca, la sección homogénea de lutitas marinas de la Formación Agua Fresca (Eoceno inferior) (Fig. 3) es penetrada por diques sinuosos de arenisca fina gris verdoso que se bifurcan hacia abajo (Fig. 6). Las concreciones calcáreas, comunes en esta formación, ocurren tanto en la roca caja como en los diques. Localmente, intrusiones delgadas emanan desde las intrusiones más gruesas hacia arriba. El contacto entre las intrusiones arenosas y la roca caja es neto e irregular.

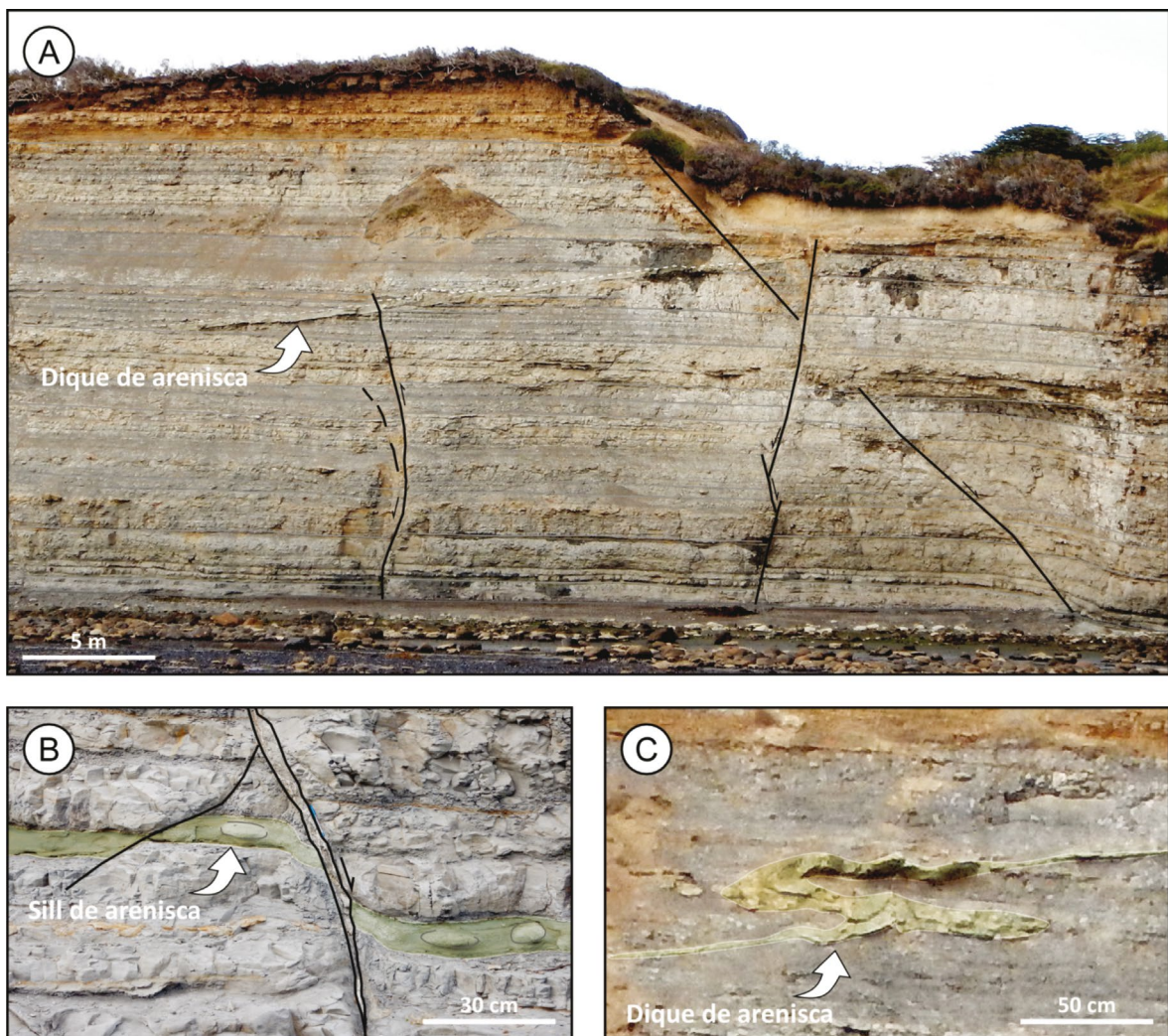


Figura 5. Fotografías de intrusiones clásticas en afloramientos de la Formación Chorrillo Chico (Paleoceno) en Punta Prat, costa septentrional de la Península Brunswick, al oeste de los ejemplos de la Fig. 4. (A) Dique relativamente delgado de arenisca fina desplazada ligeramente por fallas de ángulo alto. Localmente, las intrusiones pueden guardar una relación concordante (sill) con la estratigrafía (B) o mostrar plegamiento ptigmático dentro de los estratos que atraviesa (C). Fotografía tomada mirando hacia el sur.

En la Isla Tierra del Fuego, en el cauce del Río Discordia al norte de Bahía Inútil, la Formación Santa Clara (Eoceno superior) (Fig. 3), exhibe cuerpos de areniscas de granulometría media que han sufrido removilización e inyección en la parte basal (Fig. 7). Las rocas adyacentes son lodolitas y limolitas depositadas en un contexto marino somero. Las intrusiones se extienden y adelgazan hacia abajo hasta un punto donde la relación con la roca caja se vuelve concordante (sill). A partir de este punto, se desarrollaron dos sills que localmente muestran un desplazamiento normal sin la intervención de una fractura o falla aparente. Al igual que en los dos casos anteriores, los límites entre las arenas re-movilizadas y la roca caja, son netos pero menos irregulares. En conjunto, los diques y sills individuales varían de unos pocos milímetros a ~5 cm de espesor.

La sección de correlación estratigráfica de la Figura 8 ilustra la ocurrencia de depósitos híbridos y/o intrusiones clásticas atravesados por varios pozos en los bloques Dorado-Coirón de la Provincia de Magallanes. El “datum” de la sección lo constituye la base de la Formación Leña Dura (BLD, Eoceno medio) (Fig. 3), debido a su fácil identificación tanto en registros de pozo como en sísmica. Además, la Formación consiste en lutitas y lodolitas fosilíferas que sugieren depositación durante un estadio alto del nivel del mar. Así, la sección representa aproximadamente un perfil paleo-batimétrico de antefosa a rampa de antepaís de la Cuenca que, junto con la ocurrencia de intrusiones clásticas en la parte expuesta de la antefosa, sugieren una amplia distribución de estos eventos.

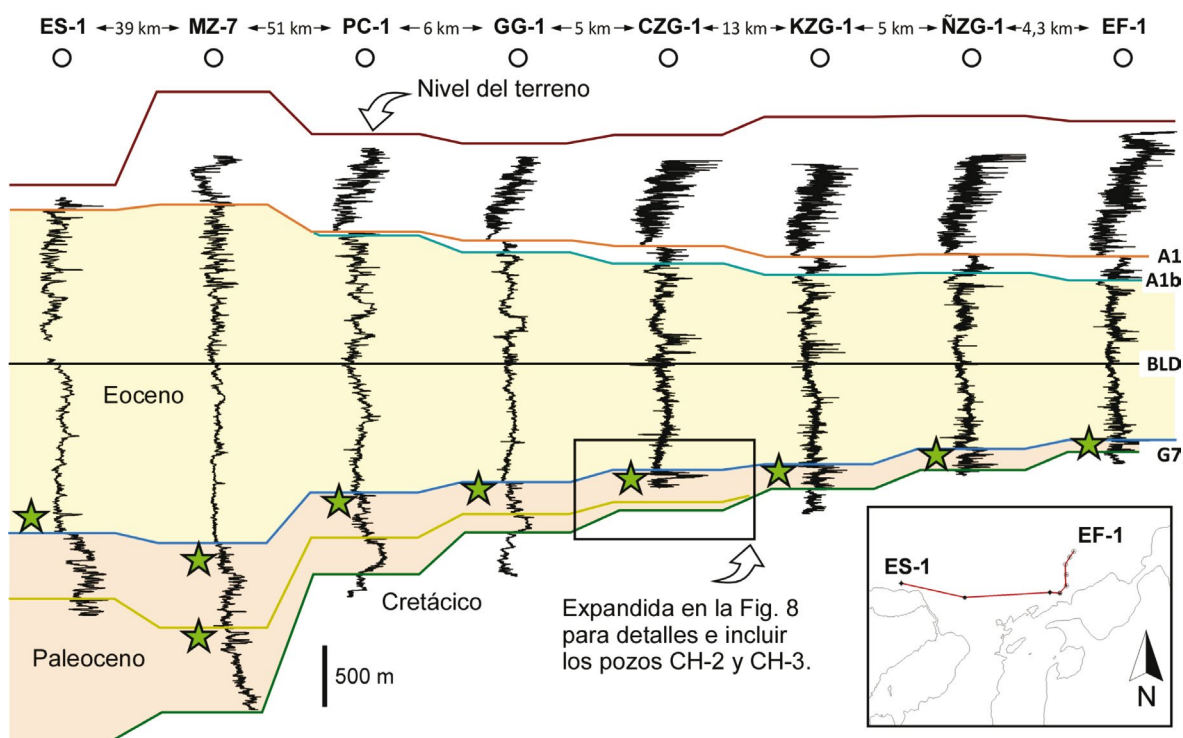


Figura 8. Sección estratigráfica de correlación de registros de pozo (resistividad) mostrando la ocurrencia (estrellas verdes) de estructuras de removilización e inyección de arena en el subsuelo de la Provincia de Magallanes. “Datum” = BLD, base de la Fm. Leña Dura.

En registros de pozo los depósitos híbridos del Paleoceno exhiben un carácter cilíndrico (Fig. 9). Aunque en los pozos CZG-1 y CH-2 este carácter es completo, en el pozo CH-3, ubicado un poco más al este, intervienen estratos más lodosos que dividen el intervalo en tres cuerpos arenosos bien diferenciados. De los tres pozos, solo en dos se recuperaron núcleos del intervalo de interés, CZG-1 y CH-2 (Fig. 10). El análisis de estos núcleos indica que el material más grueso consiste en areniscas gris verdoso moderadamente consolidadas seguidas de lodolitas limosas y limolitas lodosas bioturbadas. En estas últimas, la asociación de trazas fósiles incluye *Asterosomas*,

Chondrites, *Planolites*, *Schubcylindrichnus*, *Teichichnus*, *Thalassinoides* y *Zoophycos*, compatible con las ichnofacies *Cruziana* distal a *Zoophycos* que caracteriza el dominio de plataforma externa (e.g., MacEachern y Bann 2008). En el pozo CZG-1 se recuperó un espesor de ~27 m de areniscas sin llegar al contacto con las rocas infrayacentes. Este contacto fue recuperado en el pozo CH-2, donde ~30 m de areniscas descansan sobre facies heterolíticas bioturbadas similares a las de la parte superior.

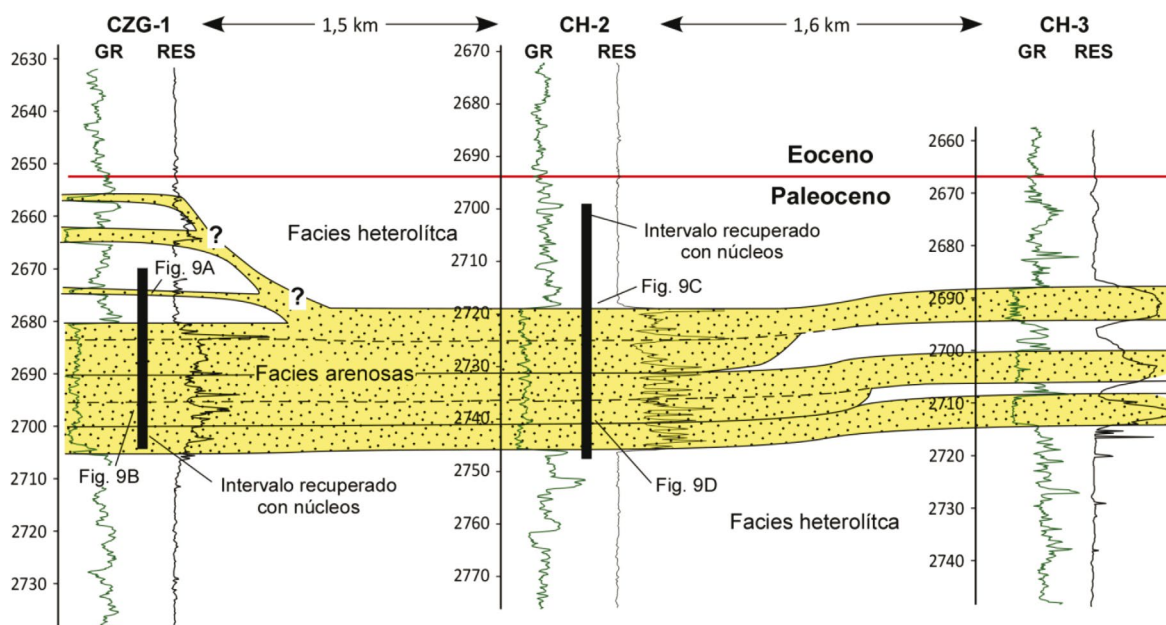


Figura 9. Correlación de registros de pozo mostrando la expresión de depósitos híbridos en el bloque Dorado, Provincia de Magallanes. De los dos pozos con núcleos, solo los del CZG-1 exhiben estructuras asociadas con removilización e inyección de arena en la parte superior. Véase Fig. 7 para ubicación relativa. GR = rayos gamma, RES = resistividad; profundidades verticales por debajo del nivel del mar.

Evidencia directa de removilización e inyección de arena a partir del cuerpo principal (fuente) solo ha sido observada en los núcleos del pozo CZG-1 (Figs. 9 y 10A). Esta consiste en intrusiones relativamente delgadas (~1-20 cm) en la parte superior de la fuente y que cortan la roca caja (lodolitas) con ángulo alto a lo largo de contactos netos (Fig. 10A). Dos cuerpos arenosos que ocurren por encima del intervalo recuperado son también interpretados como intrusiones sobre la base de una litología similar a las inferiores y su carácter cilíndrico en registros.

En los núcleos del pozo CZG-1 la mayor parte del intervalo arenoso no muestra estructuras de tracción, aunque en la parte media ocurren superficies de estratificación ligeramente visibles. Tanto las areniscas del cuerpo principal como los diques localmente muestran frentes o patrones complejos de cementación diferencial por calcita (Fig. 10B). En los núcleos del pozo CH-2, las areniscas del cuerpo principal están caracterizadas por laminación paralela y estratificación cruzada plana. Localmente ocurren rizaduras, estratificación cruzada hummocky y gradación normal. La base de este cuerpo arenoso es erosivo mientras que el tope es concordante y ligeramente

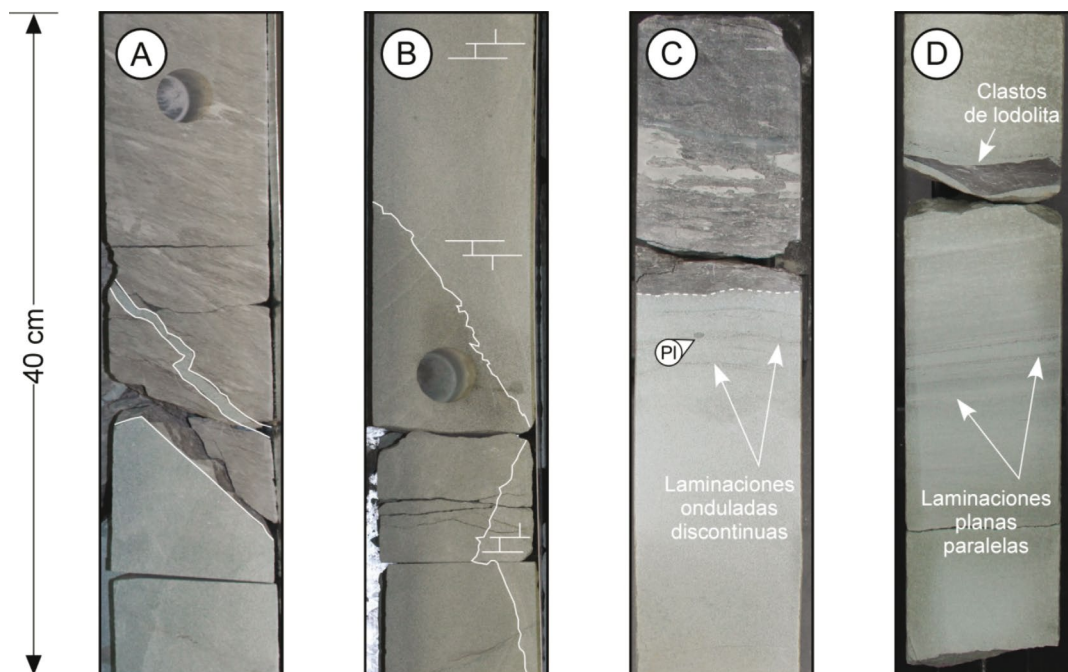


Figura 10. Fotografías de núcleos mostrando algunas características de los depósitos arenosos recuperados por los pozos CZG-1 y CH-2 en el bloque Dorado. La profundidad está indicada en la Fig 9.

bioturbado (Fig. 10C). Internamente, el paquete de arenisca puede dividirse en tres cuerpos al parecer amalgamados y separados por superficies erosivas indicadas por clastos de lodolita alineados a la estratificación (Fig. 10D). La asociación de facies sedimentarias junto con las estructuras y trazas fósiles de los depósitos infrayacentes son compatibles con relleno de canales apilados y asociados con un sistema de rampa submarina mixta de lodo y arena.

Petrográficamente, las areniscas están compuestas principalmente por fragmentos líticos, cuarzo y en menor proporción feldespatos, con cantidades variables de granos verdes (Fig. 11). El contenido de los granos verdes puede ser de hasta 30% del volumen total de la roca y probablemente representan la alteración o reemplazo de feldespatos y fragmentos de roca por clorita o glauconia. La granulometría varía de fina a media y los granos son sub-redondeados a sub-anguloso. En general, la porosidad de los cuerpos arenosos en el pozo CZG-1 es generalmente buena (~18% en promedio) pero la permeabilidad tiende a ser baja (<1 mD). Datos de perforación y pruebas de flujo indican acumulación de gas con algo de condensado a una sobrepresión de más de 3000 psi. No obstante, debido a la baja permeabilidad ha sido necesario aplicar métodos secundarios de estimulación a través del fracturamiento hidráulico para alcanzar metas económicas localmente aceptables, lo que los convierte en un nuevo tipo de yacimiento no convencional (e.g., Holditch 2006) para la cuenca.

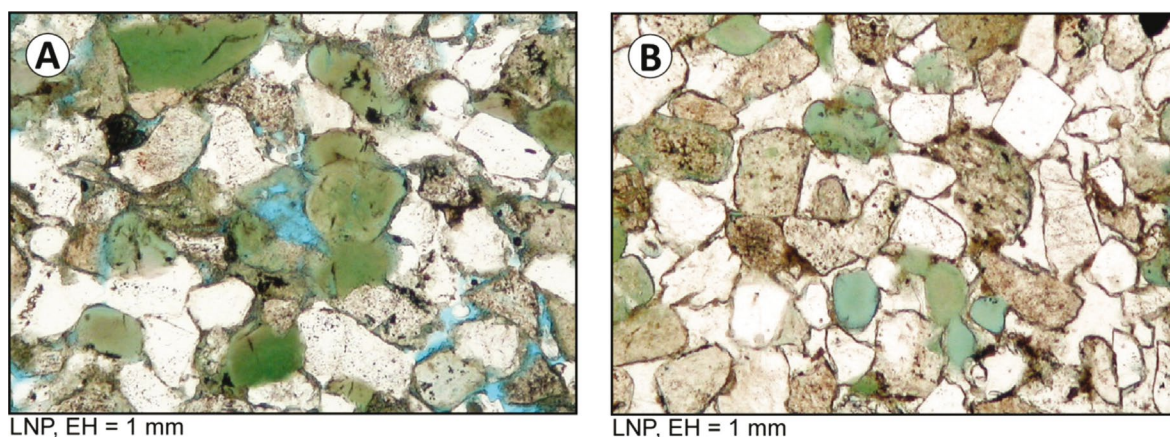


Figura 11. Fotomicrografías del depósito híbrido (fuente) (A) e intrusión clástica (B) en el pozo CZG-1. Ambos están compuestos de arenita lítica cuarzo-feldespática de grano fino; los granos verdes, probablemente feldespatos y fragmentos de roca alterados a o reemplazados por clorita o glauconia llegan a conformar el 30% de la muestra. Las profundidades de A y B son respectivamente 2700 y 2675 m bajo el nivel del mar. LNP = luz con nícoles paralelos, EH = eje horizontal.

En los bloques Dorado-Coirón, se identificaron 40 diques arenosos a partir de la interpretación de imágenes resistivas de 5 pozos. Los diques se encuentran principalmente entre los marcadores G7 (en o cerca del límite Cretácico-Paleógeno) y el PaE (en o cercano del límite Paleoceno-Eoceno) a una profundidad de 1970-2720 m por debajo del nivel del mar (Fig. 12). El espesor varía de 2-130 cm, con un espesor promedio de 20 cm. El buzamiento puede variar de 4-85°, pero son más comunes los de 10-50°, con un promedio de aproximadamente 30°. De acuerdo con la descripción de la unidad de registro de perforación, la mayoría de los intervalos interpretados como diques, están compuestos de areniscas líticas gris verdoso de granulometría muy fina y ricas en minerales verdes y cemento calcáreo. Solo dos de estos intervalos muestran una litología diferente: (1) el cuerpo más somero en el pozo KZG-1, descrito como arenisca lítica gris claro de grano fino a muy fino, con restos carbonosos, cemento silíceo y cantidades subordinadas de minerales verdes, y (2) el único dique identificado en el POZG1, descrito como arenisca lítica gris, de grano fino a muy fino, con escasos minerales verdes y abundante matriz arcillosa.

En general, la orientación de los diques coincide con la de las fracturas pero en algunos es más o menos paralela a la dirección NE-SO de rasgos alargados, localmente sinuosos, muy evidentes en mapas de atributos sísmicos (Fig. 13). En conjunto, estos rasgos son compatibles con un complejo de canales y lóbulos desarrollados en un contexto de talud o rampa submarina con una proporción mixta de lodo y arena (e.g., Weimer y Slatt 2007). Los depósitos canalizados han sido atravesados por varios pozos en los bloques Dorado-Coirón (Figs. 9, 10 y 12) y debido a su espesor y composición son considerados la fuente potencial de los diques adyacentes. Otros pozos en el área han atravesado la sección sin evidencia de areniscas, sugiriendo que la continuidad lateral de los cuerpos de arena principales puede estar en algunas partes restringida y probablemente asociada al carácter canalizado del depósito.

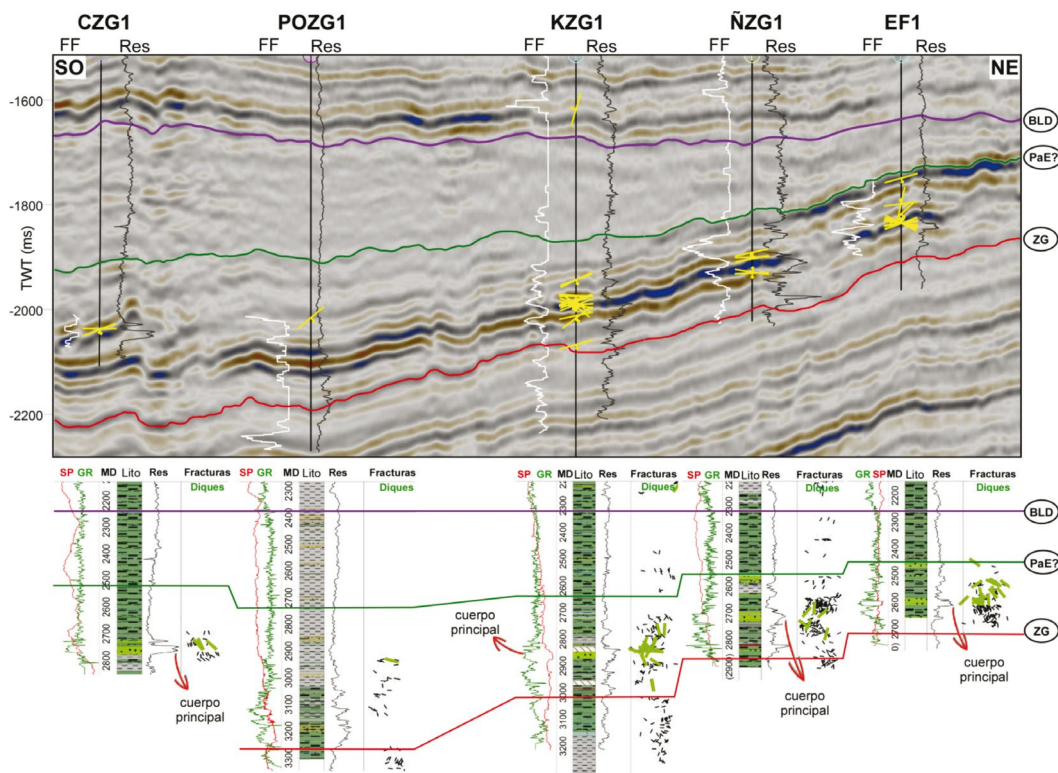


Figure 12. Perfil sísmico y de correlación ilustrando la frecuencia de fracturas (FF) y potenciales diques arenosos (símbolos de dirección y buzamiento amarillos) interpretados a partir de imágenes resistivas de 5 pozos en los bloques Dorado y Coirón. “Datum” = BLD, base de la Formación Leña Dura.

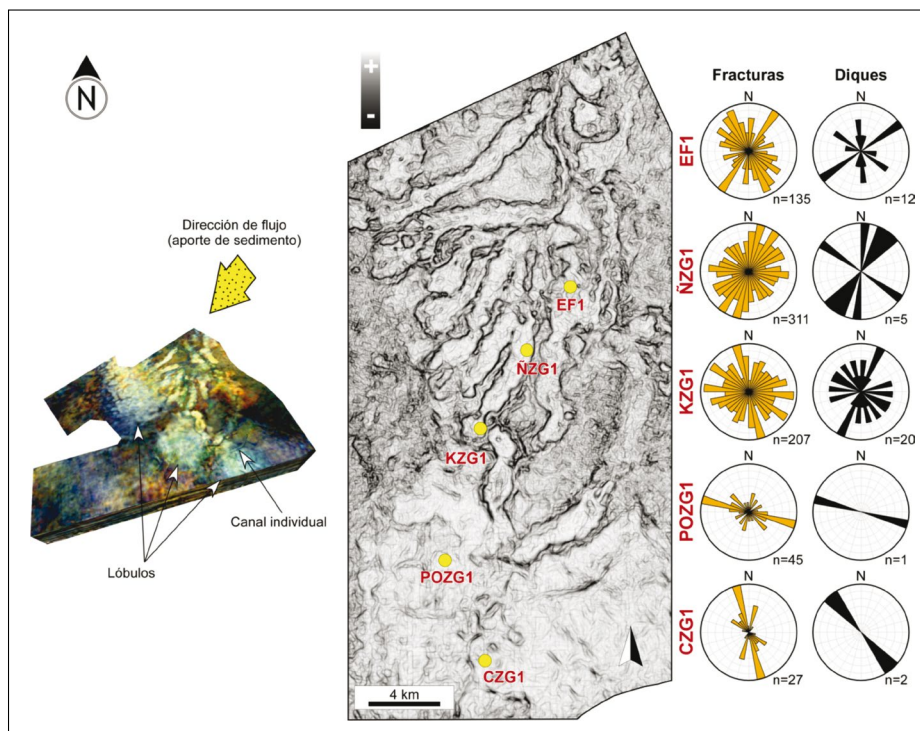


Figure 13. Mapas de atributos sísmicos (descomposición espectral y similitud) mostrando la expresión sísmica del intervalo de interés en los bloques Dorado-Coirón y diagramas de rosetas de fracturas y diques interpretados a partir de imágenes resistivas. La longitud de los pétalos representa la frecuencia como el número de fracturas/diques por cada intervalo de clase (bin).

De acuerdo con la interpretación de los registros de imágenes (Fig. 12), un 80% de los diques ocurre a menos de 50 m de los cuerpos de arena principales (relleno de canales), con la mitad de esta población a no más de 10 m. No se encontraron diques con espesor mayor a 50 cm a más de 25 m del cuerpo principal para cada pozo. Generalmente, el buzamiento de los diques aumenta a medida que se alejan de los cuerpos principales.

La Figura 14 ilustra, en una dirección oeste-este a través del bloque Dorado en la Provincia de Magallanes, la cuña paleógena donde ocurren depósitos híbridos y varios ejemplos locales de canalización y/o removilización de cuerpos arenosos. Sísmicamente, la expresión del intervalo donde ocurren estos depósitos es caótica pero localmente se observan anomalías de amplitud discordantes a la estratigrafía con formas lenticulares (cóncavas hacia arriba) que sugieren canalización, relleno y removilización. Siguiendo la propuesta de Huuse *et al.* (2009) para areniscas sin y con removilización e inyección, las formas simples son interpretadas como rellenos de canales sin removilización. Las formas más complejas incluyen (1) casos con “alas”, interpretadas como relleno de canal con removilización parcial y propagación hacia los márgenes y (2) otros con base en forma de cubeta y relleno cóncavo hacia abajo que pudieran estar asociados con montículos parcial o totalmente re-movilizados (Huuse *et al.* 2009).

DISCUSIÓN E IMPLICANCIAS PARA LA EXPLORACIÓN DE HIDROCARBUROS

Los ejemplos documentados en esta contribución a partir de afloramientos, núcleos de pozo y sísmica 3D indican que el Paleoceno-Eoceno de la Cuenca de antepaís Magallanes contiene intervalos asociados en menor o mayor grado con removilización e intrusión de arena, sugiriendo así una distribución regional.

En afloramiento, las intrusiones clásticas son generalmente delgadas (pocos mm a ~1 m) y varían de diques a sills cuyos contactos con la roca caja son netos e irregulares (Figs. 4-7). Esto, junto con la incorporación de clastos sub-redondeados de roca caja en las intrusiones indica una penetración forzosa del material arenoso en una sucesión parcialmente litificada. Esto es soportado por la ocurrencia de plegamiento ptigmático en algunas intrusiones (Fig. 5C), probablemente causado por la compactación diferencial pos-inyección de las lodolitas de la roca caja (Hiscott 1979). La mayoría de los diques se bifurcan y adelgazan hacia abajo, sugiriendo que el aporte de material arenoso fue generalmente desde arriba. Al parecer, el material arenoso provino de niveles estratigráficos diferentes por encima de la sección que atraviesan.

En el subsuelo, los depósitos aquí referidos como híbridos, están asociados con un extenso sistema de canales submarinos que ha sufrido en mayor o menor grado deformación de arena pos-depositación, pero antes de su litificación. Sísmicamente, y siguiendo el esquema propuesto por Huuse *et al.* (2009), la expresión de estos depósitos pudiera indicar (1) rellenos de canal sin removilización, (2) rellenos de canal con removilización parcial y, en menor proporción, (3)

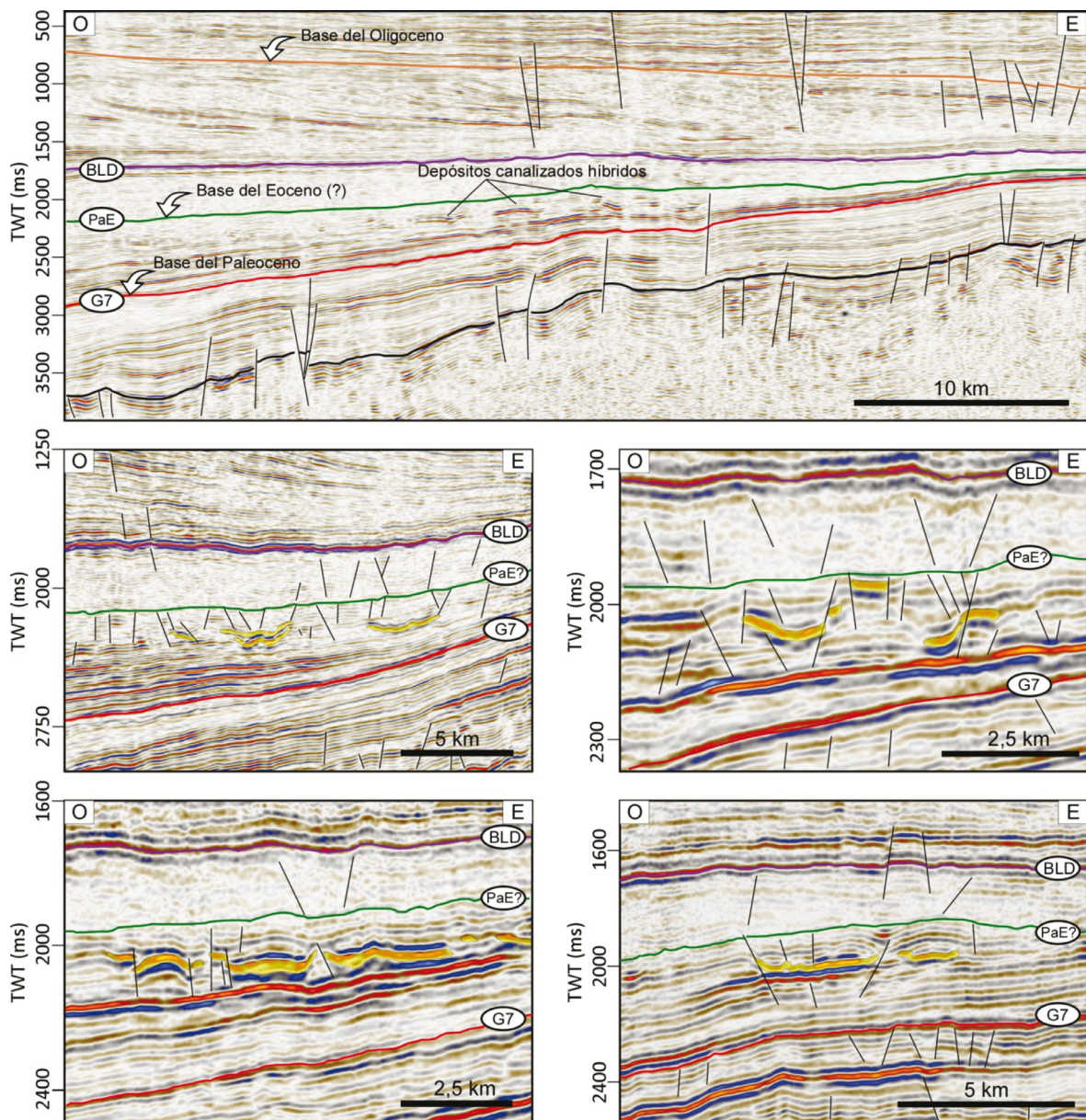


Figure 14. Panel compuesto de un perfil sísmico oeste-este a través del bloque Dorado en la Provincia de Magallanes mostrando la cuña paleógena donde ocurren depósitos híbridos y varios ejemplos locales de canalización y/o removilización de los cuerpos arenosos. TWT = doble tiempo de tránsito.

montículos con removilización parcial o total; las formas cónicas no han sido observadas aún. Alternativamente, la forma monticular de los reflectores pudiera reflejar deformación de arena causada por el movimiento ascendente de gas proveniente de rocas madres infrayacentes maduras (Brooke *et al.* 1995).

En núcleos, la ocurrencia de intrusiones clásticas a pocos metros por encima de facies con estructuras sedimentarias primarias indica que los depósitos canalizados han sido removilizados solo parcialmente. De acuerdo con las interpretaciones de registros de imágenes, la mayor parte

de los diques en el subsuelo ocurren a menos de 50 m de la posible fuente. Esto, junto con la extensión vertical de las anomalías de amplitud en la sísmica, indica que la deformación probablemente ocurrió a decenas o quizás a unos pocos cientos de metros de profundidad; a este nivel de soterramiento las arenas son más propensas a sufrir removilización e inyección (e.g., Jonk *et al.* 2010). En el pozo CZG-1, las intrusiones clásticas en la parte superior del intervalo yacimiento están cementadas por calcita, sugiriendo que estas inyecciones sirvieron como conductos para la migración de fluidos diagenéticos. De hecho, el intervalo yacimiento exhibe un patrón complejo, localmente intrincado, de cementación por calcita no observado en los núcleos del pozo CH-2. Esto podría estar relacionado al carácter híbrido (removilizado) del yacimiento en el pozo CZG-1, virtualmente ausente en el pozo CH-2 (Fig. 9). Este aspecto no solo es crucial para establecer un modelo geológico estático más preciso sino también para simulaciones futuras de la dinámica de yacimientos en la cuenca (e.g., Huuse *et al.* 2010; Jonk *et al.* 2010).

Aunque una discusión sobre las causas de removilización e intrusión clástica en la sección de estudio va más allá del alcance de este trabajo, algunas ideas generales sirven para poner el tema en perspectiva. La mayoría de los investigadores concuerda en que se deben cumplir dos prerequisites básicos para la removilización e intrusión de arena (e.g., Braccini *et al.* 2008): disponibilidad de arena encapsulada en lodolitas con baja permeabilidad y por lo menos un evento que promueva sobrepresión en las arenas. En general, el Paleoceno-Eoceno de la Cuenca está dominado por una espesa sucesión (>4 km) de terrígenos marinos de granulometría fina, interrumpidos por eventos esporádicos de sedimentación más gruesa, especialmente arena. En el subsuelo, la sucesión yace a ~2300-6000 m de profundidad y los pozos perforados en el componente antefosa-rampa de antepaís indican condiciones locales de sobrepresión. Los gradientes térmicos calculados a partir de temperaturas de fondo son generalmente altos y varían de ~3,4-5,6 °C/100m.

La amplia distribución de intrusiones clásticas en esta sucesión predominantemente lodosa pudiera ser vinculada al desarrollo de sobrepresión en los cuerpos arenosos causada por altas tasas de sedimentación y soterramiento, lo que impidió su deshidratación y, consecuentemente, un aumento de la presión poral hasta superar el gradiente hidrostático. No obstante, este mecanismo requiere tasas de sedimentación superiores a los 600 m/m.a. (e.g., Mann y Mackenzie 1990) que son tres o cuatro veces mayores que las estimadas para el Paleógeno de la Cuenca (e.g., Mobil 1979; Schwartz *et al.* 2017). Otro mecanismo capaz de haber disparado y mantenido la sobrepresión es la compresión lateral (Swarbrick *et al.* 2002) causada por los esfuerzos tectónicos asociados con el cinturón de plegamiento y corrimiento de la Patagonia (Winslow 1983), que han controlado la geodinámica de la cuenca desde el Cretácico Tardío. Dados los elevados gradientes geotérmicos de la cuenca, la expansión de fluidos por expulsión de hidrocarburos y deshidratación y transformación de arcillas (e.g., Swarbrick *et al.* 2002) pudiera haber jugado algún papel, especialmente en los ejemplos del subsuelo. Por otra parte, las facies más gruesas de la sucesión Paleoceno-Eoceno son menos potentes y aparentemente fueron depositadas en niveles

cada vez más someros en dirección este, hacia donde la sucesión se adelgaza progresivamente buzamiento arriba (Fig. 7). Dentro de los cuerpos arenosos, esto pudo favorecer un flujo de fluidos (e.g., agua) esencialmente hacia arriba que impulsó o ayudó a incrementar la presión en las partes más someras de la sección (Hurst y Huuse 2017).

Lonergan y Cartwright (1999) en un estudio del Eoceno del campo Alba en el Mar del Norte, postularon que el fallamiento poligonal y las modificaciones pos-depositación de los intervalos yacimientos a través de la removilización y evacuación de arena pudieran ser procesos relacionados. En el área de estudio, la ocurrencia de sistemas de fallas poligonales en los mismos intervalos con anomalías de amplitudes asociadas con depósitos canalizados afectados en menor o mayor grado por removilización podría sugerir un vínculo genético. Sin embargo, los ejemplos de afloramiento y de núcleos recuperados hasta ahora indican que las estructuras asociadas con intrusión de arena son cortadas por fallas tectónicas y/o poligonales; debido a la amplia distribución de estos dos eventos en la Cuenca y la poca información física del subsuelo, no se descarta la posibilidad de que localmente las fallas hayan servido como vías de propagación de sedimentos liquidizados. Las chimeneas de gas también han sido asociadas con removilización de arena y fallas poligonales (e.g., Gay *et al.* 2006). En el área de estudio, las zonas de perturbación en la sísmica 3D compatibles con chimeneas de gas son comunes pero hasta ahora no se ha logrado establecer un vínculo directo entre estos elementos y los depósitos híbridos o las fallas poligonales. Todos estos aspectos serán investigados con mayor detalle en futuros análisis.

Las fallas poligonales y las estructuras asociadas con removilización e intrusión de arena son productos del soterramiento temprano (Lonergan y Cartwright 1999). Por lo tanto, la co-ocurrencia de estos dos elementos en el Paleoceno-Eoceno de la Cuenca sugiere por lo menos una sincronización aproximada en su desarrollo. Además, la extensión superficial y persistencia temporal de estos eventos en la región es más compatible con factores externos y más probablemente vinculados con la geodinámica de la Cuenca. Sin importar los mecanismos que hayan promovido y mantenido la removilización e intrusión clástica en la Cuenca, la ocurrencia de estructuras afines tanto en afloramientos como en pozos y sísmica que representan una posición de cuenca a rampa de antepaís, indica una distribución regional. El resultado de estos procesos, unido a la complejidad tectono-estratigráfica inherente de la cuenca, se traduce en una variedad de trampas estratigráficas y yacimientos aún por entender y descubrir.

Desde una perspectiva petrolera, los procesos de removilización e intrusión de arena pueden controlar no solo la arquitectura de los yacimientos sino también el recobro máximo (e.g., Purvis *et al.* 2002). En consecuencia, un entendimiento de la geometría y distribución de estos depósitos puede suministrar las bases no solo para el manejo de yacimientos, planificación de pozos e implementación de técnicas de recuperación secundaria, sino también para la creación de modelos conceptuales y numéricos apropiados sobre el flujo de fluidos tanto a escala regional como a escala de yacimiento.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

La integración de datos de afloramientos y subsuelo (sísmica 3D y pozos) indican que la removilización e inyección de arena en depósitos marinos del Paleoceno-Eoceno de la Cuenca de antepaís Magallanes es un proceso geológico común. En la mayoría de los casos, especialmente en los ejemplos del subsuelo, estos depósitos están asociados con un extenso sistema de canales marino profundo que han sufrido en mayor o menor grado deformación de arena antes de su litificación. En un contexto de antepaís, los ejemplos documentados en este trabajo ocupan una posición de antifosa a rampa de antepaís, sugiriendo una distribución regional. En los bloques operacionales Dorado-Coirón de la Provincia de Magallanes, estos depósitos híbridos están saturados con gas y condensado en cantidades importantes, lo que los convierte en nuevos objetivos con potencial de yacimiento para la cuenca.

En el subsuelo, la sucesión Paleoceno-Eoceno yace a ~2300-6000 m de profundidad y los pozos perforados en el componente antifosa-rampa de antepaís indican condiciones locales de sobrepresión. Los gradientes térmicos calculados a partir de temperaturas de fondo son generalmente altos (~3,4-5,6 °C/100 m). Aunque los mecanismos precisos detrás de la removilización e intrusión clástica en la Cuenca se desconocen, su ocurrencia a escala regional pudiera estar principalmente vinculada a sobrepresión de cuerpos arenosos causada por el efecto combinado de rápida depositación y soterramiento, migración de fluidos diagenéticos (incluyendo agua y gas) y la compresión lateral causada por los esfuerzos tectónicos producidos por la geodinámica andina.

Sísmicamente, la expresión de los depósitos híbridos es caótica pero localmente se observan anomalías de amplitud con forma de alas o discordantes a la estratificación. Al igual que sus contrapartes del subsuelo, las intrusiones clásticas en afloramientos se caracterizan por contactos netos e irregulares con la roca caja, invariablemente más lodosa. En conjunto, los diques individuales varían de mm a ~1 m de espesor. En registros de pozo, estos depósitos tienden a ocurrir en paquetes más espesos y la forma del registro de rayos gamma es comúnmente cilíndrica. Desde el punto de vista petrofísico, la compactación, bioturbación y cementación con calcita parecen controlar la calidad de yacimiento.

Debido a que los procesos involucrados en la removilización e intrusión clástica pueden controlar la arquitectura de yacimientos y el recobro máximo, un entendimiento de la geometría y distribución de estos depósitos puede suministrar las bases no solo para la planificación de pozos e implementación de técnicas de recuperación secundaria, sino también para la creación de modelos conceptuales y numéricos más apropiados sobre el flujo de fluidos tanto a escala regional como a escala de yacimiento. Aunque la Cuenca de Magallanes se encuentra en una etapa madura-marginal en términos de yacimientos cretácicos convencionales, bajo el nuevo potencial abierto por el terciario, esta continúa siendo atractiva para la exploración futura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a las gerencias de ENAP Magallanes y SIPETROL por permitir la publicación de este trabajo y por brindar su invaluable apoyo en la logística y fondos para la adquisición de la información. Extendemos las gracias a Henry Van Aken por su ayuda en la digitalización del mapa geológico de la Cuenca. También agradecemos a Estefanía Tudisca y evaluador anónimo por la revisión y comentarios constructivos.

REFERENCIAS CITADAS

- Allen, J.R.L., 1982, "Sedimentary structures—their character and physical basis, volume II", Elsevier, New York, 663 p.
- Bernhardt, A., Z. Jobe, M. Grove y D. Lowe, 2012, "Paleogeography and diachronous infill and of an ancient deep-marine foreland basin, Upper Cretaceous Cerro Toro Formation, Magallanes Basin", *Basin Research*, v. 23, p. 1-26.
- Beyer, J. y W.A. Griffith, 2016, "Influence of mechanical stratigraphy on clastic injectite growth at Sheep Mountain anticline, Wyoming—a case study of natural hydraulic fracture containment", *Geosphere*, v. 12, p. 1633-1655.
- Biddle, K.T., M.A. Uliana, R.M. Mitchum Jr., M.G. Fitzgerald y R.C. Wright, 1986, "The stratigraphic and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America", en P.A. Allen y P. Homewood (eds.), *Foreland Basins*, International Association of Sedimentologists Special Publications 8, p. 41-63.
- Braccini, E., W. de Boer, A. Hurst, M. Huuse, M. Vigorito y G. Templeton, 2008, "Sand injectites", *Oilfield Review*, summer 2008, p. 34-49.
- Brooke, C.M., T.J. Trimble y T.M. MacKay, 1995, "Mounded shallow gas sands from the Quaternary of the North Sea—analogue for the formation of sand mounds in deep water Tertiary sediments?", en A.J. Hartley y D.J. Prosser (eds.), *Characterization of Deep Marine Clastic Systems*, Geological Society Special Publication 94, p. 95-101.
- Bruhn, R.L. y I.W.D. Dalziel, 1977, "Destruction of the Early Cretaceous marginal basin in the Andes of Tierra del Fuego", en M. Talwani y W.C. Pitman (eds.), *Island Arcs Marginal Basins and Deep Sea Trenches*, American Geophysical Union, p. 395-405.
- Cartwright, J., 2010, "Regionally extensive emplacement of sandstone intrusions—a brief review", *Basin Research*, v. 22, p. 502-516.
- Chan, M., D. Netoff, R. Blakey, G. Kocurek y W. Alvarez, 2007, "Clastic-injection pipes and syndepositional deformation structures in Jurassic eolian deposits—examples from the Colorado Plateau", en A. Hurst y J. Cartwright (eds.), *Sand Injectites—Implications for hydrocarbon exploration and production*, AAPG Memoir 87, p. 233-244.
- Cobain, S.L., D.M. Hodgson, J. Peakall y M.N. Shiers, 2017, "An integrated model of clastic injectites and basin floor lobe complexes—implications for stratigraphic trap plays", *Basin Research*, v. 29, p. 816-835.
- Dalziel, I.W.D., 1981, "Back-arc extension in the southern Andes—a review and critical reappraisal", *Phil. Trans. R. Soc. Lond., A* 300, p. 319-335.

- Dalziel, I.W.D., 1986, "Collision and cordilleran orogenesis—an Andean perspective", en M.P. Coward y A.C. Ries (eds.), *Collision Tectonics*, Geological Society of London Special Publication 19, p. 389-404.
- Deville, E., S.H. Guerlais, S. Lallemand y F. Schneider, 2010, "Fluid dynamics and subsurface sediment mobilization processes—an overview from south-east Caribbean", *Basin Research*, v. 22, p. 361-379.
- Dixon, R.J., K. Schofield, R. Anderton, A.D. Reynolds, R.W.S. Alexander, M.C. Williams y K.G. Davies, 1995, "Mounded shallow gas sands from the Quaternary of the North Sea—analogue for the formation of sand mounds in deep water Tertiary sediments?", en A.J. Hartley y D.J. Prosser (eds.), *Characterization of Deep Marine Clastic Systems*, Geological Society Special Publication 94, p. 95-101.
- Fildani, A. y A.M. Hessler, 2005, "Stratigraphic record across a retroarc basin inversion—Rocas Verdes Magallanes Basin, Patagonian Andes, Chile", *Geological Society of America Bulletin*, v. 117, p. 1596-1614.
- Fildani, A., B.W. Romans, J.C. Fosdick, W.H. Crane y S.M. Hubbard, 2008, "Orogenesis of the Patagonian Andes as reflected by basin evolution in southernmost South America", en J.E. Spencer y S.R. Titley (eds.), *Ores and orogenesis—Circum-Pacific tectonics—geologic evolution and ore deposits*, Arizona Geological Society Digest, v. 22, p. 259-268.
- Fosdick, J.C., S.A. Graham y G.E. Hilley, 2014, "Influence of attenuated lithosphere and sediment loading on flexure of the deep-water Magallanes retroarc foreland basin, Southern Andes", *Tectonics*, v. 33, p. 1-21.
- Gay, A., M. Lopez, P. Cochonat, M. Séranne, D. Levaché y G. Sermondadaz, 2006, "Isolated seafloor pockmarks linked to BSRs, fluid chimneys, polygonal faults and stacked Oligocene-Miocene turbiditic palaeochannels in the Lower Congo Basin", *Marine Geology*, v. 226, p. 25-40.
- Ghiglione, M.C., J. Quinteros, D. Yagupsky, P. Bonillo-Martínez, J. Hlebszevitch, V.A. Ramos, G. Vergani, D. Figueroa, S. Quesada y T. Zapata, 2010, "Structure and tectonic history of the foreland basins of southernmost South America", *Journal of South American Earth Sciences*, v. 2, p. 262-277.
- Ghiglione, M.C. y V.A. Ramos, 2005, "Progression of deformation and sedimentation in the southernmost Andes", *Tectonophysics*, v. 405, p. 25-46.
- Harambour, S., 1978, "Exploración petrolera en Magallanes", ENAP, Informe Interno 07.0100.0007, 15 p. + 3 figuras.
- Hauser, A., 1964, "La Zona Glauconítica en la plataforma Springhill, Magallanes, Chile", Tesis no publicada, Universidad de Chile, Escuela de Geología, 266 p.
- Herrero, C., P. Mella, J. Moraga y L. Donoso, 1999, "Cuenca de Magallanes—situación actual y proyección de la exploración", ENAP, Informe Interno, 33 p. + 40 figuras y 2 anexos.
- Hiscott, R.N., 1979, "Clastic sills and dykes associated with deep-water sandstones, Tourelle Formation, Ordovician, Quebec", *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 49, p. 1-10.
- Holditch, S.A., 2006, "Tigh gas sands", *Journal of Petroleum Technology*, June, p. 86-93.
- Hubbard, S.M., B.W. Romans y S.A. Graham, 2007, "An outcrop example of large-scale conglomeratic intrusions sourced from deep-water channel deposits, Cerro Toro Formation, Magallanes Basin, Southern Chile", en A. Hurst y J. Cartwright (eds.), *Sand Injectites—Implications for Hydrocarbon Exploration and Production*, AAPG Memoir 87, p. 199-207.

- Hurst, A. y J.A. Cartwright, 2007, "Relevance of sand injectites to hydrocarbon exploration and production", en A. Hurst y J.A. Cartwright (eds.), *Sand Injectites—Implications for Hydrocarbon Exploration and Production*, AAPG Memoir 87, p. 1-20.
- Hurst, A. y M. Huuse, 2017, "Keynote—sand Injectites in petroleum systems", en Abstracts of "subsurface sand remobilization and injection—implications for oil and gas exploration and development", Petroleum Group of the Geological Society of London, Burlington House, London, UK, 22-23 March 2017.
- Huuse, M., C. Jackson, J. Cartwright y A. Hurst, 2009, "Large-scale sand injectites in the North Sea—seismic and event stratigraphy and implications for hydrocarbon exploration". AAPG Search and Discovery Article #40481, 30 p.
- Huuse, M., C.A.L. Jackson, P. van Rensbergen, R.J. Davies, P.B. Flemings y R.J. Dixon, 2010, "Sub-surface sediment remobilisation and fluid flow in sedimentary basins—an overview", *Basin Research*, v. 22, p. 342-360.
- Jolly, R.J.H. y L. Lonergan, 2002, "Mechanisms and controls on the formation of sand intrusions", *Journal of the Geological Society of London*, v. 159, p. 605-617.
- Jonk, R., 2010, "Sand-rich injectites in the context of short-lived and long-lived fluid flow", *Basin Research*, v. 22, p. 603-621.
- Jonk, R., A. Hurst, D. Duranti, J. Parnell, A. Mazzini y A.E. Fallick, 2005, "Origin and timing of sand injection, petroleum migration, and diagenesis, south Viking Graben, North Sea", *AAPG Bulletin*, v. 89, p. 329-357.
- Larsen, E. y J. Mangerud, 1992, "Subglacially formed clastic dikes", *Sveriges Geologiska Undersökning*, Ser. Ca 81, p. 163-170.
- Lonergan, L. y J.A. Cartwright, 1999, "Polygonal shrinkage faults and their influence on deepwater reservoir geometries in the Alba Field, UK Central North Sea", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 83, p. 410-432.
- Lonergan, L., N. Lee, J.A. Cartwright, R.J.H. Jolly y H.D. Johnson, 2000, "Remobilization and injection in deepwater depositional systems—implications for reservoir architecture and prediction", en P. Weimer, R.M. Slatt, J. Coleman, N.C. Rosen, H. Nelson, A.H. Bouma, M.J. Styzen y D.T. Lawrence (eds.), *Deepwater reservoirs of the world*, Gulf Coast Section SEPM Foundation 20th Annual Bob F. Perkins Research Conference, p. 515-532.
- MacEachern, J.A. y K.L. Bann, 2008, "The role of ichnology in refining shallow marine facies models", en G.J. Hampson, R.J. Steel, P.M. Burgess y R.W. Dalrymple (eds.), *Recent Advances in Models of Siliciclastic Shallow-Marine Stratigraphy*, SEPM Special Publication 90, p73-116.
- Malkowski, M.A., G.R. Sharman y S.A. Graham, 2015, "Characterization and diachronous initiation of coarse clastic deposition in the Magallanes-Austral foreland basin, Patagonian Andes", *Basin Research*, p. 1-29.
- Mann, D.M. y A.S. Mackenzie, 1990, "Prediction of pore fluid pressures in sedimentary basins" *Marine and Petroleum Geology*, v. 7, p. 55-65.
- Mobil, 1979, "Hydrocarbon potential of the Magallanes Basin, Chile", ENAP, Reporte Interno 01.0201.0109, v. 2-3, 124 p. + 36 figuras.
- Moraga, J., P. Mella, H. Vieytes, D. Méndez, M. Briceño, P. Álvarez y E. Laval, 2004, "Potencial de hidrocarburos en la Cuenca de antepaís Magallanes" ENAP-Magallanes, Reporte Interno, tomos 1-3.

- Mpodozis, C., P. Mella y D. Padva, 2011, "Estratigrafía y megasecuencias sedimentarias en la Cuenca Austral-Magallanes, Argentina y Chile", Instituto Argentino de Petróleo y Gas, VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar de Plata, Argentina, 8-12 de noviembre, 2011, Resúmenes, p. 97-137.
- Natland, M.L., E. González, A. Cañón y M. Ernst, 1974, "A system of stages for correlation of Magallanes Basin sediments" Geological Society of America, Memoir 139, p. 1-126.
- Netoff, D., 2002, "Seismogenically induced fluidization of Jurassic erg sands, south-central Utah", *Sedimentology*, v. 49, p. 65-80.
- Nichols, R.J., 1995, "The liquification and remobilization of sandy sediments", en A.J. Hartley y D.J. Prosser (eds.), *Characterization of Deep Marine Clastic Systems*, Geological Society Special Publication 94, p. 63-76.
- Pankhurst, R.J., T.R. Riley, C.M. Fanning y S.P. Kelley, 2000, "Episodic silicic volcanism in Patagonia and Antarctic Peninsula—chronology of magmatism associated with the break-up of Gondwana", *Journal of Petrology*, v. 41, p. 605-625.
- Purvis, K., J. Kao, K. Flanagan, J. Henderson y D. Durranti, 2002, "Complex reservoir geometries in a deep water clastic sequence, Gryphon Field, UKCS— injection structures, geological modeling and reservoir simulation", *Marine and Petroleum Geology*, v. 19, p. 161-179.
- Schwartz, T.M., J.C. Fosdick y S.A. Graham, 2017, "Using detrital zircon U-Pb ages to calculate Late Cretaceous sedimentation rates in the Magallanes-Austral basin, Patagonia", *Basin Research*, v. 29, p. 725-746.
- Swarbrick, R.E., M.J. Osborne y G.S. Yardley, 2002, "Comparison of overpressure magnitude resulting from the main generating mechanisms", en A.R. Huffman y G.L. Bowers (eds.), *Pressure Regimes in Sedimentary Basins and Their Prediction*, AAPG Memoir 76, p. 1-12.
- Thomas, C.R., 1949, "Geology and petroleum exploration in Magallanes Province, Chile", *AAPG Bulletin*, v. 33, p. 1553-1578.
- TSCreator, visualization of enhanced Geologic Time Scale 2004 database (Version 7.1; 2018) James Ogg (database coordinator) and Adam Lugowski (software developer) <http://www.tscreeator.org>.
- Weimer, P. y R.M. Slatt, 2007, "Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Settings", *AAPG Studies in Geology* 57, 816 p.
- Williams, G., 2001, "Neoproterozoic (Torridonian) alluvial fan succession, northwest Scotland, and its tectonic setting and provenance", *Geological Magazine*, v. 138, p. 471-494.
- Wilson, T.J. 1991. "Transition from back-arc to foreland basin development in the southernmost Andes—stratigraphic record from the Ultima Esperanza District, Chile", *Geological Society of America Bulletin*, v. 103, p. 98-111.
- Winslow, M.A., 1981, "The structural evolution of the Magallanes basin and neotectonics in the southernmost Andes", *Antarctic Geosciences*, 3rd symposium on Antarctic geology and geophysics, Madison, University of Wisconsin Press, p. 143-154.
- Winslow, M.A., 1983. "Clastic dike swarms and the structural evolution of the foreland fold and thrust belt of the southern Andes", *Geological Society of America Bulletin*, v. 94, p. 1073-1080.

