

DEPOCENTROS CENOZOICOS DE LA CUENCA AUSTRAL EN EL CONTEXTO DE LA APERTURA DEL PASAJE DE DRAKE

Matías C. Ghiglione¹, Rocío Gallardo-Jara¹, Mauricio Calderón², Julie Fosdick³, Juan Albano¹,
Pedro Kress⁴ y Fernanda Raggio⁴

1: IDEAN. matias@gl.fcen.uba.ar, rocio.gallardo.jara@gmail.com, juanf.albano@gmail.com

2: Universidad del Desarrollo, Carrera de Geología, Santiago, Chile. mccaldera@gmail.com

3: Department of Geosciences, University of Connecticut, Storrs, CT 06269. julie.fosdick@uconn.edu

4: YPF S.A. pkress@ypf.com

Palabras clave: Cuenca Austral offshore, Andes Fueguinos, sistemas de cuenca de antepaís, circones detríticos

ABSTRACT

Cretaceous-Cenozoic interaction between the South America and Antarctica plates has been a major driver of kinematics in the Southernmost Andes, imprinting extensional and strike-slip deformation within the foreland in Tierra del Fuego. Late Cretaceous basin inversion and transpression along the Beagle channel was due to their left-lateral relative displacement. Orogen building continued during the Paleogene, together with progression of sedimentation in the associated Austral-Malvinas marine foreland basin system and depocenters migrations. The Eocene early opening of the Drake passage due to Antarctica separation, involved the combination of strike-slip and extensional tectonics, superposed to the previously consolidated orogen. A series of latest Paleocene–early Eocene fault-related extensional depocenters can be recognized in the Austral and Malvinas basins, which represent a direct indication of continental lithospheric stretching preceding the opening of embryonic basins in the West Scotia Sea. A middle-late Eocene compressional stage followed, characterized by rapid migration of the orogenic front and establishment of a widespread wedge-top depocenter. Since the Oligocene inception of oceanic spreading in the West Scotia Sea, strike-slip deformation has dominated, concentrated along the North Scotia ridge-Magallanes-Fagnano fault zone. As a result, late Cenozoic continental pull-apart basins are registered in a hinterland position. Coeval retroarc Miocene sedimentation includes an important continental volcanoclastic component and distributary system funneling sediments to deep marine basins. In this context, tectonic loading, dynamic subsidence, and transtension/pull-apart extension seems to be superposed; alternatively, they may be partitioned processes and geographically distributed. We present a synthesis of this history of changing tectonic regimes and depocenters migration in the southernmost Andes and the Austral basin from and discuss the implication of new detrital zircons provenance data.

INTRODUCCIÓN

El depocentro de la cuenca Austral al sur del alto de Río Chico y su continuación hacia la cuenca de Malvinas, desarrollados en el sector de Tierra del Fuego y *offshore* adyacente (Fig.1) sufrió la superposición de diferentes eventos cinemáticos y como consecuencia, diferentes mecanismos de subsidencia sedimentaria. Por un lado, existió compresión desde el sector andino y subsidencia por carga tectónica (Galeazzi 1998; Bry *et al.* 2004; Tassone *et al.* 2008; Baristead *et al.* 2013), mientras que mecanismos de strike-slip y tectónica extensional se registraron como consecuencia de la apertura del pasaje de Drake y la posterior implantación de un límite de placa transcurrente (Livermore *et al.* 2005; Eagles *et al.* 2006; Ghiglione *et al.* 2008, 2010; Esteban *et al.* 2018; Ormazabal *et al.* 2019).

Para el Paleoceno, existe evidencia termocronológica de exhumación del núcleo cordillerano, interpretada como debida a una tectónica extensional (Kohn *et al.* 1995), que tiene su correlato en estratos de crecimiento extensionales, aflorantes sobre la costa atlántica en península Mitre (Ghiglione *et al.* 2008, 2010) y sistemas de fallas normales activos durante el Cenozoico temprano en la Cuenca de Malvinas (Galeazzi 1998; Bry *et al.* 2004; Tassone *et al.* 2008; Baristead *et al.* 2013; Esteban *et al.* 2020 Ormazábal *et al.* 2020). Estas observaciones contrastan con la existencia de un amplio depocentro Paleoceno de antepaís (e.g. Gallardo *et al.* 2019 y las referencias ahí citadas), cuya geometría y registro sedimentario es característico de un proceso de subsidencia por carga tectónica (Biddle *et al.* 1986). Además, existe evidencia termocronológica de exhumación asociada a compresión (Gombosi *et al.* 2009), estratos de crecimiento compresivos y fallas inversas con un significativo acortamiento durante el Paleógeno (Kraemer 2003; Ghiglione 2016). Estos elementos apuntan a una rápida propagación del frente orogénico y la faja plegada y corrida, acompañada por una migración de los depocentros del sistema de cuenca de antepaís hacia el Norte (Barbeau *et al.* 2009), más específicamente durante el Eoceno medio a tardío, de manera que la evolución Cenozoica temprana, puede ser explicada por un evento extensional seguido de compresión (Ghiglione *et al.* 2008, 2010). A comienzos del Oligoceno tardío a Mioceno, el sistema transcurrente de la Dorsal de Scotia Norte - Falla Magallanes Fagnano (Fig. 1) se implanta como consecuencia de la componente O-E de separación de las placas América del Sur y Antártida, junto con la generación de corteza oceánica en la placa de Scotia (Lodolo *et al.* 2006; Ghiglione 2016; Esteban *et al.* 2018, 2020).

La presente contribución consta de un resumen de la historia tectónica cenozoica, seguida de la presentación de datos de edades y procedencia a partir de circones detríticos de secuencias miocenas que cubren el depocentro de las cuencas Austral y Malvinas en Tierra del Fuego (Fig. 1). El contenido de circones detríticos del Mioceno es utilizado para analizar variaciones en las áreas principales de procedencia para todo el Cenozoico al integrarlas con

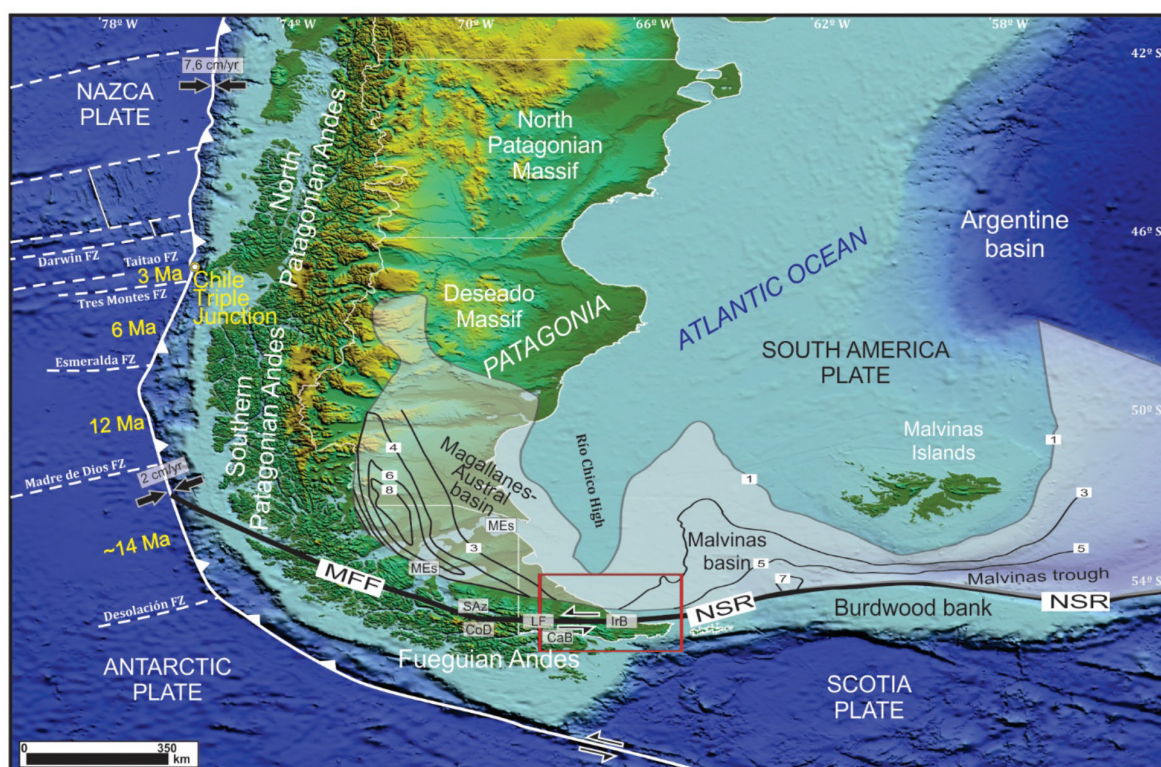


Figura 1. Mapa morfoestructural de ubicación de Figura 3 (cuadro rojo), modificado de Ghiglione *et al.* (2010). CaB Canal Beagle; CoD Cordillera Darwin; FZ zona de falla; IrB Cuenca Irigoyen; MEs estrecho de Magallanes; MFF Falla Magallanes-Fagnano; NSR Dorsal de Scotia Norte; SAz Seno Almirantazgo. Contornos representan el espesor sedimentario en kilómetros.

estudios previos (Barbeau *et al.* 2009) y para discutir la relación de esas variaciones con el contexto tectónico variable.

A partir del análisis y ampliando la propuesta de Barbeau *et al.* (2009), proponemos dos cambios fundamentales en la procedencia, alrededor de los 40 Ma y ~30 Ma, debidos a la apertura temprana del Pasaje de Drake y el inicio de la tectónica de rumbo, respectivamente. Se discute además la distribución de depocentros sedimentarios cenozoicos con diferentes mecanismos de subsidencia, bajo la luz de los nuevos resultados.

HISTORIA TECTÓNICA Y SEDIMENTARIA CENOZOICA

La interacción cenozoica entre Antártida y América del Sur se puede dividir en tres fases I-III (Fig. 2) según los vectores de movimientos relativos entre placas, propuestas por Livermore *et al.* (2005).

La fase (I) durante el Paleoceno tardío-Eoceno temprano muestra una lenta separación N-S entre ambos continentes, acompañada de un evento de *rifting* intracontinental que afectó Tierra del Fuego (Ghiglione *et al.* 2008, 2010) y la Cuenca de Malvinas (Galeazzi, 1998; Baristeas *et al.* 2013; Esteban *et al.* 2018, 2020). El análisis de anomalías magnéticas en el

Mar de Scotia indica un incremento de 800% en dichas tasas de separación a partir de los ~50 Ma (comienzo de fase II de Livermore *et al.* 2005; Eagles *et al.* 2006), debido a la deriva relativa hacia el NW de Patagonia de unos 5 grados de latitud durante el Eoceno (Somoza, 2007). El marcado aumento en las tasas de separación continental, hasta llegar a 2,4 cm/año (Fig. 2) produjo la apertura de pequeñas cuencas extensionales (cuenca Dove y cuenca Protector) al norte de la península Antártica, en un proceso de apertura inicial o temprana del pasaje de Drake (Lawver and Gahagan, 2003; Eagles *et al.* 2006).

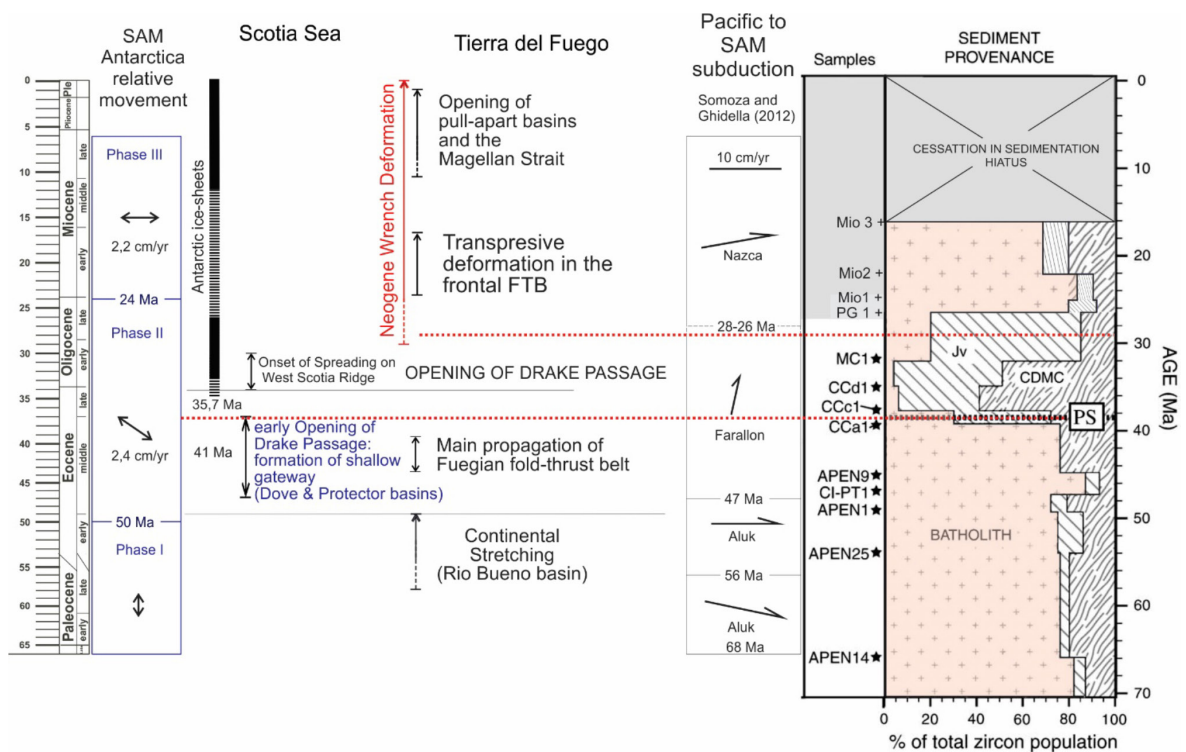


Figura 2. Correlación de eventos tectónicos principales entre Tierra del Fuego y el Mar de Scotia. La columna derecha representa las variaciones en el porcentaje de zircons detríticos de muestras cenozoicas de Barbeau *et al.* (2009), y el presente estudio (muestras Mio 1–3).

Datos estructurales y geofísicos de la faja plegada y corrida de los Andes Fueguinos, tomados sobre la costa Atlántica (Fig. 3), indican la presencia de depocentros extensionales Paleocenos-Eocenos tempranos (Ghiglione *et al.* 2008), que tienen su correlato en depocentros y sistemas de fallas extensionales Paleógenos en la cuenca de Malvinas (Galeazzi, 1998; Bry *et al.* 2004; Esteban *et al.* 2018, 2020; Ormazábal *et al.* 2019, 2020). Es importante recalcar que esta fase extensional en la corteza continental parece circunscribirse a la península Mitre y el sector de *offshore* aledaño (Fig. 3; Ghiglione *et al.* 2010; Esteban *et al.* 2018, 2020) y su desarrollo coincide con la fase I de lenta separación N-S entre América del Sur y Antártida (Fig. 2). Una superficie de *break-up* datada en ~49 Ma, que indica el final de la fase de *rift*, coincide con el inicio de la fase II (Fig. 2) y la rápida separación entre América del Sur y

Antártida (Livermore *et al.* 2005; Eagles *et al.* 2006), que finalmente devendría en la apertura del pasaje de Drake.

Existen numerosos trabajos que indican una fase paleógena de deformación compresiva, levantamiento del basamento y propagación de la faja plegada y corrida fueguina (e.g. Kraemer, 2003; Ghiglione and Ramos, 2005). Esa fase compresiva ha sido datada como Eocena media a tardía, sobre la base de estratos de crecimiento (Ghiglione and Ramos 2005) y termocronometría (Gombosi *et al.* 2009) consistente y relacionada con un cambio brusco en los patrones de proveniencia sedimentaria de la cuenca Austral que, según circones detríticos, ocurrió a los ~39 Ma (Barbeau *et al.* 2009). El cambio en la proveniencia, coincide con estratos de crecimiento Eocenos (~49 to 34 Ma) depositados en un amplio depocentro de techo de cuña en el sector externo de la faja plegada y corrida fueguina (Ghiglione and Ramos 2005); más recientemente, un nivel dentro de dichos estratos de crecimiento ha sido datado en 46 Ma (Olivero *et al.* 2020), en coincidencia con las propuestas previas.

El movimiento relativo entre Antártida y América del Sur se comenzó a acomodar por generación de corteza oceánica en la dorsal Occidental del Mar de Scotia desde los ~28 Ma (Lodolo *et al.* 2006), y a continuación durante un marcado cambio en el movimiento relativo de NO-SE a O-E desde los 24 Ma (Fig. 2) comienza la fase III - transcurrente. A los 16 Ma la placa de Scotia se separa definitivamente de América del Sur a partir de un límite placa transcurrente sinistral, que incluye la dorsal de Scotia Norte en *offshore*, y su continuación en el continente, la zona de falla Magallanes-Fagnano (Fig. 3; Esteban *et al.* 2018, 2020 Ormazabal *et al.* 2019, 2020).

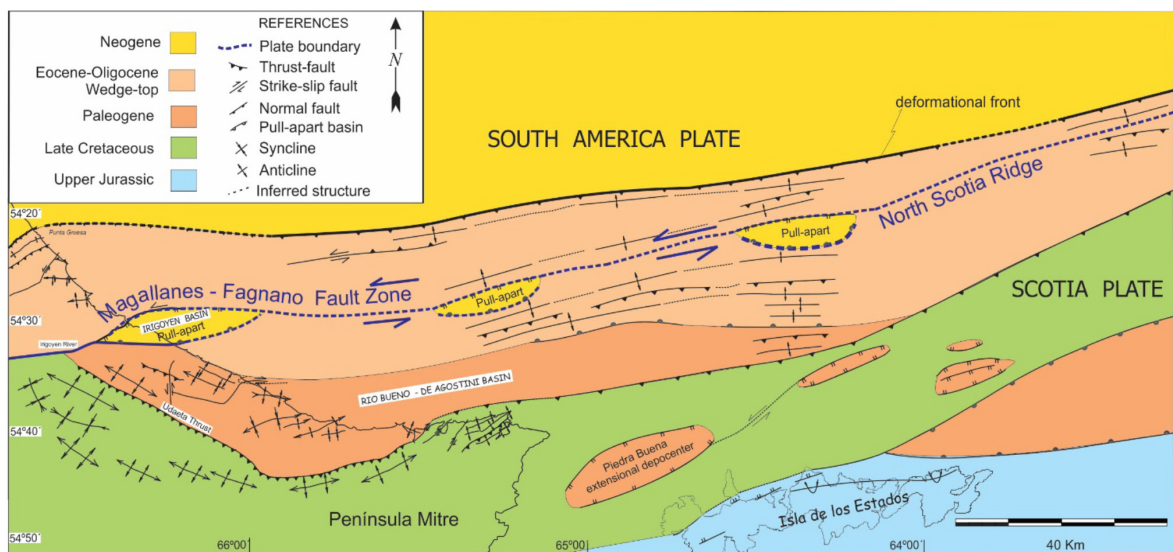


Figura 3. Mapa de la Península Mitre – Cuenca de Malvinas, modificado de Ghiglione *et al.* (2010), con datos de Ghiglione y Ramos (2005), Tassone *et al.* (2008) y Esteban *et al.* 2018, 2019).

ANÁLISIS DE ZIRCONES DETRÍTICOS

Las muestras denominadas Mio 1 a Mio 3 fueron tomadas en secuencias Neógenas desarrolladas al norte del frente orogénico (Fig. 3), en el depocentro de antepaís (*foredeep* s.s.). El patrón de distribución de circones detríticos se analizó a partir de histogramas y diagramas normalizados de frecuencia relativa (Fig. 4A). En la Figura 4A se indica el número de circones y su rango de edades para cada muestra. Las edades máximas de depósito fueron estimadas a partir de la edad del zircón más joven o calculando la media (MDA) del primer grupo de circones cuyos errores se superponen (Fig. 4B). Los valores estimados preferidos para cada muestra corresponden al zircón más joven de ~25 Ma para Mio 1, los MDA de ~22 Ma (Mio 2) y ~17 Ma (Mio 3). Las edades estimadas son coherentes de acuerdo a la posición estratigráfica y relativa de las muestras y en el caso de las muestras Mio 2 y 3, coinciden con los picos de edades más jóvenes (Fig. 4A), que podrían coincidir con el momento de la sedimentación.

Las tres muestras presentan una similar distribución relativa de circones mesozoicos, caracterizada por picos Cretácicos tardíos de 76–99 Ma, y Jurásicos de entre 151–160 Ma, mientras que los circones paleozoicos y neoproterozoicos son muy escasos (Fig. 4A). En acuerdo con diversos estudios de zircons detríticos en la Cuenca Austral, los circones Cretácico tardíos son considerados como provenientes del Batolito Patagónico en sector al sur del canal Beagle, mientras que los Jurásicos y los paleozoicos-neoproterozoicos se corresponderían respectivamente con el synrift y basamento, aflorantes en el núcleo de la cordillera, entre el canal Beagle y la falla Magallanes-Fagnano (Fig. 1).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al analizar la variación vertical estratigráfica de los patrones de proporción de edades de circones detríticos para el Cenozoico (columna derecha en Fig. 2), se registra un importante cambio alrededor de los 40 Ma (Barbeau *et al.* 2009). En general, las muestras del Paleoceno a Eoceno medio presentan proveniencia predominante del Batolito Patagónico (~80% del contenido) con picos de 72, 98 y 130 Ma (APEN1, Fig. 4), y muy baja proporción (20%) del Jurásico y Basamento (Fig. 2). En cambio, para las muestras del Eoceno medio a Oligoceno inferior, se obtuvieron relaciones inversas (Barbeau *et al.* 2009), con un 20% de circones del Cretácicos asignados a rocas del Batolito Patagónico, y un 80% del Jurásico y Basamento (Fig. 2), siendo el pico principal de ~151 Ma (Ccd1, Fig. 4).

Según Barbeau *et al.* (2009), el cambio en la proveniencia de los 40Ma se puede interpretar como producto de la combinación sincrónica de la deformación compresiva en los Andes Fueguinos, y la apertura del pasaje de Drake. La región habría sido afectada por una

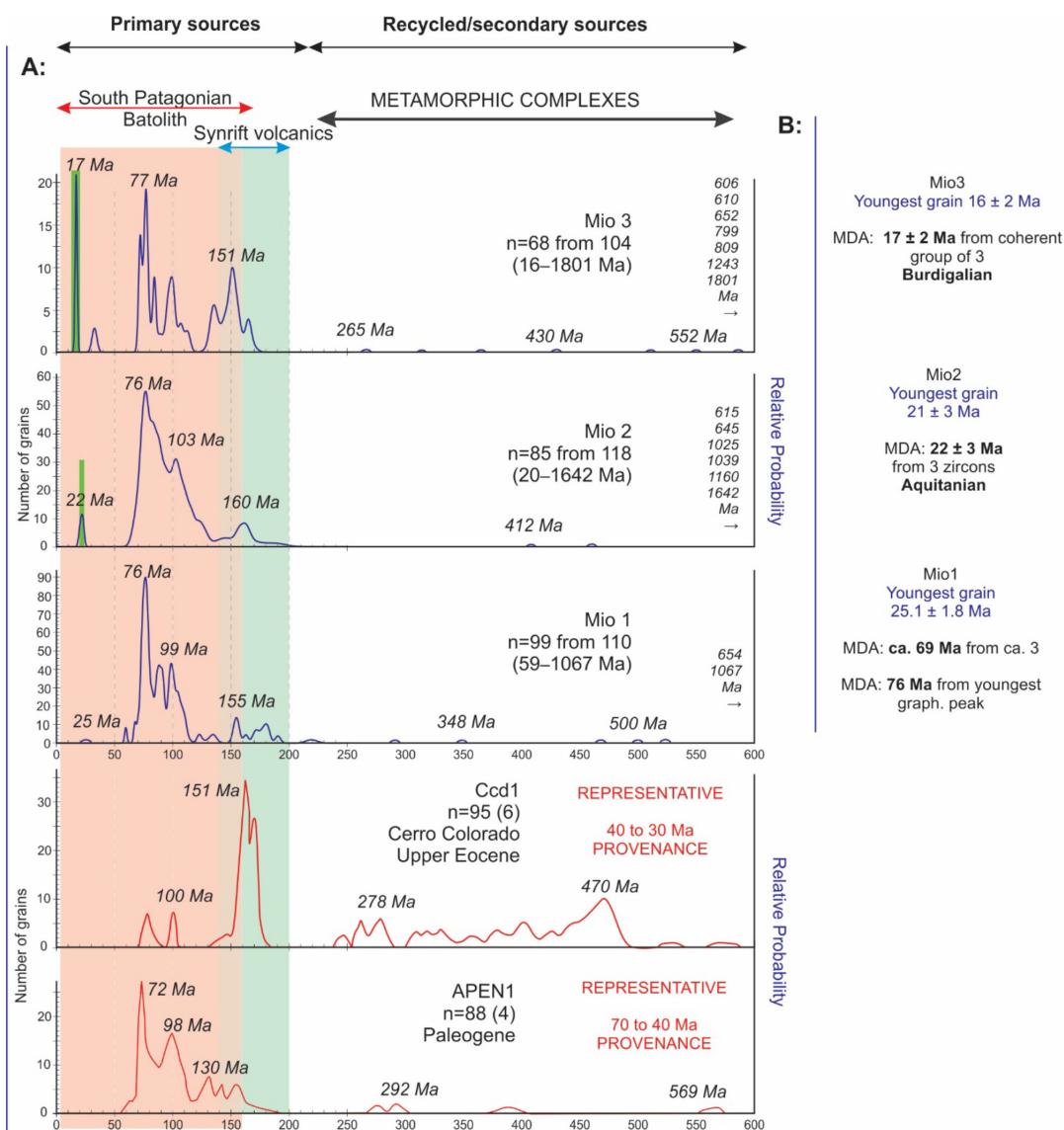


Figura 4. (A) Histogramas de frecuencia y curvas de probabilidad relativas de edades U-Pb en muestras Mio-cenas de este estudio (curvas en azul, muestras Mio 1–3) y de dos muestras representativas del Cretácico Superior–Paleógeno/Oligoceno (curvas en rojo, muestras APEN1 & Ccd1) tomadas de Barbeau *et al.* 2009 (B) Edad de los circones más jóvenes, y edad máxima de depósito (MDA) calculadas para cada muestra estudiada.

combinación de cinemática de rumbo y compresiva durante el Eoceno medio a Oligoceno (Ghiglione *et al.* 2008). Esta hipótesis infiere que existió un cambio en la divisoria de aguas, marcada por corrimientos activos y aflorantes, indicando una migración del frente orogénico desde el canal Beagle, hacia el norte, alcanzando el lago Fagnano, y dejando expuestas rocas paleozoicas y jurásicas. En definitiva, el cambio a los 40 Ma, fue debido a la compresión y levantamiento del sector de Basamento/Jurásico, que comenzó a aportar sedimentos más antiguos a la cuenca de antepaís.

En ese sentido, la distribución de proporción de zircons para el periodo Maastrichtiano/Paleoceno–Oligoceno, se pueden interpretar según Barbeau *et al.* (2009) como debido a un proceso

de destechado típico de un sistema orógeno - cuenca de antepaís. Ese mismo marco geodinámico de deformación-sedimentación se corresponde con la geometría de secuencias ubicadas al norte del frente orogénico, con forma de cuña que se engrosa hacia el orógeno, típica de depocentro de antepaís (e.g. Gallardo Jara *et al.* 2019; Fuentes 2022). Se debe diferenciar entonces la posición de los diferentes depocentros y la ubicación de las muestras. Las muestras de Barbeau y las aquí presentadas fueron tomadas de los depocentros del sistema de cuenca de antepaís, ya sea foredeep s.s. o techo de cuña. Los depocentros extensionales paleocenos-eocenos se emplazaron en península Mitre, y los Neógenos sobre la traza de la falla Magallanes-Fagnano, típicamente la Cuenca Irigoyen aflorante sobre la costa atlántica (Fig. 3). Los mismos depocentros extensionales se continúan hacia el sector de *offshore*, donde presentan aun mayor desarrollo (Esteban *et al.* 2018, 2020; Ormazábal *et al.* 2019, 2020).

Lo novedoso de los nuevos datos presentados es que, al complementar estudios previos, muestran que a partir de los 30-26 Ma se vuelve a un sistema de procedencia dominado por componentes del Batolito Patagónico (Fig. 4A), con circones del basamento y jurásico en valores relativos menores al 20%. La modificación sustantiva en la procedencia sedimentaria, coincide con un cambio en la dispersión regional de los sedimentos, debido al levantamiento dinámico del antepaís extra-andino (Dávila *et al.* 2019), y sistemas axiales que sobrepasaban el continente hacia el *offshore* (Ghiglione 2016; Fosdick *et al.* 2020). En este caso, se podría interpretar que el cambio en los patrones de proveniencia de circones detríticos expresa el cambio desde un sistema de dispersión de los sedimentos transversal a la cordillera, a otro axial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a YPF S.A. por costear los análisis de circones detríticos.

REFERENCIAS CITADAS

- Barbeau DL, Olivero E, Swanson-Hysell N, Zahid K, Murray K, Gehrels G (2009) Detrital-zircon geochronology of the eastern Magallanes foreland basin: Implications for Eocene kinematics of the northern Scotia Arc and Drake Passage. *Earth Planet Sc Lett* 20: 23-45.
- Baristean N, Anka Z, di Primio R, Rodriguez JF, Marchal D, Dominguez F (2013) New insights into the tectono-stratigraphic evolution of the Malvinas Basin, offshore of the southernmost Argentinean continental margin. *Tectonophysics* 604: 280-295.
- Biddle KT, Uliana MA, Mitchum RM, Fitzgerald MG, Wright RC (1986) The stratigraphy and structural evolution of the central and eastern Magallanes Basin, southern South America. In: Al-len A, Homewood P (eds) *Foreland Basins*, Blackwell Scientific Publications, London. *Int Assoc Sediment Special Publication* 8: 41-61.
- Bry M, White N, Singh S, England R, Trowell C (2004)

- Anatomy and formation of oblique continental collision: South Falkland basin. *Tectonics* 23(4): TC401.
- Dávila, F. M., Ávila, P., & Martina, F. (2019). Relative contributions of tectonics and dynamic topography to the Mesozoic-Cenozoic subsidence of southern Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 412-423.
- Eagles G, Jokat W (2014) Tectonic reconstructions for paleobathymetry in Drake Passage. *Tectonophysics* 611: 28-50.
- Eagles G, Livermore RA, Morris P (2006) Small basins in the Scotia Sea: The Eocene Drake Passage gateway. *Earth Planet Sc Lett* 242: 343-353.
- Esteban, F. D., Tassone, A., Isola, J. I., Lodolo, E., & Menichetti, M. (2018). Geometry and structure of the pull-apart basins developed along the western South American-Scotia plate boundary (SW Atlantic Ocean). *Journal of South American Earth Sciences*, 83, 96-116.
- Esteban, F. D., Ormazábal, J. P., Palma, F., Cayo, L. E., Lodolo, E., & Tassone, A. (2020). Strike-slip related folding within the Malvinas/Falkland Trough (south-western Atlantic ocean). *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102452.
- Fosdick, J. C., VanderLeest, R. A., Bostelmann, J. E., Leonard, J. S., Ugalde, R., Oyarzún, J. L., ... & Simms, A. R. (2020). Revised timing of Cenozoic Atlantic incursions and changing hinterland sediment sources during southern Patagonian orogenesis. *Lithosphere*, 2020(1).
- Fuentes, F. (2022) Foothills structure of the Andes of Tierra del Fuego, Argentina and Chile. Chapter 36 in "Andean Structural Styles: A seismic atlas", Editors: Gonzalo Zamora, Andrés Mora, Elsevier.
- Galeazzi JS (1998) Structural and stratigraphic evolution of the West-ern Malvinas Basin, Argentina. *Am Assoc Petrol Geol Bulletin* 82: 596-636
- Gallardo Jara, R. E., Ghiglione, M. C., & Rojas Galliani, L. (2019). Tectonic evolution of the southern Austral-Magallanes Basin in Tierra del Fuego. *Latin American journal of sedimentology and basin analysis*, 26(2), 127-154.
- Ghiglione MC, Ramos VA (2005) Chronology of deformation in the Southernmost Andes of Tierra del Fuego. *Tectonophysics* 405: 25-46
- Ghiglione MC, Yagupsky D, Ghidella M, Ramos VA (2008) Continental stretching preceding the opening of the Drake Passage: evidence from Tierra del Fuego. *Geology* 36: 643-646.
- Ghiglione MC, Quinteros J, Yagupsky D, Bonillo-Martínez P, Hlebszevitch J, Ramos VA, Vergani G, Figueroa D, Quesada S, Zapata T (2010) Structure and tectonic history of the fore-land basins of southernmost South America. *J South Am Earth Sci* 29: 262-277
- Ghiglione, M. C. (2016). Orogenic growth of the Fuegian Andes (52–56°) and their relation to tectonics of the Scotia Arc. In *Growth of the southern Andes* (pp. 241-267). Springer.
- Gombosi DJ, Barbeau DL, Garver J (2009) New thermochronometric constraints on the rapid Paleogene exhumation of the Cordillera Darwin complex and related thrust sheets in the Fuegian Andes. *Terra Nova* 21: 507-515.
- Kohn MJ, Spear FS, Harrison TM, Dalziel IWD (1995) Ar-40/Ar-39 Geochronology and P-T-T Paths from the Cordillera Darwin Metamorphic Complex, Tierra del Fuego, Chile. *J Metamorphic Geol* 13:251-270
- Kraemer PE (2003) Orogenic shortening and the origin of the Patagonian orocline (56° S Lat). *J South Am Earth Sci* 15: 731-748.

- Lawver LA, Gahagan LM (2003) Evolution of Cenozoic seaways in the circum-Antarctic region. *Palaeo-geo Palaeoclim Palaeoecol* 198: 11-37
- Livermore RA, Nankivell AP, Eagles G, Morris P (2005) Paleogene opening of Drake Passage. *Earth Planet Sc Lett* 236: 459-470
- Lodolo E, Donda F, Tassone A (2006) Western Scotia Sea margins: Improved constraints on the opening of the Drake Passage. *J Geophys Res* 111(6): B06101.
- Olivero, E. B., Carbonell, P. J. T., Svojtka, M., Fanning, M., Hervé, F., & Nývlt, D. (2020). Eocene volcanism in the Fuegian Andes: Evidence from petrography and detrital zircons in marine volcanoclastic sandstones. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102853.
- Ormazabal, J. P., Isola, J. I., Palma, F. I., Lozano, J. G., Esteban, F. D., Menichetti, M. M., ... & Tassone, A. A. (2020). Basement structural control in the Magallanes-Malvinas Fold and Thrust Belt, offshore Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 103, 102708.
- Ormazabal, J. P., Tassone, A., Esteban, F., Isola, J., Cayo, L. E., Lozano, J., ... & Lodolo, E. (2019). Structure of the wedge-top and foredeep of the Magallanes-Malvinas basins between 62° W and 67° W (SW Atlantic Ocean). *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 364-381.
- Somoza R (2007) Eocene paleomagnetic pole for South America: Northward continental motion in the Cenozoic, opening of Drake Passage and Caribbean convergence. *J Geophys Res* 112: B03104.
- Tassone A, Lodolo E, Menichetti M, Yagupsky D, Caffau M, Vilas JF (2008) Seismostratigraphic and structural setting of the Malvinas Basin and its southern margin (Tierra del Fuego Atlantic offshore). *Geologica Acta* 6: 55-67.