

MODELOS DE CINEMÁTICA DE PLACAS PARA ANTÁRTIDA DURANTE LA RUPTURA DE GONDWANA: UNA REVISIÓN

M. E. GHIDELLA¹, L. A. LAWVER², S. MARENSSI¹, L. M. GAHAGAN²

¹ Instituto Antártico Argentino, Cerrito 1248, C1010AAZ, Buenos Aires. Email: mghidella@dna.gov.ar

² Institute for Geophysics, University of Texas at Austin, 10100 Burnet Rd. - R2200, Austin, Texas 78758-4445, U.S.A.

RESUMEN:

La historia de apertura del mar de Weddell y del Océano Atlántico Sur es crítica para comprender la ruptura de Gondwana y la evolución geológica de Antártida desde el Jurásico temprano. La dispersión de los fragmentos gondwánicos es importante para entender la circulación oceánica del pasado, descifrar la historia de las cuencas sedimentarias ubicadas al Este de la Península Antártica y establecer posibles rutas de dispersión de flora y fauna entre los continentes australes. Desafortunadamente, la tectónica del mar de Weddell es difícil de resolver debido a la escasez de datos y a su inherente complejidad. Aunque se ha alcanzado un progreso muy grande en los últimos 20 años, con nuevos datos aeromagnéticos marinos y mapas de gravedad derivada de altimetría satelital, todavía hay varios modelos en consideración que difieren en edades corticales y esquemas de apertura. En este trabajo se presenta una revisión de cuatro de esos modelos. Utilizando polos de rotación, isócronas sintéticas y líneas de flujo, se ha procedido hacia atrás en el tiempo comenzando en la anomalía magnética 34 (83,5 millones de años), porque la misma está relativamente bien definida en los océanos, y se presentan mapas de edades de corteza que muestran la trayectoria estimada del punto triple Sudamérica - Antártida - África para cada modelo. Asimismo se muestran gráficos de las reconstrucciones en cuatro épocas elegidas para todos los modelos usando la misma proyección y escala para facilitar la comparación. La variedad de suposiciones simplificadoras que debieron hacerse en cada modelo, recurriendo a fragmentación de placas para considerar las numerosas cuencas de *syn-rift* y períodos de extensión, son fuertes indicadores de que la tectónica de placas rígidas es un modelo demasiado simple para el presente problema.

Palabras clave: *Mar de Weddell, tectónica de placas, anomalías magnéticas, isócrona, polos de Euler.*

ABSTRACT: *Plate kinematic models for Antarctica during Gondwana break-up: A review.*

The opening history of both the Weddell Sea and South Atlantic Ocean is critical to understand the break-up of Gondwana and the geological evolution of Antarctica since Early Jurassic times. The dispersal of the Gondwanide fragments is important to understand the development of past ocean circulation, the evolution of sedimentary basins located to the East of the Antarctic Peninsula and to assess possible routes for the dispersal of plants and animals among the southern continents. Unfortunately the tectonics of the Weddell Sea is difficult to resolve because of the scarcity of data and the region's complexity. Although considerable progress has been achieved in the past 20 years with new marine aeromagnetic data and satellite-derived gravity anomaly maps, there are still several models in consideration which differ in crustal ages and schemes of opening. In this paper we present a review of four of those models. By using poles of rotation, synthetic isochrons and flowlines, we proceed backward in time beginning at Chron 34 (83.5 million years), as it is relatively well defined ocean wide, and present crustal age maps that display the estimated trace of the South America-Antarctica-Africa triple junction for each model. We also plot reconstructions at four selected epochs for all models using the same projection and scale to facilitate comparison. The diverse simplifying assumptions that need to be made in every case regarding plate fragmentation to account for the numerous syn-rift basins and periods of stretching are strong indicators that rigid plate tectonics is too simple a model for the present problem.

Keywords: *Weddell Sea, plate tectonics, magnetic anomalies, isochron, Euler poles.*

INTRODUCCIÓN

La forma detallada en que se desmembró el supercontinente de Gondwana sigue siendo controversial, coexistiendo una cantidad de modelos de tectónica de placas rígidas. Algunos modelos proponen una variedad de fragmentaciones para el continente sudamericano, creando así varias subplacas que se hacen necesarias para acomodar los continentes que antes estuvieron amalgamados. Indudablemente, Antártida juega un rol pro-

tagónico en el estudio de este fenómeno. El supercontinente de Gondwana, con Antártida en el centro, comenzó a fragmentarse entre el Triásico tardío y el Jurásico temprano (Lawver *et al.* 1992). La primera separación fue entre lo que se ha dado en llamar Gondwana Occidental (Sudamérica y África) y Gondwana Oriental (Antártida, India y Australia). El siguiente cambio altamente significativo ocurrió hace aproximadamente 130 Ma, con la apertura del Océano Atlántico y la separación de India de Antártida.

El mar de Weddell comenzó a formarse en la primera ruptura (LaBrecque y Barker 1981, LaBrecque *et al.* 1986, Lawver *et al.* 1992). Su posterior evolución es crucial para comprender la historia geológica de toda la Antártida (Elliot 1991). Se originó como el flanco sur de un sistema de expansión de fondo oceánico que fue probablemente el precursor del que aún está activo al este de las islas Sandwich del Sur entre las placas Sudamericana y Antártica. El flanco norte y el centro de ese sistema de expansión ahora

no existen, porque fueron subducidos debajo de las placas de Scotia, Sandwich y del bloque de las Orcadas (Barker *et al.* 1984, LaBrecque *et al.* 1986, Barker y Lawver, 1988, LaBrecque *et al.* 1989) durante la apertura del pasaje de Drake y la creación de la placa de Scotia. En la figura 1 se puede ver la configuración actual de placas litosféricas, mientras que la figura 2 muestra con mayor detalle el marco tectónico actual de la región que fue el escenario de los primeros pasos en la ruptura.

El continente antártico está estructuralmente dividido en Antártida Oriental, que es un escudo cratónico estable, y Antártida Occidental que está compuesta de varios bloques o microplacas que representan fragmentos del margen del supercontinente de Gondwana según Dalziel y Elliot (1982). Los bloques continentales de la Antártida Occidental han experimentado movimientos relativos como lo indican los estudios paleomagnéticos de Grunow *et al.* (1991) y Grunow (1992). Los márgenes del mar de Weddell comprenden bloques de la Antártida Occidental al oeste y sudoeste (la Península Antártica y el bloque de Filchner) y el cratón de la Antártida Oriental hacia el este (Fig. 1). Aquí también se aprecia que las otras placas mayores involucradas son África y Sudamérica, y que entre ésta y Antártida existe la placa de Scotia. Esta es una placa que se "interpuso" muchos millones de años después de la ruptura de Gondwana, y que al hacerlo borró la mayoría de las huellas de la separación entre Sudamérica y Antártida.

Numerosos investigadores consideran que la fracturación inicial de Gondwana muy probablemente resultó de la incidencia de una gran pluma astenosférica en la unión de los cratones de África y Antártida. El ancestral punto caliente de Bouvet creó una gran región de corteza oceánica engrosada que está ahora presente en las plataformas de Malvinas y de Mozambique y en el embalse del mar de Weddell, así como también en las coladas basálticas de la región de la cuenca de Karoo. La pluma puede haber sido el factor desencadenante junto con la formación de largos diques alineados conocidos como las doleritas de Ferrar, que rompió los cratones gondwánicos que resultaron en la separación entre el Gondwana occi-

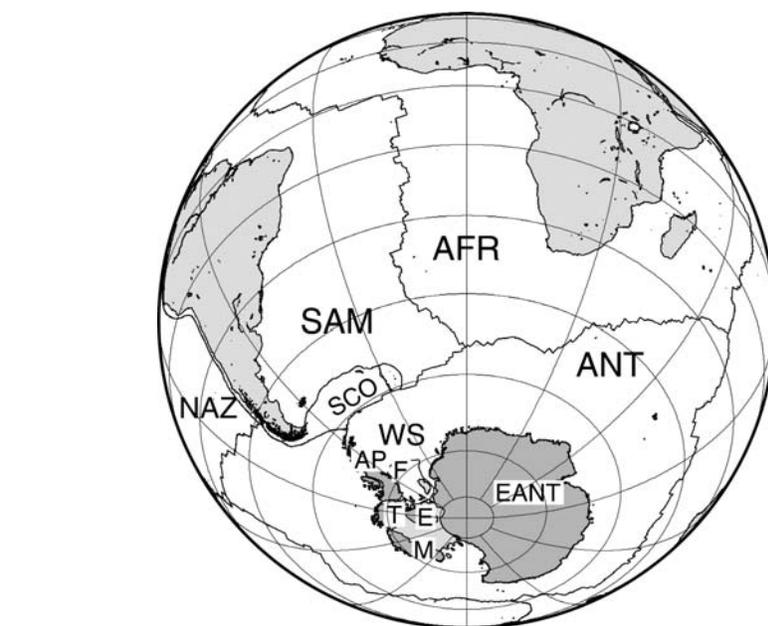


Figura 1: Visión global actual de las placas litosféricas que resultaron del desmembramiento de Gondwana. Placas: SAM: Sudamérica; AFR: África; ANT: Antártida; NAZ: Nazca, SCO: Scotia. Bloques continentales: AP: Península Antártica; EANT: Antártida Oriental; E: Ellsworth; F: Filchner; M: Mary Byrd; T: Thurston. WS: Mar de Weddell.

dental y el oriental.

Hay un consenso considerable respecto al hecho de que los bloques de Antártida Occidental más cercanos al mar de Weddell ya estaban soldados y moviéndose juntos a los ~145 Ma. Sin embargo, hay importantes discrepancias entre diferentes investigadores, sobre la historia previa: ¿Fue la Península Antártica una "pieza suelta" cuando Gondwana Occidental comenzó a separarse de Gondwana Oriental? Es decir, ¿hubo movimiento relativo entre la península y la Antártida Oriental? ¿Cuál fue el rol del bloque de Filchner durante ese período? La cuenca oceánica del Weddell y la cuenca Indo-Atlántica, ¿se formaron vinculadas, al mismo tiempo, o tuvieron aperturas diferentes, resultantes de respuestas diferentes a las fuerzas impulsoras, que podían provenir de la misma pluma del manto, la pluma de Bouvet (Jacobs *et al.* 1996; White y McKenzie 1989)?

En el período que llevó hacia la separación entre África y Sudamérica, aproximadamente a los 132 Ma, la región del Atlántico Sur estaba afectada por un proceso de *rifting* generalizado y el impacto de una segunda pluma del manto correspondiente a la de Paraná-Etendeka, centrada en Brasil y Namibia. En los márgenes del futuro Atlántico

Sur comenzó a producirse extensión oblicua cerca de los 135 Ma, justo antes del impacto de dicha pluma. Un resultado del *rifting* temprano es la cantidad de cuencas en la plataforma continental argentina orientadas con ángulos grandes con respecto al margen continental. Cuando la ruptura del Atlántico Sur se propagó hasta el borde norte de la plataforma de Malvinas, se corrió significativamente hacia el este, justo hacia el lugar donde el punto caliente de Karoo habría estado a los ~135 Ma. Watkeys *et al.* (2002) han observado volcanismo post-Karoo a lo largo del monoclin del Lebombo desde 146 Ma hasta 135 Ma para el complejo Bumbeni, cerca de 28° S, 32° E. El complejo Bumbeni está alineado (aunque un poco al norte) con la dorsal Tugela Sur (Ben-Avraham *et al.* 1997) en el valle de Natal, y puede apoyar la idea de que las plumas Paraná-Etendeka y la de Karoo hayan influido en la ruptura y la propagación que dejó a las Malvinas como parte de Sudamérica.

El tiempo asignado a las rupturas oceánicas se puede estimar usando las anomalías magnéticas de expansión del fondo marino (originadas por las inversiones del campo magnético terrestre) y los polos de rotación (polos de Euler) que de ellas se derivan. Se sabe

que la apertura del mar de Weddell y la del Atlántico Sur están bastante vinculadas. El esquema más simple es el de una configuración de dos placas primero (Gondwana Occidental y Gondwana Oriental) con el mar de Weddell entre Antártida y Sudamérica, y luego tres placas, al abrirse el Atlántico Sur. La edad de la pluma Paraná-Etendeka (~ 132 Ma) es la misma que la de las primeras anomalías magnéticas en el Atlántico Sur, sugiriendo esto que es improbable que haya habido un punto triple en el mar de Weddell antes de esa época. Por otra parte, si hubiera evidencia clara de un mar al norte de la plataforma de Malvinas anterior a los 132 Ma, entonces se podría pensar en que el punto triple se haya establecido con anterioridad. Sin embargo, hay ideas diferentes surgidas en los últimos años, que proponen por ejemplo dos rupturas independientes para el mar de Weddell y para los mares de Mozambique y Riiser-Larsen (Jokat *et al.* 2003; König y Jokat 2006). Hay también otras evidencias y propuestas contradictorias en la actualidad, resultando esto en la existencia de varios modelos tectónicos en discrepancia.

En este trabajo se elabora una revisión de aquellos modelos para los que se conocen los polos de rotación. Esto se hace a través del estudio de isócronas y líneas de flujo sintéticas, que se calculan a partir de la isócrona de la anomalía 34 (C34, 83,5 Ma), porque es esta una anomalía magnética prominente y bien definida. Subsecuentemente se presentan mapas con isócronas sintéticas que exhiben la trayectoria estimada de la unión triple entre Sudamérica - Antártida - África y reconstrucciones para los diferentes juegos de polos de rotación. El estudio comprende el tiempo entre los 160 y los 118 Ma. El objetivo del trabajo es hacer una comparación lo más ecuánime posible al mostrar las diferencias de manera cuantitativa, con los mismos sistemas de referencia y proyecciones geográficas.

ALGUNOS ASPECTOS GEOFÍSCOS DEL MAR DE WEDDELL

Las anomalías magnéticas del mar de Weddell se conocen por levantamientos aéreos y marinos con cobertura parcial. Su descrip-

ción aparece en varias publicaciones con distinto grado de detalle: LaBrecque *et al.* (1986); LaBrecque *et al.* (1989); LaBrecque y Ghidella (1997); Ghidella y LaBrecque (1997); Kovacs *et al.* (2002); Ghidella *et al.* (2002); König y Jokat (2006). Las anomalías de gravedad derivadas de la altimetría satelital han sido asimismo estudiadas por Haxby (1988), Bell *et al.* (1989), McAdoo y Laxon (1996), Livermore y Hunter (1996) entre otros.

En el oeste del mar de Weddell las anomalías magnéticas son de baja intensidad, en general menor que 50 nT (zona quieta). Esta es supuestamente la zona de corteza más antigua en el mar de Weddell, probablemente de edad jurásica (LaBrecque y Ghidella 1997). El gran espesor sedimentario sobre este margen (LaBrecque y Ghidella 1992, del Valle *et al.* 1993), la batimetría y la baja amplitud de las anomalías magnéticas son indicadores de que este margen se abrió como un margen pasivo no volcánico.

Hacia el este de la zona quieta aparecen las alineaciones de expansión del fondo oceánico. Lamentablemente éstas no están únicamente identificadas para el tiempo anterior a la isócrona 34, ya que no existe el flanco opuesto del sistema y hay una importante cobertura sedimentaria; la disparidad en identificación es muy grande para anomalías más antiguas que M0 (120,4 Ma). Atravesando la isócrona 34 (Fig. 2) en dirección sur hay un cambio en las alineaciones gravimétricas desde una orientación NW hacia una NNE (el denominado *herringbone pattern*, McAdoo y Laxon 1996). Las crestas gravimétricas del flanco sur de este rasgo han sido interpretadas como zonas de fracturas muy juntas. Estas crestas desaparecen abruptamente en un área cerca de los 69° S, donde aparece un máximo de gravedad angosto pero extendido en dirección casi W-E, que se conoce como anomalía T, que marca una división W-E en la corteza. Hacia el sur de esta línea, que aproximadamente coincide con M0, es donde la interpretación se hace más difícil y más controvertida (Ghidella *et al.* 2002). Allí hay alineaciones de orientación NE bien al oeste y más hacia el este alineaciones paralelas a T. Las del oeste son las SWLI de la figura 2. Este patrón de anomalías fue reconocido como difícil de interpretar por LaBrecque *et*

al. (1986, 1989), quienes consideraron dos explicaciones alternativas posibles para las SWLI: o que representen una secuencia de expansión de fondo marino generada por un centro de expansión NE-SW, o que estén generadas por contrastes de susceptibilidad en dirección perpendicular a su orientación, en cuyo caso estarían asociadas a zonas de fractura. La segunda hipótesis fue más convincente para estos autores porque la primera requería un cambio abrupto en 90° en la dirección de expansión oceánica que resultaba difícil conciliar con las restricciones geofísicas y geológicas conocidas entonces.

En el sur del mar de Weddell aparecen anomalías estructurales muy importantes: Orion, Andenes y Explora (LaBrecque *et al.* 1989; LaBrecque y Ghidella 1997) que hemos graficado en los mapas de reconstrucciones con contornos de 100 nT.

La anomalía Explora se extiende casi paralela a la costa de Antártida Oriental. Su nombre proviene de la cuña volcánica Explora, detectada en un relevamiento sísmico alemán (Kristoffersen y Haugland 1986, Kristoffersen y Hinz 1991), cuya ubicación coincide con parte de esta anomalía pero se extiende más hacia el este. Estos investigadores también han encontrado una escarpa que tiene el mismo nombre y que bordea la cuña por el norte entre los 35 y 25° W.

METODOLOGÍA

Los polos de rotación se determinan por reconstrucciones de anomalías magnéticas observadas (isócronas) y zonas de fractura derivadas de mapas de gravedad (líneas de flujo) con una variedad de métodos (Hellingner 1981, Royer y Chang 1991). Las reconstrucciones paleogeográficas permiten la validación de los polos de rotación a través de la observación de la yuxtaposición de masas continentales y la comparación de rasgos o estructuras geológicas contiguas que resultan alineadas o adyacentes tales como cinturones orogénicos, efusiones magmáticas, provincias ígneas, cuencas sedimentarias, zonas de cizalla o de sutura, etc. El graficado de las isócronas y líneas de flujo sintéticas, que se calculan a partir de las coordenadas geográficas de los polos de Euler, permiten una verificación visual de

los polos determinados, ya que las isócronas se comparan con determinaciones de alineaciones magnéticas y las líneas de flujo con zonas de fractura conocidas. Para el cálculo de las líneas de flujo se han usado como puntos de partida (*seeds*) una combinación de coordenadas obtenidas de determinaciones confiables de C34 y de la isócrona de 83,5 Ma de *agegrid* (Müller *et al.* 1997). Estos puntos fueron separados en dos conjuntos: los que están al oeste del meridiano 10° E se consideraron como puntos de partida para líneas de flujo Antártida - Sudamérica y los que están al este se asignaron a las líneas de flujo Antártida - África (Fig. 2). A continuación se calcularon las líneas de flujo para los modelos en análisis en intervalos de 0,1 grados, desde los 83,5 Ma hasta los 160 Ma. Seleccionando tiempos iguales de estas líneas, se obtuvieron isócronas en intervalos de 1 Ma. Como

las líneas de flujo calculadas para Antártida - Sudamérica "invaden" la zona de corteza Antártida - África y viceversa, ya que había tres placas implicadas después de la separación entre Sudamérica y África, se elaboró una estimación de la traza del punto triple calculando las intersecciones entre las isócronas del este y las del oeste. Se la denominó línea pseudo Bouvet (PB) y se la usó para recortar los dos conjuntos de líneas de flujo a lo largo de la misma. Este método implica la suposición tácita de que las ramas del sistema de expansión de tres placas eran ridges (R), y que entonces la unión triple era del tipo RRR. Aunque la configuración presente del punto triple de Bouvet es del tipo RFF (un *ridge* y dos zonas de fractura) se considera que su antecesor fue del tipo RRR hasta los 60 o 64 Ma (Lawver *et al.* 1985). Para las reconstrucciones paleogeográficas

se han usado las líneas de costa actuales de los continentes por no disponer de información para modificar los bordes adecuadamente. Los mapas están en proyección estereográfica polar y las masas continentales se rotan hacia Antártida, que se mantiene fija.

CUATRO MODELOS CINEMÁTICOS

Los modelos que se han usado en esta revisión son aquellos más conocidos por ser relativamente recientes y por que además en las publicaciones incluyen información sobre los polos de Euler utilizados: Livermore y Hunter (1996) [LH], Lawver *et al.* (1999) [LGD], Ghidella *et al.* (2002) [GYL], König y Jokat (2006) [KJ]. Combinando rotaciones de las placas África - Antártida y Sudamérica - África, Liver-

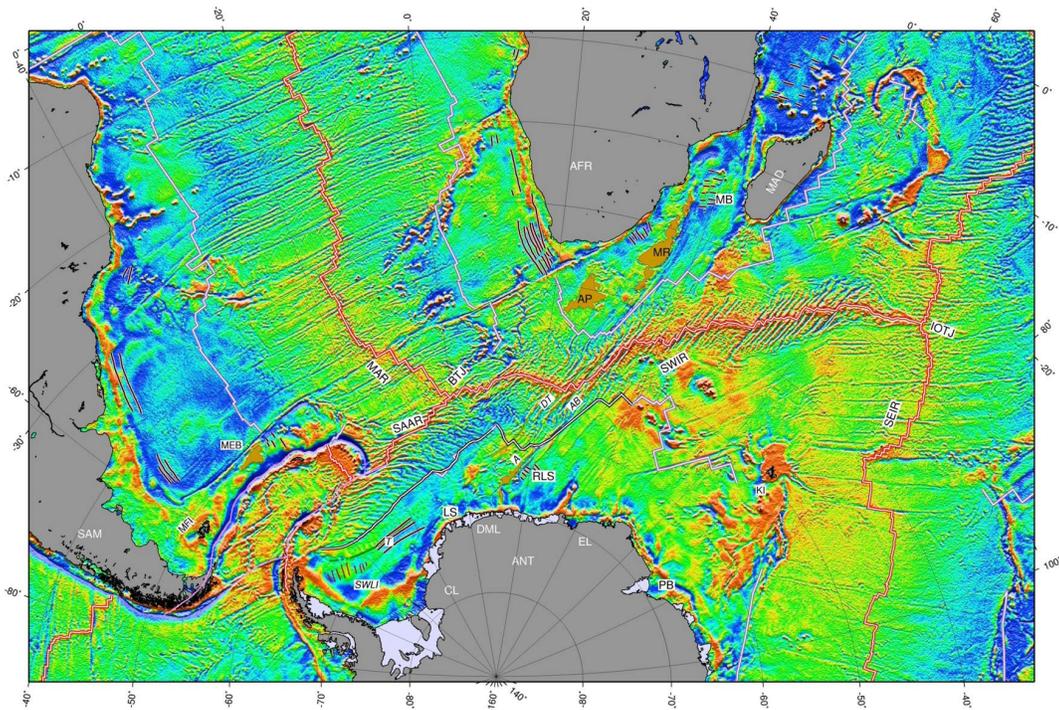


Figura 2: Principales rasgos de los sistemas de expansión oceánica que involucran a Antártida, Sudamérica y África, sobre una imagen de anomalías gravimétricas derivadas de altimetría satelital de Sandwell y Smith (1997). En líneas negras gruesas están dibujadas las anomalías mesozoicas (serie M) de la compilación de Cande *et al.* (1989). En el mar de Weddell se han incluido la anomalía T de gravedad y las alineaciones magnéticas de orientación NE-SO (SWLI). Se señalan además zonas de fractura elegidas: Du Toit (DT), Andrew Bain (AB) y Astrid (A). Las líneas celestes dobles corresponden a la isócrona de 83.5 Ma de AGEGRID (Müller *et al.*, 1997). En el mar de Weddell esta misma isócrona está representada por líneas negras dobles. Los centros de expansión actuales están representados con línea roja doble. AGP: Plataforma de Agulhas; BTJ: Punto triple de Bouvet; CL: Tierra de Coats; DML: Tierra de la Reina Maud; EL: Tierra de Enderby; FMI: Islas Malvinas; IOTJ: Punto triple del Océano Índico; KI: Isla Kergelen; LS: Mar de Lazarew; MAD: Madagascar; MAR: Dorsal Meso - Atlántica; MB: Cuenca de Mozambique; MEB: Banco Maurice Ewing; MR: Ridge Mozambique; PB: Bahía Pridtz; RLS: Mar de Riisen-Larsen; SAAR: Dorsal Sudamérica - Antártida; SEIR: Dorsal India Sudeste; SWIR: Dorsal India Sudoeste.

more y Hunter (1996) mostraron que las tendencias de las líneas de flujo observadas en los mapas de gravimetría satelital pueden reproducirse aproximadamente suponiendo que el fondo del mar de Weddell al norte de los 72° S fue creado íntegramente por la separación entre Sudamérica y Antártida. Para el tiempo entre la apertura inicial y la anomalía magnética M10 (~131 Ma) sus líneas de flujo sintéticas, parcialmente basadas en Martín y Hartnady (1986), implican una dirección de expansión con dirección predominante este-oeste.

Ghidella y Lawver (1999) presentaron un modelo basado en los polos de rotación desarrollados por el programa PLATES (<http://www.ig.utexas.edu/research/projects/plates/plates.html>) comenzando con la reconstrucción de Gondwana de Lawver *et al.* (1999). Un estudio de las líneas de flujo generadas por el movimiento de las placas mayores (Sudamérica - África - Antártida) que comenzó con las reconstrucciones de ese trabajo produjo un modelo de dos fases para el mar de Weddell similar al sugerido por primera vez por Lawver *et al.* (1985). La primera fase produce una apertura del mar de Weddell en una dirección este-oeste con respecto a la posición presente de la península Antártica, que resulta compatible con la morfología de margen pasivo no volcánico del este de la misma. Para la segunda fase resulta un movimiento en promedio de dirección norte-sur entre M10 y C34.

Ghidella *et al.* (2002) enfocaron el problema de reconstrucción en el mar de Weddell oeste y derivaron polos de intervalo de rotación bajo la suposición de que las líneas de orientación SW (SWLI en la Fig. 2) en el mar de Weddell son huellas de contrastes de susceptibilidad y consecuentemente las modelaron como zonas de fractura. Una experimentación numérica para ajustar isócronas sintéticas a las alineaciones magnéticas de la serie M y las líneas de flujo a las zonas de fractura produjo polos de Euler para la apertura del mar de Weddell entre los 160 Ma y C34.

Las reconstrucciones correspondientes resultaron aceptables dentro de las restricciones conocidas para el movimiento entre Sudamérica y Antártida. Sin embargo, con este modelo no se consigue un cierre del circui-

to de placas por el lado de África si se usan rotaciones derivadas por otros autores. La falta de cierre puede ser tolerada si se considera la posibilidad de movimiento relativo entre la península Antártica y la Antártida Oriental hasta la época de 118 Ma, pero entonces el movimiento relativo tiene una componente importante de convergencia para la que no se encuentra explicación aún. Jokat *et al.* (2003) trabajaron sobre datos recolectados a lo largo de la costa de la Antártida Oriental durante cinco estaciones. Estos datos cerraron importantes huecos de cobertura de datos magnéticos en áreas críticas: el mar de Lazarev y el margen de la Tierra de la Reina Maud, así como también el mar de Riser-Larsen (Fig. 2), con lo cual presentaron un modelo analizado anteriormente por Ghidella *et al.* (2004). Posteriormente este modelo fue mejorado (König y Jokat, 2006), y es éste el que se usa para el presente trabajo. El modelo propone que la disgregación de Gondwana comenzó con rifting en las cuencas de Mozambique y Somali hace aproximadamente 167 Ma, y que éste fue acomodado por estiramiento y extensión, generándose cuencas en corteza continental en lo que son ahora las plataformas de Filcher y Ronne, el bloque de las islas Malvinas y el banco de Maurice Ewing. Según este modelo, el primer fondo oceánico en el mar de Weddell se formó recién a los 147 Ma, al producirse un nuevo rifting, esta vez entre la península Antártica y el extremo sur de Sudamérica.

La figura 3 muestra las edades de corteza y las líneas de flujo para los cuatro modelos siguiendo la misma metodología descripta, y la figura 4 las correspondientes reconstrucciones paleogeográficas.

Para las épocas más antiguas los primeros tres modelos constituyen un sistema de dos placas (Gondwana Occidental y Oriental), mientras que en el modelo **KJ** hay una primera apertura en Antártida Oriental y una segunda en el mar de Weddell 20 Ma más tarde; estos dos rifts habrían evolucionado independientemente hasta los 122 Ma. O sea que existen diferencias bastante grandes entre los modelos, particularmente para las épocas más antiguas. Es además notorio que las líneas de flujo se superponen con el continente en la zona de la Tierra de la Reina Maud en casi todos los modelos ex-

cepto **LGD**. Es este un modelo que implica una apertura inicial del mar de Weddell en dirección este-oeste, y un cambio en 90 grados en la dirección de expansión a los 132 Ma. Los otros modelos tienen una apertura norte-sur (**GYL** y **KJ**) o variando de este-oeste a norte-sur de manera gradual (**LH**). Para este caso la apertura del Océano Atlántico ocurre a los 147 Ma, mientras que para **LGD** y **GYL** a los 131 Ma. En cambio, para **KJ** es todo muy diferente ya que la fragmentación de Sudamérica es muy grande antes de los 130 Ma, y hasta hay superposición de plataformas continentales entre Sudamérica y África. No presenta superposición entre la península Antártica y Sudamérica porque supone rotaciones independientes. Se debe notar que para los modelos **LH** y **LGD** hay superposición entre la península Antártica y Sudamérica, situación que parece inevitable sin considerar movimiento relativo entre la península Antártica y el resto de Antártida. En el modelo **GYL** no hay superposición allí, pero entonces la hay entre Madagascar y África a los 160 Ma.

Existe una diferencia conceptual importante entre los modelos **GYL** y **KJ** por un lado y los modelos **LH** y **LGD** por otro. Para el modelo **GYL** los polos de rotación fueron determinados usando cuatro polos de intervalo entre el cierre a los 160 Ma y C34, los que fueron derivados de alineaciones magnéticas y gravimétricas en el Weddell occidental *bajo la suposición de que representaban movimiento entre Antártida y Sudamérica*. Dado que no se pueden obtener directamente polos finitos Antártida-Sudamérica, porque el sistema de expansión oceánica no tiene el flanco opuesto, hace falta usar al menos un polo Sudamérica-África para por lo menos una época elegida. Esta época ha sido tradicionalmente la de C34, ya que esta anomalía es prominente y claramente identificable, y es la que se ha usado de vínculo. El mismo método se aplicó también en **KJ**, con la diferencia que en este caso se disponía de datos nuevos para las anomalías en el mar de Weddell. Los modelos **LH** y **LGD**, en cambio, usan polos de rotación derivados del movimiento entre Antártida y África, que los trasladan a Sudamérica-Antártida usando el circuito de placas.

Vemos en la figura 2 que los modelos **LH** y

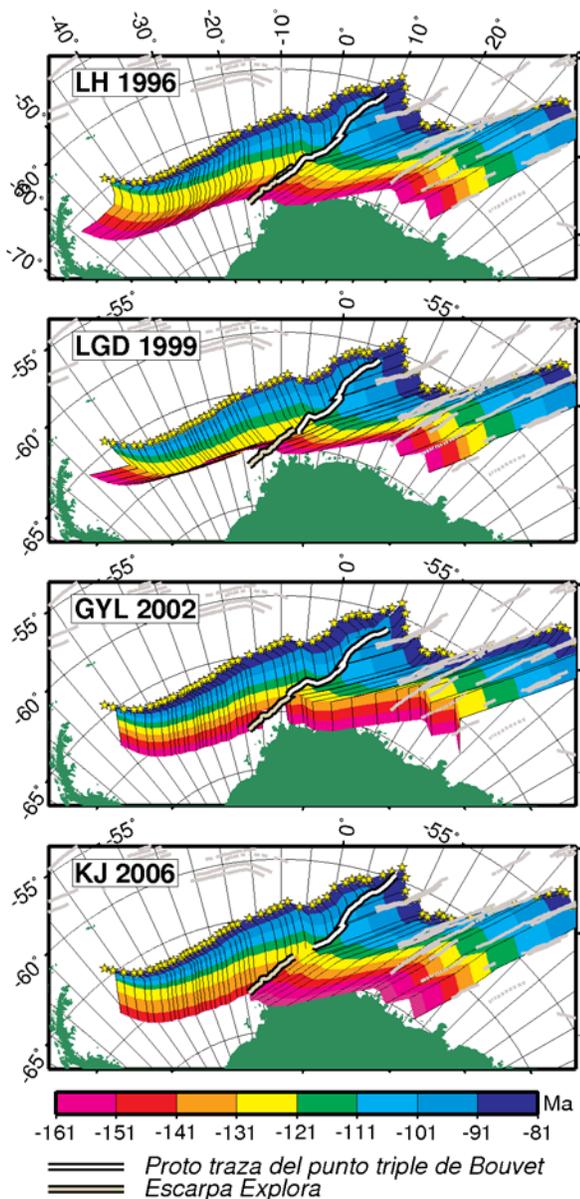


Figura 3: Mapa de edades de corteza derivado de líneas de flujo e isócronas sintéticas, calculadas a partir de los polos de rotación de cada uno de los modelos usados (véase las referencias en el texto y Fig. 4) Las estrellas amarillas son una selección de puntos de la isócrona C34 y constituyen los puntos de partida de las líneas de flujo (líneas negras). La proto trayectoria del punto triple de Bouvet fue determinada por los cruces entre isócronas Antártida - Sudamérica e isócronas Antártida - África.

LGD producen líneas de flujo que se deterioran hacia el oeste, empeorando el acuerdo con rasgos conocidos. Para el modelo **GYL** el deterioro es hacia el este, dado que la información en el Weddell occidental es insuficiente para definir la expansión de todo el sistema.

Cabe recordar que según el modelo **LGD** la expansión inicial en el Weddell occidental, cerca de la península Antártica, es en dirección este-oeste, o sea ortogonal a lo que es en el modelo **GYL** y oblicua respecto al modelo **LH**. Esto se debe a diferencias en la interpretación de anomalías magnéticas muy poco definidas en la zona, que dejan dudas respecto a si son zonas de fractura o

isócronas (SWLI en la Fig. 2).

Las líneas de Bouvet no tienen diferencias muy significativas entre los cuatro modelos para las épocas entre 83,5 y 110 Ma, pero sí en épocas más antiguas. En el modelo **LH** la línea *pseudo Bouvet* llega hasta los 147 Ma (es más larga que en los otros) porque en este modelo ya había tres placas para esta época porque el Atlántico Sur comenzaba a abrirse. En los tres primeros modelos la línea pseudo Bouvet resulta alineada con la escarpa Explora, lo cual constituye un indicador que, independientemente del modelo, esta escarpa marca una división importante entre cortezas oceánicas de Antártida-Sudamérica y Antártida-África (Kristoffer-

sen y Haugland 1986). En el modelo **KJ** la línea *pseudo Bouvet* no va más allá de los 122 Ma porque para este modelo las aperturas Antártida-Sudamérica y Antártida-África evolucionaron independientemente en épocas más antiguas.

Si bien ninguno de los tres modelos es totalmente aceptable en el contexto de la tectónica de placas rígidas, consideramos que el modelo **LGD** es el más tolerable en este aspecto: la superposición entre la península Antártica no es demasiado significativa, y la superposición de masas continentales en la Tierra de la Reina Maud es menor que en los otros dos modelos.

RECONSTRUCCIONES

En la figura 4 se muestran las reconstrucciones en cuatro épocas para cada modelo: 160, 147, 131 y 118 Ma, con algunas variantes que dependen de los polos de rotación publicados y de los modelos. Por ejemplo, para **KJ** la expansión comenzó a los 167,2 Ma.

La superposición de la península Antártica con Sudamérica en las reconstrucciones para 160 Ma es grande en el modelo **LH**, menor en el modelo **LGD** y nula en los modelos **GYL** y **KJ**. Pero esta superposición depende fuertemente de las suposiciones que se hagan para la apertura del Atlántico y de las posibles fragmentaciones de Sudamérica y de las épocas en que ocurrieron. Desplazamientos relativos entre la península Antártica y la Antártida Oriental han sido considerados por numerosos modelos. Los datos existentes todavía no determinan unívocamente la posición de este bloque.

Los autores de **KJ**, al igual que los de **LGD**, consideran una fragmentación de Sudamérica en cuatro subplacas, que no son las mismas. La placa Patagonia de **KH** es parecida a la unión de las placas San Jorge y Gastre de **LGD**; la subplaca Colorado es la misma en ambos modelos; **LGD** no usa una placa Salado y **KH** sí. Los desplazamientos relativos, aun en los bloques afines, son muy diferentes: en **LGD** hay una sola sutura con desplazamiento en las épocas que hemos presentado ubicada en la zona de la cuenca del Colorado y resulta que prácticamente reproduce el cierre de esa

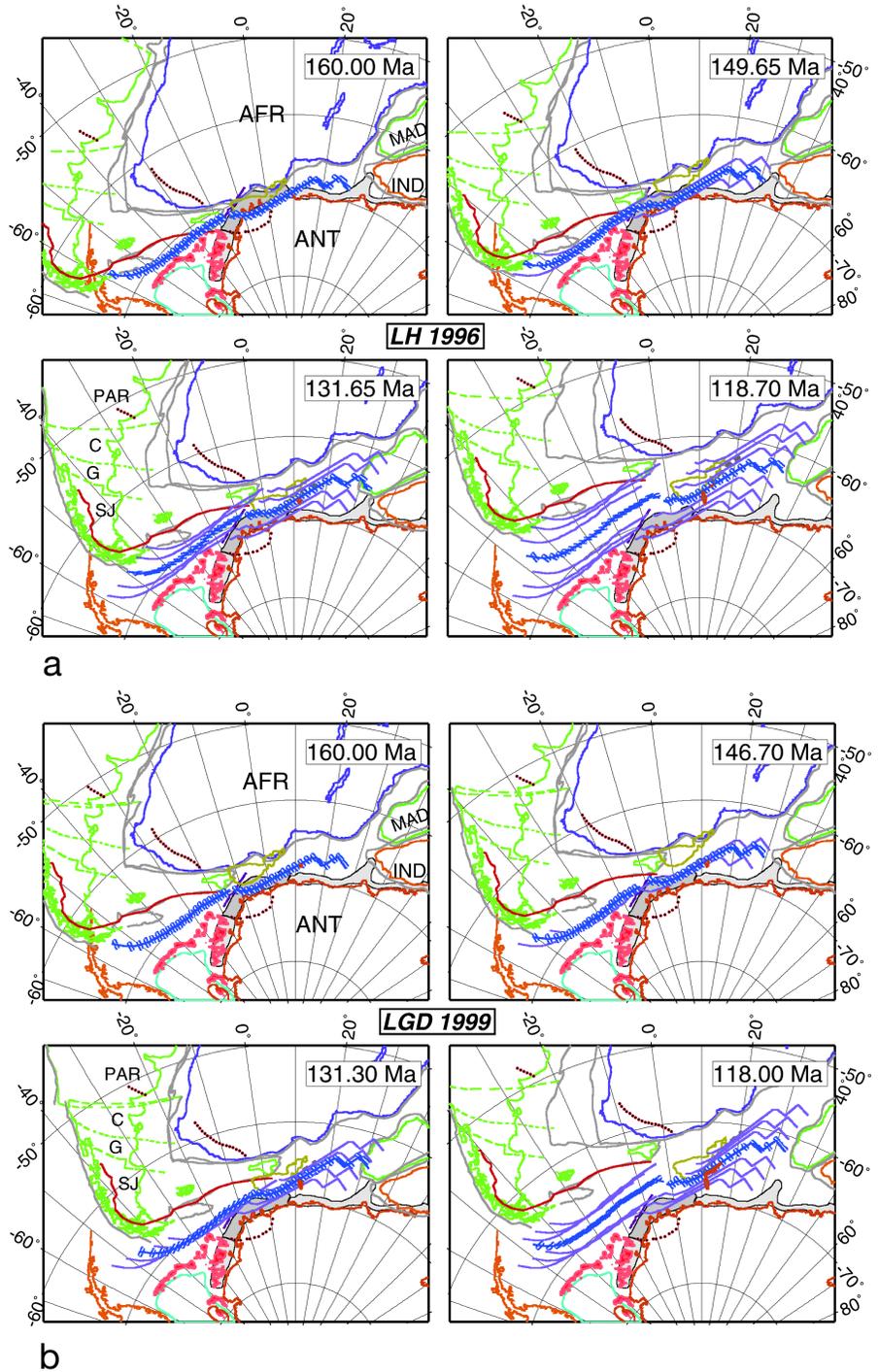
cuenca. En **KJ**, en cambio, hay desplazamientos muy grandes entre las subplacas que se van achicando pero permanecen por lo menos hasta los 130 Ma. Las fragmentaciones propuestas para Sudamérica constituyen un tema controvertido que sería muy necesario resolver.

Tanto **LH** como **LGD** son modelos que fueron derivados a partir de anomalías magnéticas entre Antártida y África, y de zonas de fracturas inferidas de la gravedad satelital en el mar de Weddell. Ambos modelos comenzaron con polos derivados del movimiento Antártida-África. **LH** muestra un ajuste mucho más apretado que **LGD** con superposición del ridge de Mozambique con la transición océano-continente de la Tierra de la Reina Maud y un encaje menos apretado para Sudamérica - África. Esta última diferencia se debe principalmente a la fragmentación transcontinental del sur de Sudamérica que **LGD** usa y **LH** no. La plataforma de Malvinas está ya extendida a su tamaño actual para esta época en los dos modelos.

El margen sudeste del embalse del mar de Weddell tiene anomalías magnéticas estructurales grandes: Orión, Andenes, Explora (Ghidella y LaBrecque 1997) que son conjugadas de la plataforma de Malvinas para **LH** y casi lo mismo para **LGD**; el encaje es más flojo en este caso.

La península Antártica se encima con el sur de Sudamérica en ambos modelos, pero eso es algo que parece inevitable. Se necesita entonces invocar movimiento relativo entre península Antártica y Antártida, más en **LH** que en **LGD**. Sobre el lado de Antártida - África ambos modelos ajustan las zonas de fractura y las alineaciones magnéticas bastante bien. En el oeste, como se ve en la figura 3, las líneas de flujo de **LGD** corresponden a una expansión casi en la dirección N-S entre C34 y M10 (~131 Ma), y movimiento E-W antes de esto, debido a un cambio mayor en el polo de intervalo, resultante de la transición entre un sistema de dos placas y uno de tres. El modelo **LH** exhibe un comportamiento similar aunque más suave, que se lo permite la apertura más temprana del Atlántico Sur.

El modelo **GYL** usa polos de intervalo que tienen un movimiento mayoritariamente de dirección N-S en el mar de Weddell. Si se



observan las líneas de flujo para el lado Antártida - África en la figura 3 para el modelo **GLY**, el resultado es defectuoso para el tiempo entre 160 y 131 Ma, ya que forman un ángulo de casi 60° con las zonas de fractura. En el cierre del mar de Weddell (160 Ma) las anomalías del embalse del mar de Weddell resultan conjugadas con la plataforma de Malvinas como en **LH**. Pero la yux-

taposición ocurre más hacia el oeste con dicha plataforma ya estirada resultando en una superposición del banco Maurice Ewing con la transición océano-continente de la Tierra de la Reina Maud.

El modelo **KJ** usa polos deducidos tanto para Antártida-África como para Antártida-Sudamérica. Es el más reciente y tiene más datos para apoyarse que los otros. La frag-

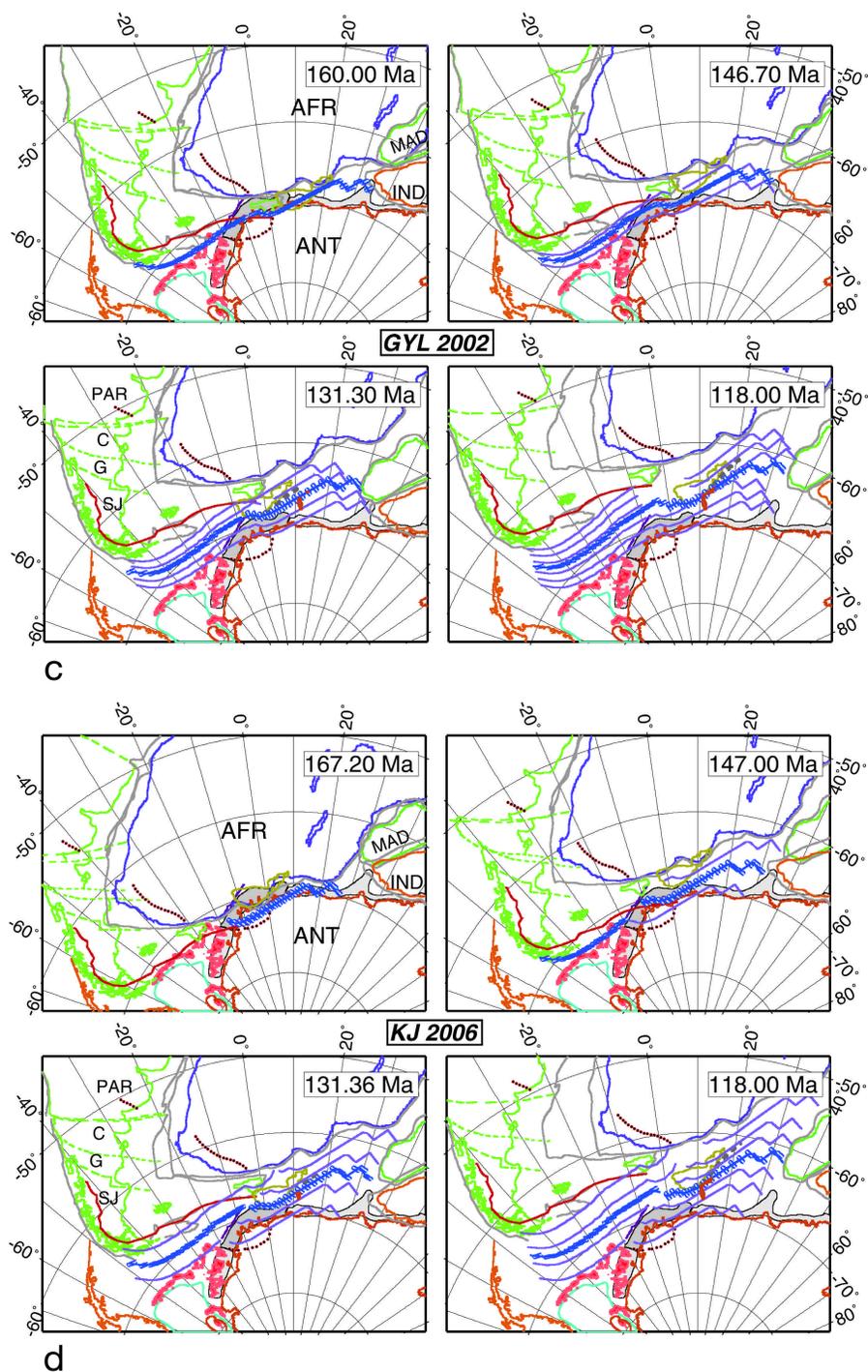


Figura 4: Reconstrucciones para cuatro modelos de tectónica de placas en cuatro épocas elegidas. En todos los casos se han dibujado isócronas sintéticas para la separación Antártida - Sudamérica y Antártida - África. Para las isócronas centrales (centros de expansión) se han dibujado segmentos de círculos máximos para el polo de rotación de la época correspondiente, que representan segmentos de dorsal. En SAM se trazaron suturas tomadas de Lawver *et al.* (1999), aunque en pocos casos están activas en estas épocas. Se bosquejaron anomalías magnéticas estructurales importantes, y los bordes de plataforma continental aproximados. PAR, C, G, SJ: subplacas Paraná, Colorado, Gastre y San Jorge, según Lawver *et al.* (1999). MAD: Madagascar; IND: India. a) Rotaciones de Livermore y Hunter (1996); b) Rotaciones de Lawver *et al.* (1999); c) Rotaciones de Ghidella *et al.* (2002) y d) Rotaciones de König y Jokat (2006).

mentación más austral de Sudamérica puede haber estado activa hasta la época de M10 en este modelo. Tanta fragmentación parece haber sido la única forma de poder acomodar las piezas continentales para aperturas Antártida-Sudamérica y Antártida-África independientes. Estas dos aperturas independientes parecen ser la única forma de ajustar los datos nuevos (Jokat *et al.* 2003, König y Jokat 2006) desde los mares de Weddell y Lazarev hacia el este de los 10° E. Si la ruptura inicial de Gondwana ocurrió a los ~167 Ma en las cuencas Mozambique y Somalí, la formación de corteza oceánica en el mar de Weddell puede no haber comenzado hasta los ~147 Ma según este modelo, o sea mucho después de la ruptura inicial de Gondwana. Durante los ~20 Ma entre las dos rupturas, el desplazamiento es acomodado por deslizamiento lateral entre las subplacas de Sudamérica así como también en la plataforma de Malvinas y en el embalse del mar de Weddel. El desarrollo de una conexión con circulación de aguas profundas entre los océanos Atlántico sur e Índico no ocurrió antes de los 122 Ma en este modelo. Antes de esta época las dorsales de Mozambique y de Astrid y el embalse del mar de Weddel formaron una barrera continental en entre los océanos en el oeste y en el este.

El problema de superposición de isócronas con la transición océano-continente en la región la Tierra de la Reina Maud desaparece a los 145 Ma en los modelos LH y GYL, y a los 135 Ma en el modelo KJ. Para el modelo LGD el problema tiene una naturaleza diferente. La explicación proviene de Lawver *et al.* (1991) donde se sugiere que el margen de la Tierra de la Reina Maud operó como transcurrente desde la ruptura hasta aproximadamente los 130 Ma, cuando la separación entre Sudamérica y África resultó en una unión triple que convirtió la situación de dos placas en una de tres. En ese trabajo se propone además que la cuña volcánica Explora fue el resultado de *rifting* en un período de extensión pre-ruptura, y que después de eso hubo cizallamiento entre los 170 y 130 Ma, resultando esto en un "fileteado" de la cuña, cuyo correspondiente material se encuentra ahora en los sedimentos a un lado de la escarpa Explora y en los que quedaron en la dorsal de Mozambique.

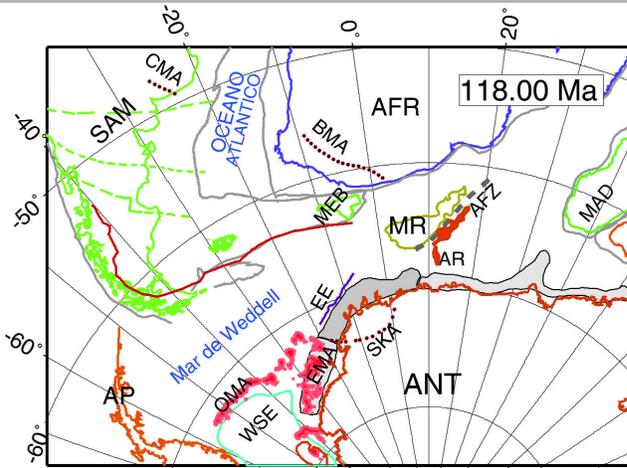


Figura 5: Reconstrucción a los 118 Ma, ampliada para visualizar algunos rasgos que no aparecen en la Fig. 2. El límite océano-continente está trazado en líneas grises para Sudamérica y África. Polígonos grises cubren la plataforma continental de Antártida Oriental hasta el borde de la transición océano-continente. La línea roja oscura en SAM marca el borde de la región hacia fuera de la cual (O, SO y S) la morfología ha sufrido mayores cambios después de la ruptura. AM: anomalía magnética; ZF: zona de fractura; ANT: Antártida; AFR: África; AP: Península Antártica; AFR: África; AR: Ridge de Astrid; BMA: AM Beattie; CMA: AM Claromecó; EE: Escarpa Explora; EMA: AM Explora; OMA: AM Orion; MEB: Banco Maurice Ewing; MFZ: Mozambique; MR: Ridge Mozambique; WSE: Embalse del mar de Weddell; SAM: Sudamérica; SKA: AM Sverdrupfjella-Kirvanveggen.

Esta explicación, particularmente la extensión *pre-rift* en el embalse del mar de Weddell, es compatible con varias propuestas (similares entre sí) para las anomalías Orion, Andenes y Explora. Por ejemplo, Ferris *et al.* (2000), quienes analizaron las anomalías magnéticas y gravimétricas en el embalse del mar de Weddell. Según su interpretación, los eventos que formaron el graben de Thiel (*Weddell Rift* según Kristoffersen y Hinz, 1991), son los más antiguos identificados en el mar de Weddell y pueden considerarse como las primeras expresiones tectónicas y magmáticas de combadura en una unión triple incipiente RRR. Esta unión triple llevó a la separación de la plataforma de las Malvinas del embalse del mar de Weddell y a extensión en la rama abortada del *rift*.

Es comúnmente aceptado que el volcanismo de Karoo y el de Ferrar en África y Antártida ocurrió a los 183 Ma (Duncan *et al.* 1997, Elliot y Fleming 2000, Storey *et al.* 2001). Su relación en tiempo y espacio con la ruptura de Gondwana en el mar de Weddell y en el de Riiser-Larsen es todavía un tema de discusión (Jokat *et al.* 2003). Según Cox (1992) y Elliot y Fleming (2000) la cuña Explora se formó como la parte conjugada del monoclin de Lebombo que es parte del volcanismo Karoo en África, y al que le

asignan un edad similar.

Esto es confirmado por el análisis de datos magnéticos regionales en el sudeste del mar de Weddell que realizan Johnson *et al.* (1992) y Hunter *et al.* (1996). Ellos hicieron una estimación de la edad de la cuña Explora al considerarla como continuación de la anomalía Explora, que es en parte la expresión magnética de la cuña, y que según ellos atraviesa la isla Berkner y alcanza el macizo Dufek. Usando las edades de las intrusiones en el macizo Dufek y de una capa dolerítica en la Tierra de la Reina Maud estos autores sugirieron una edad aproximada de 182 Ma para la cuña Explora. Sin embargo, las secuencias volcánicas del mar de Weddell no han sido aun perforadas como para datar eso más fehacientemente.

En el modelo **KJ** se propone un edad aproximada de 150-138 Ma para la formación de la cuña Explora sobre la base de la bien definida edad de las anomalías magnéticas en el este del mar de Weddell. Eso es más de 30 millones de años menos que lo previamente sugerido, pero los autores argumentan considerando que los reflectores sísmicos que inclinan hacia el mar (*seaward dipping seismic reflectors*) siempre se forman como precursores al desarrollo de un centro de expansión y que en el mundo hay

ejemplos de una relación muy cercana en tiempo entre el emplazamiento de los reflectores sísmicos que inclinan hacia el mar y el comienzo de la expansión oceánica a lo largo de muchos márgenes de *rift* (White y McKenzie 1989, Courtillot *et al.* 1999). Sin embargo, esta propuesta del modelo **KJ** no es compatible con los otros tres modelos que hemos analizado ni con la explicación de Lawver *et al.* (1991). Es esta una incompatibilidad clave. La argumentación de König y Jokat (2006) para considerar los reflectores sísmicos que inclinan hacia el mar tanto más jóvenes que lo aceptado hasta hace poco se basa principalmente en las anomalías magnéticas por ellos detectadas. Como sinopsis presentamos una comparación esquemática de las principales características de los modelos revisados en el Cuadro 1. Varias de ellas son dependientes entre sí, lo cual está señalado con el índice de la primera columna. El cuadro no pretende ser exhaustivo, porque los aspectos a tener en cuenta son muy variados, tanto en lo espacial como en lo temporal.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una revisión de cuatro modelos tectónicos para la ruptura de Gondwana mediante exhibición de material gráfico como mapas de edades de corteza y reconstrucciones. No se emiten juicios finales sobre la validez de estos modelos. Se clarifican las suposiciones hechas en cada caso y se señalan las diferencias.

Los modelos analizados fueron hechos sobre la base de la tectónica de placas, que es esencialmente una teoría cinemática para describir el movimiento de las placas litosféricas, y un muy buen esquema de partida. Sin embargo, para tener en cuenta fenómenos no cinemáticos, como acortamiento cortical en zonas orogénicas, extensión previa a la formación de cuencas, deformaciones en los bordes de placa, acumulaciones sedimentarias en los taludes continentales, y muchos otros, es necesario recurrir a suposiciones. Los modelos analizados en el presente trabajo han empleado varias simplificaciones, encontrándose entre ellas la fragmentación de la placa Sudamericana. De esta manera, se puede concluir en que la variedad de las suposiciones hechas, y las

CUADRO 1: Comparación de los modelos revisados.

IND	Característica	MODELO			
		LH (1996)	LGD (1999)	GYL (2002)	KJ (2006)
1	Superposición de AP con SAM 2-6-7-8-13	Importante a los 160 Ma	Pequeña a los 160 Ma	Ninguna	Ninguna
2	Movimiento relativo entre AP y EANT 1-6-7-8-13	No	No	No	Sí
3	Comienzo de la expansión en el Weddell	160 Ma	160 Ma	160 Ma	147 Ma
4	Época del rift en el WSE	Pre break-up	Pre break-up	Pre break-up	Pre break-up
5	Dirección de expansión en el Weddell	Variando de W-E a NS	W-E (160 -131 Ma) N-S (131-118 Ma)	Predominante-mente N-S	Predominante-mente N-S
6	Estiramiento en la plataforma de Malvinas 1-2-6-7-13	Pre break-up	Pre break-up	Pre break-up	167.2 - 147 Ma
7	Apertura del Atlántico Sur 1-2-6-8-13	147 Ma	131 Ma	131 Ma	131 Ma
8	Sistemas de expansión oceánica independientes	No, tres placas (SAM-AFR-ANT) vinculadas	No, tres placas (SAM-AFR-ANT) vinculadas	No, tres placas (SAM-AFR-ANT) vinculadas	Sí: aperturas ANT-SAM y ANT-AFR independientes
9	Época de la cuña Explora 10	Pre break-up	Pre break-up	Pre break-up	147 Ma
10	Superposición con MAUD COT 9	No	No	No	Sí
11	Superposición con el ridge Mozambique	Sí	No	Sí	Sí
12	Superposición con MEB 6	No	No	Sí	No
13	Fragmentaciones SAM en el período 160-118 Ma 1-2-6-7	No	1 (una) - Cuenca del Colorado	No	4 (cuatro): PAR, SAL, COL, Gastre

La columna de la izquierda es el número de orden de la característica, usado en la segunda columna para indicar vinculaciones o dependencias entre las características. COT: Transición océano-continente; MEB: Banco Maurice Ewing; WSE: Embalse del Weddell; PAR: Paraná; SAL: Salado; COL: Colorado.

diferencias entre los resultados de los modelos, constituyen fuertes indicadores de que en un problema tan complejo y dinámico como la ruptura del supercontinente de Gondwana, que tuvo involucrada la incidencia de un pluma astenosférica, la cinemática de placas es un modelo demasiado simple.

Este trabajo es parte de la fase inicial de Critical revision of Gondwana break-up for International Polar Year (<http://ggt.conae.gov.ar/iaa/ipyg/>), una iniciativa que fue presentada al Consejo Internacional de Planificación Científica para el Año Polar Internacional y es ahora un subproyecto del programa bipolar Plate Tectonics and Polar Gateways in Earth History (<http://plates-gates.geo.su.se/>).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Barker, P.F., Barber, P.L. y King, E.C. 1984. An Early Miocene ridge crest-trench collision on the South Scotia ridge near 36° W. *Tectonophysics* 102: 317-332.
- Barker, P.F. y Lawver, L.A. 1988. South American-Antarctic plate motion over the past 50 Ma, and the evolution of the South American-Antarctic Ridge. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 94: 377-386.
- Bell, R.E., Brozna, J., Haxby, W. and LaBrecque, J.L. 1990. Continental margins of the western Weddell Sea. En Hayes, D.E. (ed.) *Insights from airborne gravity and Geosat derived gravity*, Antarctic Research Series 50: 91-102.
- Ben-Avraham, Z., Hartnady, C.J.H. y le Roex, A.P. 1995. Neotectonic activity on continental fragments in the South West Indian

Ocean: Agulhas Plateau and Mozambique Ridge. *Journal Geophysical Research* 100: 6199-6211.

- Cande, S.C., LaBrecque, J.L., Larson, R.L., Pitman, W.C., Golovchenko, X. y Haxby, W.F. 1989. Magnetic Lineations of the World's Ocean Basins, American Association of Petroleum Geologists, mapas, Tulsa.
- Cox, K.G. 1992. Karoo igneous activity, and the early stages of the break-up of Gondwanaland, Geological Society, Special Publication 68: 137-148.
- Courtilot, V., Jaupart, C., Manighetti, I., Tapponnier, P. y Besse, J. 1999. On causal links between flood basalts and continental breakup. *Earth and Planetary Science Letters* 166: 177-195.
- Duncan, R.A., Hooper, P.R., Rehacek, J.S., Marsh, J.S., y Duncan A.R. 1997. The timing and duration of the Karoo igneous event, southern Gondwana, *Journal of Geophysical Research* 102: 18.127-18.138.
- Dalziel, I.W.D. y Elliot, D.H. 1982. West Antarctica: problem child of Gondwanaland. *Tectonics* 1: 3-19.
- Elliot, D.H. 1991. Triassic-Early Cretaceous evolution of Antarctica. En Thomson M.R.A., Krame, J.A. y Thomson, J.W. (eds.) *Geological Evolution of Antarctica*, Cambridge University Press: 243 250.
- Elliot, D.H. y Fleming, T.H. 2000. Weddell triple junction: The principal focus of Ferrar and Karoo magmatism during initial breakup of Gondwana. *Geology* 28: 539- 542.
- Ferris, J.K., Vaughan, A.P.M. Storey, B.C. 2000. Relics of a complex triple junction in the Weddell Sea embayment, Antarctica. *Earth and planetary Science Letters* 178: 215-230.
- Ghidella, M.E. y LaBrecque, J.L. 1997. The Jurassic Conjugate Margins of the Weddell Sea: Considerations Based on Magnetic, Gravity and Paleobathymetry Data. En Ricci, C.A. (ed.) *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes*, Terra Antarctica Publication: 441-451, Siena.
- Ghidella, M.E., Lawver, L.A. y Gahagan, L.M. 1999. Insights into the Central Weddell Sea Herringbone Pattern from Gravity and Magnetism data. Poster en el VIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences (Wellington, Nueva Zelanda), Abstracts Volume: 118.
- Ghidella, M.E., Yáñez, G. y LaBrecque, J.L. 2002. Revised tectonic implications for the

- magnetic anomalies of the western Weddell Sea, *Tectonophysics* 347: 65-86.
- Ghidella, M.E., Rodríguez, G.A. y Zakrajsek, A. 2004. Edades de la corteza del Mar de Weddell a partir de isócronas y polos de rotación. 5o Simposio Argentino y 1ro Latinoamericano sobre investigaciones antárticas, CD-ROM, Resumen expandido 101GF, 4 p.
- Grunow, A.M., Kent, D.V. y Dalziel, I.W.D. 1991. New paleomagnetic data from Thurston Island and their implications for the tectonics of West Antarctica. *Journal of Geophysical Research* 96: 17.935-17.954.
- Grunow, A.M. 1992. Paleomagnetic studies of Mesozoic rocks from the Antarctic Peninsula: Implications for the Weddell Sea opening. *Antarctic Journal of the U.S., Review* 27(5): 14-18.
- Haxby, W. 1988. Organization of oblique seafloor spreading into discrete, uniformly spaced ridge segments: Evidence from the Geosat altimeter data in the Weddell Sea, *EOS A.G.U. Transactions* 69(44): 1155.
- Hellinger, S.J. 1981. The uncertainties in finite rotations in plate tectonics. *Journal of Geophysical Research* 86: 9312-9318.
- Hunter, R.J., Johnson, A.C. y Aleshkova, N.D. 1996. Aeromagnetic data from the southern Weddell Sea Embayment and Adjacent Areas: Synthesis and Interpretation. En Storey, B.C., King, E.C., Livermore, R.A. (eds.) *Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up*, The Geological Society, Special Publication 108: 143-154.
- Jacobs, J., Kaul, N. y Weber, K. 1996. The history of denudation and resedimentation at the continental margin of western Dronning Maud Land, Antarctica, during break-up of Gondwana. En Storey, B.C., King, E.C. y Livermore, R.A. (eds.) *Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up*, The Geological Society, Special Publication 108: 191-199.
- Jokat, W., Boebel, T., König, M. y Meyer, U. 2003. Timing and geometry of early Gondwana breakup. *Journal Geophysical Research* 108(B9): 2428, doi:10.1029/2002JB001802.
- König, M. y Jokat, W. 2006. The Mesozoic breakup of the Weddell Sea. *Journal Geophysical Research* 111(B12): 102, doi:10.1029/2005JB004035.
- Kovacs, L.C., Morris, P., Brozena, J. y Tikku, A. 2002. Seafloor spreading in the Weddell Sea from magnetic and gravity data. *Tectonophysics* 347(1-3): 43-64.
- Kristoffersen, Y. y Haugland, K. 1986. Evidence for the East Antarctic plate Boundary in the Weddell Sea. *Nature* 322: 538-541.
- Kristoffersen, Y., y Hinz, K. 1991. Evolution of the Gondwana plate Boundary in the Weddell Sea area. En Thomson M.R.A, Krame, J.A. y Thomson, J.W. (eds.) *Geological Evolution of Antarctica*, Cambridge University Press: 225-230.
- LaBrecque, J.L. y Barker, P.F. 1981. The Age of the Weddell Basin. *Nature* 290: 489-492.
- LaBrecque, J.L., Cande, S., Bell, R., Raymond, C., Brozena, J., Keller, M., Parra, J.C. y Yáñez, G. 1986. Aerogeophysical survey yields new data in the Weddell Sea. *Antarctic Journal Review* 21: 69-71.
- LaBrecque, J.L., Brozena, J., Parra, J.C., Keller, M.A., Haxby, W., Raymond, C.A., Kovaks, L., Bell, R., Yáñez, G., Peters, M., Cande, S. y Valladares, J. 1989. USAC Aerosurvey Results for the Weddell Basin: Part I. 28th International Geological Congress, Abstracts with Programs PAGINA, Washington D.C.
- LaBrecque, J.L. y Ghidella M.E. 1992. Estimates of bathymetry, depth to magnetic basement and sediment thickness for the western Weddell basin. *Antarctic Journal of the United States Review* 25(5): 68 70.
- LaBrecque, J.L. y Ghidella, M.E. 1997. Bathymetry, depth to magnetic basement, and sediment thickness estimates from aerogeophysical data over the Western Weddell Basin. *Journal of Geophysical Research* 102(B4): 7929-7946.
- Lawver, L.A., Gahagan, L.M. y Coffin, M.F. 1992. The development of paleoseaways around Antarctica. En Kennett, J.P. y Warnke D.A. (eds.) *The Antarctic Paleoenvironment: A Perspective on Global Change Part 1.*, A.G.U. Antarctic Research Series 56: 7-30, Washington D.C.
- Lawver, L.A., Slater, J.G. y Meinke, L. 1985. Mesozoic and Cenozoic reconstructions of the South Atlantic. *Tectonophysics* 114: 233-254.
- Lawver, L.A., Gahagan, L.M. y Dalziel, I.W.D. 1999. Antarctica, Keystone of Gondwana, <http://www.ig.utexas.edu/research/projects/plates/movies/akog.ppt>
- Livermore, R. A. y Hunter, J. 1996. Mesozoic seafloor spreading in the southern Weddell Sea. En Storey, B.C., King, E.C. y Livermore, R.A. (eds.) *Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up*, The Geological Society, Special Publication 108: 227-241.
- Martin, A.K. y Hartnady, C.J.H. 1986. Plate tectonic development of the southwest Indian Ocean: A revised reconstruction of East Antarctica and Africa. *Journal of Geophysical Research* 91: 4767-4786.
- McAdoo, D.C. y Laxon, S.W. 1996. Marine gravity from Geosat and ERS-1 altimetry in the Weddell Sea. En Storey, B.C., King, E.C. y Livermore, R.A. (eds.) *Weddell Sea Tectonics and Gondwana Break-up*, The Geological Society, Special Publication 108: 155-164.
- Müller, R.D., Roest, W.R. Royer, J.-Y., Gahagan, L.M. y Slater, J.G. 1997. Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research* 102(B2): 3211-3214.
- Royer, J.-Y. y Chang, T. 1991. Evidence for relative motions between the Indian and Australian plates during the last 20 Myr from plate tectonic reconstructions. Implications for the deformation of the Indo-Australian plate. *Journal of Geophysical Research* 96: 11779-11802.
- Sandwell, D.T. y Smith, W.H.F. 1997. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry. *Journal of Geophysical Research* 102(B5): 10039-10054 (versión 7.2).
- Storey, B.C., Leat, P.T. y Ferris, J.K. 2001. The location of mantleplume centers during the initial stages of Gondwana breakup. En *Mantle Plumes: Their Identification through Time*, Geological Society of America, Special Paper 352: 71-80.
- Watkeys, M.K. 2002. Development of the Lebombo rifted volcanic margin of Southeast Africa. En Menzies, M.A., Klemperer, S.L., Ebinger, C.J. y Baker, J. (eds.) *Volcanic Rift Margins*, Geological Society of America, Special Paper 362: 27-46.
- White, R. y McKenzie, D. 1989. Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Journal of Geophysical Research* 94: 7685-7729.

Recibido: 26 de septiembre, 2007

Aceptado: 1 de noviembre, 2007