

Fracturación y campos de esfuerzos recientes en el entorno del Estrecho de Bransfield, Antártida Occidental

Fracturation and recent stress fields in the Bransfield Strait region, Western Antarctica

José M. González-Casado¹, Jerónimo López-Martínez¹, Juan J. Durán² y Juan F. Bergamín^{3*}

1. Departamento de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. 28049 Madrid. 2. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. 3. Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. 28040 Madrid.

PALABRAS CLAVE: Fracturación, Análisis poblacional de fallas, Paleoesfuerzos, Estrecho de Bransfield, Antártida.

KEY WORDS: Fracturation, Fault population analysis, Paleostress, Bransfield Strait, Antarctica.

RESUMEN

En las zonas emergidas de los márgenes de la Cuenca de Bransfield se ha realizado un estudio estadístico de la fracturación (fallas menores), con estaciones de medida situadas en varios puntos del archipiélago de las Shetland del Sur y en la Península Antártica. La mayoría de las fallas observadas son direccionales y normales, estando prácticamente ausentes las fallas inversas. La dirección de fracturación más importante es N125°E. Se confirma la existencia a escala regional de varias etapas de fracturación, con tensores de tipo desgarre y normal, que alternan en varias fases desde el Mesozoico hasta la actualidad. El estudio de las fallas normales mediante el método de los diédros rectos permite discriminar dos direcciones de extensión. Una actual y cuaternaria, observable en el interior (Isla Decepción) y en los bordes de la Cuenca de Bransfield, con una dirección de extensión NO-SE, normal al eje de la cuenca. Y otra, probablemente más antigua (mesozoica-cenozoica), durante la que se origina una extensión NE-SO, que puede observarse en las estaciones de medida más alejadas del Estrecho de Bransfield.

ABSTRACT

In several outcrops around the central part of the Bransfield Basin, between the Drake and the Antarctic plates (Fig. 1), the fracturation main characteristics have been established. A large number of faults, more than 800, were measured in seven sites (six in the South Shetland Islands and one in the Antarctic Peninsula), showing a wide range of orientations. However, most of the measured faults show a main trend N125°E (Figs. 2 and 3-A) and a sub-vertical dip (Fig. 3-B). The strike-slip and normal faults amount about 88% of all the measurements, been the reverse and related faults very scarce in the region (Fig. 3-C). As other previous papers had pointed out (e.g., SANTANACH *et al.*, 1992 and WILLAN, 1994), from the fault cross-cut and movement relationships, together with the regional dyke and vein orientations, several normal and strike-slip stress episodes could be inferred. The analysis of the normal fault set, probably the younger one, through the right dihedral method (ANGELIER & MECHLER, 1977) show two different maximum horizontal stretching orientations, that probably represents two different stress episodes. In the first one, the extension direction is orientated NW-SE, is Quaternary in age and is observed in the sites located in the north and south margins of the Central Bransfield Basin, and in Deception Island. The second episode shows a NE-SW extension direction, was probably developed during the interval Paleogene to Cretaceous, and it is showed in the outcrops located far away from the Bransfield Basin margins.

1. INTRODUCCIÓN

La región del Estrecho de Bransfield, donde se ha realizado este trabajo, está situada en el límite septentrional de la Península

Antártica, en la confluencia entre las placas Antártica y Phoenix (Figs. 1 y 2). En esta zona las directrices tectónicas mayores tienen una marcada orientación NE-SO, existiendo una compleja sucesión de unidades

(*) Fallecido el 27 de agosto de 1997.

estructurales. De noroeste a sureste se encuentran:

(a) Una zona de subducción entre las placas Antártica y Phoenix (fosa de las Shetland del Sur). La actividad de esta zona termina o se atenúa fuertemente hace 4 ma (BARKER, 1982). En la actualidad, aún existe un pequeño fragmento de la primitiva placa

tal de la Placa Antártica, que coincide espacialmente con el Estrecho de Bransfield. En los perfiles sísmicos realizados en esta región (JEFFERS *et al.*, 1991; TROUW & GAMBOA, 1992; GRÀCIA *et al.*, 1996, entre otros) se observan numerosas intrusiones magmáticas en la corteza y su análisis permite determinar que el grado de extensión alcanzado



Fig. 1.—Situación de la zona de estudio. A, Placa de Scotia. B, Placa Sandwich. C, Placa Antártica. D, Placa Phoenix. 1, Cabo Shirreff. 2, Península Hurd. 3, Punta Barnard. 4, Península Fildes. 5, Isla Decepción. 6, Bahía Esperanza. 7, Península Byers.

—Location of the studied area. A, Scotia Plate. B, Sandwich Plate. C, Antarctic Plate. D, Phoenix Plate. 1, Cape Shirreff. 2, Hurd Peninsula. 3, Barnard Point. 4, Fildes Peninsula. 5, Deception Island. 6, Hope Bay. 7, Byers Peninsula.

Phoenix no subducido, que está suturado con la placa Antártica (Fig. 1). Todavía hay una cierta actividad sísmica en esta zona (PELAYO & WIENS, 1989), la cual se ha relacionado con un proceso de “rollback” y de hundimiento pasivo de la placa Phoenix en la antigua zona de subducción (BARKER & AUSTIN, 1994).

(b) Un arco magmático desarrollado fundamentalmente durante el Mesozoico-Cenozoico sobre la corteza continental de la Placa Antártica (SMELLIE *et al.*, 1984; DALZIEL, 1984). La mayoría de las islas del archipiélago de las Shetland del Sur representan las raíces erosionadas de esta estructura.

(c) Una cuenca extensional activa y desarrollada también en la corteza continen-

está próximo a un 25 %. Además, en esta zona se localizan varios edificios volcánicos activos, tanto subaéreos (islas Decepción y Penguin) como submarinos (GRÀCIA *et al.*, 1996; LAWVER *et al.*, 1996). Estos datos parecen indicar que esta cuenca representa los primeros estadios de desarrollo de una cuenca oceánica.

(d) La corteza continental de la Placa Antártica representada por la terminación de la Península Antártica, islas Durville y Joinville, y su plataforma continental (Fig. 2).

En este trabajo se realiza un estudio de la fracturación ocurrida en periodos recientes, en el entorno de la región central de la Cuenca de Bransfield, con el fin de establecer las características de esta fracturación y

determinar, a partir de su interpretación mediante métodos gráficos de análisis poblacional de fallas, el estado de esfuerzos reciente y actual.

cual dificulta en gran medida la localización de las macroestructuras tectónicas. Por ello, y para determinar las principales directrices regionales de fracturación, se ha optado por



Fig. 2.—Esquema morfoestructural de la región de la Cuenca de Bransfield (basado en GRÀCIA *et al.*, 1996). (A) Antigua Placa Phoenix. (B) Prisma de acreción. (C) Arco magmático y corteza continental de las Shetland del Sur. (D) Cuenca de Bransfield. (E) Placa Antártica. (F) Edificios volcánicos subaéreos. (G) Edificios volcánicos submarinos. Sobre los puntos de medida se han representado las orientaciones de todas las fallas observadas (máximo valor de las rosas, 20%). Líneas continuas gruesas = fallas. Líneas continuas finas = profundidad en metros. Número de las estaciones como en la Fig. 1.

—Morfostructure of the Central Bransfield Basin. (A) Former Phoenix Plate. (B) Accretion prism. (C) Magmatic arch and continental crust of the South Shetland Islands. (D) Bransfield Basin. (E) Antarctic Plate. (F) Subaerial volcanoes. (G) Submarine volcanic edifices. On measurement sites has been represented the orientation of all fault categories (in the rose diagrams the maximum percentage is 20%). Wide-lines = faults. Thin-lines = depth in meters. Site numbers are like in Fig. 1.

2. MÉTODO

Debido al mayoritario recubrimiento glaciar existente en la región (>90%), los afloramientos rocosos se caracterizan por su discontinuidad y su pequeña extensión, lo

estudiar las fallas menores que, como resultado de la intensa tectónica frágil regional, son muy abundantes en algunas islas.

En una primera etapa se han medido poblaciones de fallas en 45 estaciones distribuidas a lo largo de ambos márgenes de la

parte central de la Cuenca de Bransfield (Península Hurd, Punta Barnard y Cabo Shirreff en la Isla Livingston, Caleta Péndulo y Punta Murature en la Isla Decepción, Península Fildes en la Isla Rey Jorge, y Bahía Esperanza en la Península Antártica (Fig. 1), determinándose las características de la fracturación (orientación, tipo de falla, etc.) en cada una de ellas.

En una segunda fase y para la determinación del campo de esfuerzos bajo el cual fueron activas las fallas medidas, se ha aplicado, en una primera aproximación, el método de los diedros rectos (ANGELIER & MECHLER, 1977) el cual permite determinar con un cierto rango de incertidumbre la posición de los ejes de esfuerzos principales (porcentaje de diedros en compresión o en extensión; donde se situarían σ_1 y σ_3). Para poder discriminar las sucesivas etapas de fracturación regionales se han tenido en cuenta principalmente:

(a) La edad de los materiales donde se han medido estas estructuras. Básicamente éstas son: metasedimentos carbonífero-triásicos de las formaciones Miers Bluff y Trinity Peninsula Group, rocas volcánicas y subvolcánicas mesozoicas (Jurásico-Cretácico), rocas graníticas terciarias y rocas volcánicas cuaternarias.

(b) Las similitudes de orientaciones en rocas de distintas edades.

(c) Las relaciones con otras estructuras, fundamentalmente con diques de composición intermedia, con venas hidrotermales y con maclas de calcita en venas y grietas.

En este trabajo presentamos solamente los resultados procedentes del análisis de las fallas normales, que a priori, y en concordancia con lo propuesto por otros autores (SANTANACH *et al.*, 1992; WILLAN, 1994; TOKARSKI, 1991; REY *et al.*, 1995; PALLÀS, 1996), son el conjunto de fallas más moderno y están probablemente relacionadas con la estructuración reciente de esta región.

3. ANTECEDENTES

En la región del Estrecho de Bransfield existe un considerable número de trabajos regionales sobre sismicidad (PELAYO & WIENS, 1989; VILA *et al.*, 1992; GALÍNDO-ZALDIVAR *et al.*, 1996, entre otros) y locales sobre fracturación (SCHEIDEGGER, 1990;

SANTANACH *et al.*, 1992; SÀBAT *et al.*, 1992; WILLAN, 1994; PALLÀS, 1996, entre otros), que permiten establecer un bosquejo de las principales orientaciones de los campos de esfuerzos y su evolución, en los ámbitos local y regional. En este sentido, parece bien establecido en base a los estudios sobre mecanismos focales de terremotos (PELAYO & WIENS, 1989; GALÍNDO-ZALDIVAR *et al.*, 1996) y de tectónica y vulcanismo regionales (ALDAYA & MALDONADO, 1995; GRÀCIA *et al.*, 1996) que en el entorno de la Cuenca de Bransfield (Fig. 2 zona D y probablemente también las zonas C y E) los esfuerzos actuales son extensionales, con σ_1 subvertical y σ_3 (dirección de extensión) situada NO-SE, es decir, normal al eje de extensión de la cuenca. Una situación de esfuerzos análoga a ésta ha sido descrita en los trabajos que sobre fracturación se han realizado en la Península Hurd (Isla Livingston) (SANTANACH *et al.*, 1992; SÀBAT *et al.*, 1992; WILLAN, 1994). También existe un consenso entre los autores citados para situar con anterioridad a esta etapa extensional, dos etapas de fracturación con tensores de desgarre (σ_1 y σ_3 subhorizontales). En la fase más antigua σ_1 se orienta NO-SE y σ_3 NE-SO; mientras que la más moderna tendría las orientaciones de los ejes intercambiadas con la anterior, esto es, σ_1 orientado NE-SO y σ_3 NO-SE. Esta fase tiene además para algunos autores (WILLAN, 1994) un carácter transtensivo, ya que enlaza con la situación extensional actual. Según WILLAN (1994) existe también una etapa extensional inicial NO-SE, previa a todas las anteriores. En la Isla Rey Jorge, los trabajos de SMELLIE *et al.* (1984), TOKARSKI (1991) y UHLEIN *et al.* (1993), establecen una evolución parecida en las orientaciones de los esfuerzos principales.

4. RESULTADOS

En el área estudiada ha sido posible medir la orientación de 1086 fracturas. En más de 800 casos se ha podido determinar también la orientación de las estrías de deslizamiento y el tipo de movimiento de la falla. Este conjunto, dado su tamaño y su distribución (Fig. 2) lo consideramos estadísticamente representativo de la fracturación acaecida en esta región. El análisis estadístico de los datos pone de manifiesto las siguientes características de las fracturas:

(a) La dirección principal de fracturación regional está situada en torno a N125°E (Fig. 3-A). Esta orientación de las fallas está especialmente marcada en la parte septentrional de la Isla Livingston y en el extremo de la Península Antártica (Fig. 2), mientras que en la Isla Decepción y en la costa meridional de la Isla

emergidas (i.e. N125°E, Fig. 2 zonas C y D) es paralela a la dirección de las fallas transformantes en la antigua placa Phoenix.

(b) En todos los casos el buzamiento de las fallas es muy elevado; el 80% de las fallas medidas están inclinadas entre 60 y 90 grados (Fig. 3-B).

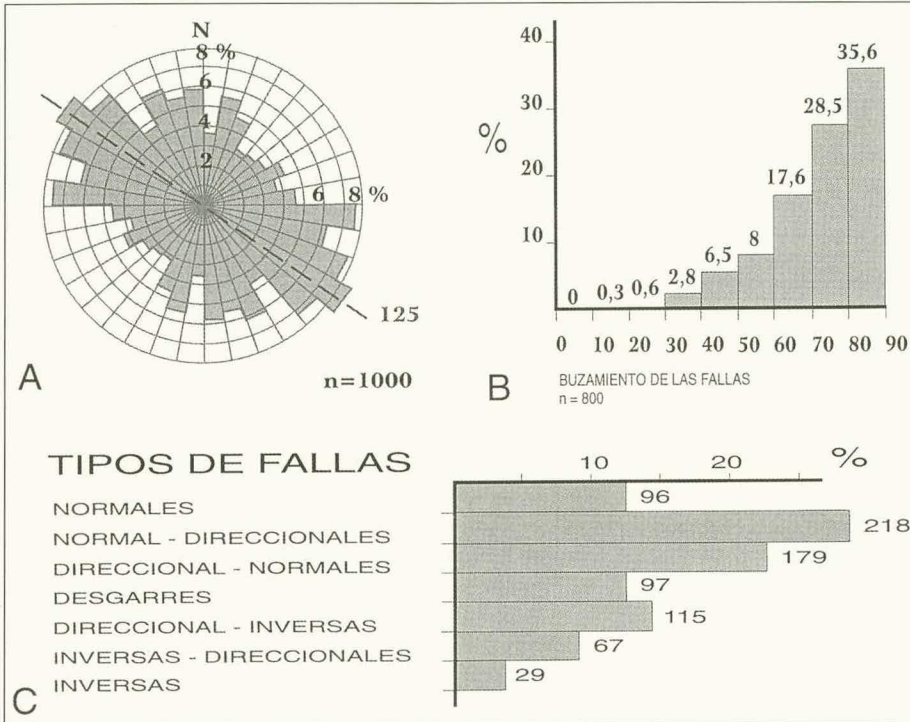


Fig. 3.—Caracterización regional de las fracturas. A. Rosa de orientaciones de fallas. B. Histograma de buzamientos. C. Histograma de tipo de fallas (Secuencia normal. Normales = cabeceos entre 70°-110°. Normal-direccionales = cabeceos entre 45°-70° y 135°-110°. Direccional-normales = cabeceos entre 20°-45° y 160°-135°. Direccionales = cabeceos entre 0°-20° y 160°-180°. Los intervalos para la secuencia inversa son los mismos pero con sentido de movimiento inverso. El ángulo de cabeceo está medido desde la horizontal del plano de falla).

—Regional fault characteristics. (A) Rose diagram corresponding to orientation of measured faults. Histograms of fault dips (B) and fault types (C). (Normal faults sequence. Normal faults = pitch between 70°-110°. Normal oblique-slip faults = pitch between 45°-70° and 135°-110°. Oblique-slip normal faults = pitch between 20°-45° and 160°-135°. Strike slip faults = pitch between 0°-20° and 160°-180°. The reverse fault sequence has the same pitch intervals).

Livingston predominan las fallas orientadas NE-SO, esto es, subparalelas a la dirección de la Cuenca de Bransfield. Es de destacar también la existencia de otras familias de orientaciones en la Península Fildes (N-S y E-O) y en la Bahía Esperanza (E-O). Es importante destacar que la dirección de fracturación dominante en las zonas de corteza continental

(c) Se han clasificado las fallas en función del cabeceo de la estria sobre el plano de falla y del tipo de movimiento observado en el afloramiento (Fig. 3-C). Los resultados muestran como la mayoría de las fallas tienen un importante componente de movimiento normal (493 fallas), aunque el grupo numéricamente más importante son las fallas

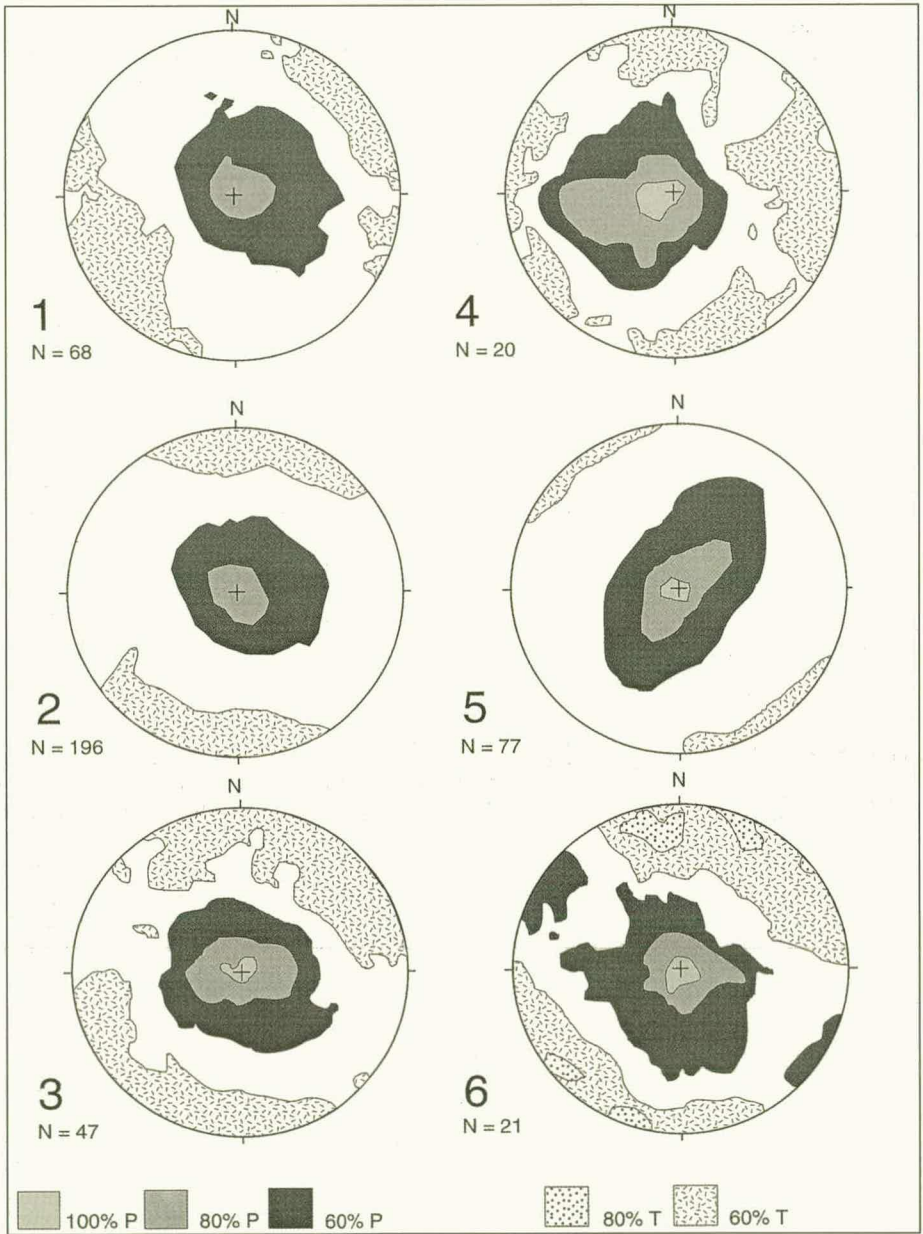


Fig. 4.—Diagramas de diedros rectos para el conjunto de fallas normales. P = porcentaje de diedros en compresión. T = porcentaje de diedros en tensión. 1, Cabo Shirreff. 2, Península Hurd. 3, Punta Barnard. 4, Península Fildes. 5, Isla Decepción. 6, Bahía Esperanza.

—Results of the striated-fault-plane analysis for the normal faults. Right dihedral method. P = percentages of dihedra in compression. T = percentages of dihedra in tension. 1, Cape Shirreff. 2, Hurd Peninsula. 3, Barnard Point. 4, Fildes Peninsula. 5, Deception Island. 6, Hope Bay.

direccionales, estando casi ausentes las fallas inversas. La sucesión de varias etapas de fracturación queda puesta de manifiesto por la existencia de planos de falla con diferentes tipos de movimiento.

Dentro del conjunto de las fallas normales, el análisis regional mediante el método de los diedros rectos (Fig. 4) permite establecer los siguientes resultados:

(1) En el dominio de la Cuenca Central de Bransfield (Fig. 2, zona D), se observa una única dirección de extensión, situada dentro del cuadrante NO-SE (Fig. 4-5). Esta dirección se determina a partir del análisis de fallas medidas en la Isla Decepción, en materiales cuaternarios (VALENCIO *et al.*, 1979); poseen por tanto, un carácter neoformado concordante con la dirección de extensión actual y con la que se deduce de la dirección del eje de la cuenca (GRÀCIA *et al.*, 1996).

(2) En la zona de las Islas Shetland del Sur (Fig. 2, zona C), especialmente en la Isla Livingston, se puede observar una transición desde la zona norte de la isla hacia el sur. Las direcciones de extensión pasan de situarse en el cuadrante NE-SO (Cabo Shirreff, Fig. 4-1), a orientarse NNO-SSE (Península Hurd, Fig. 4-2) y a cubrir, por último, un amplio abanico desde NO-SE a ENE-OSO (Punta Barnard, Fig. 4-3). Esta evolución puede interpretarse como una variación hacia posiciones más acordes con la dirección de extensión de la Cuenca de Bransfield al acercarse a la misma, o bien, que en los diagramas esté representada la suma de dos direcciones de extensión, la etapa final (NO-SE) y otra anterior asociada a la primera etapa de desgarres (con extensión NE-SO). En la Península Fildes (Fig. 4-4), parece evidente la existencia de dos direcciones de extensión superpuestas.

(3) En el sector estudiado de la Península Antártica (Fig. 2, zona E) el diagrama de diedros rectos muestra también un amplio abanico de direcciones de extensión, desde N330°E a N85°E (Fig. 4-6). Esta situación es análoga en la estación de la Punta Barnard y, en ambos casos, las orientaciones en torno a NNO-SSE están indicando la extensión asociada a la apertura de la cuenca.

parte central de la Cuenca de Bransfield parecen indicar un esquema evolutivo complejo, con varias etapas de fracturación en las cuales se suceden tensores de esfuerzos de tipo direccional, de carácter más o menos transensivo, con otros tensores de tipo extensional. Esta sucesión se justifica debido a la existencia de varios movimientos (reactivaciones) para una misma dirección de fracturación (SANTANACH *et al.*, 1992), de planos con dos grupos de estrías distintas y por la presencia de varias familias de orientaciones muy distintas en los diques y venas de la región (SMELLIE *et al.*, 1984).

Se confirma la existencia de un episodio extensional actual y reciente, con extensión NO-SE, que origina neoformación y reactivación de fallas. La edad cuaternaria de esta etapa extensional, así como su relación con el vulcanismo en la Isla Decepción y con la extensión en el Estrecho de Bransfield, parece evidente.

Subsiste el problema del significado de los diagramas de diedros rectos en los que se observa un amplio abanico de posiciones de extensión (Fig. 4, diagramas 3, 4 y 6), siendo posibles dos interpretaciones: (a) la suma de dos tensores, i.e., la dirección de extensión actual (NO-SE a NNO-SSE) con otra más antigua relacionada con la etapa de desgarres (NE-SO); (b) un giro en la dirección de extensión conforme las estaciones se sitúan más próximas al eje de la cuenca. La primera interpretación parece la más plausible, debido a que la extensión actual queda bien establecida en las estaciones donde las rocas fracturadas tienen una edad cuaternaria (Isla Decepción, Fig. 4-5), mientras que en las estaciones donde la edad es claramente mesozoica (Cretácico, SMELLIE *et al.*, 1996, Cabo Shirreff, Fig. 4-1), la dirección de extensión es NE-SO. Por otro lado, en las estaciones donde existe un amplio abanico de direcciones, la fracturación se ha medido en rocas de edad paleógena (Punta Barnard) o en materiales con un amplio rango de edad (desde Triásico a Cuaternario, Península Hurd).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto ANT94-0666 del Programa Nacional de Investigación en la Antártida. Agradecemos

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las observaciones y los análisis de la fracturación realizados en los márgenes de la

a la tripulación del buque Hespérides, al personal de las bases Juan Carlos I y Gabriel de Castilla y al Instituto Antártico Uruguayo su colaboración durante el trabajo de campo. También agradecemos los comentarios de dos revisores anónimos, que han contribuido a mejorar el manuscrito original.

Recibido el 31 de octubre de 1996

Aceptado el 20 de marzo de 1997

BIBLIOGRAFÍA

- ALDAYA, F. & MALDONADO, A. 1995. El borde de la Placa Antártica entre las islas Shetland del Sur y Orcadas del Sur (Península Antártica). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, **8-3**: 273-284.
- ANGELIER, J. & MECHLER, P. 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bulletin Société Géologique de France*, **7**: 1309-1318.
- BARKER, P. F. 1982. The Cenozoic subduction history of the Pacific margin of the Antarctic Peninsula: Ridge crest-trench interactions. *Journal of the Geological Society of London*, **139**: 787-801.
- BARKER, D.H.N. & AUSTIN, J. A. 1994. Crustal diapirism in Bransfield Strait, West Antarctica: Evidence for distributed extension in marginal-basin formation. *Geology*, **22**: 657-660.
- DALZIEL, I. W. D. 1984. Tectonic evolution of a forearc terrane, southern Scotia Ridge, Antarctica. *Geological Society of America Special Paper*, **200**: 32 págs.
- GALÍNDO-ZALDIVAR, J., JABALOY, A., MALDONADO, A. & SANZ DE GALDEANO, C. 1996. Continental fragmentation along the South Scotia Ridge transcurrent plate boundary (Antarctic Peninsula). *Tectonophysics*, **259**: 275-301.
- GRÀCIA, E., CANALS, M., FARRÁN, M., PRIETO, M. J., SORRIBAS, J. & GEBRA TEAM. 1996. Morphostructure and Evolution of the Central and Eastern Bransfield Basin (NW Antarctic Peninsula). *Marine Geophysical Researches*, **18**: 429-448.
- JEFFERS, J. D., ANDERSON, J. B. & LAWVER, L. A. 1991. Evolution of the Bransfield basin, Antarctic Peninsula. In: *Geological Evolution of Antarctica*. M. R. A. THOMSON, J. A. CRAME & J. W. THOMSON, Eds. págs. 481-485. Cambridge University Press. Cambridge.
- LAWVER, L. A., SLOAN, B. J., BARKER, D. H. N., GHIDELLA, M., VON HERZEN, R. P., KELLER, R. A., KLINKHAMMER, G. P. & CHIN, C. S. 1996. Distributed, Active Extension in Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: Evidence from Multibeam Bathymetry. *GSA Today*, **6-11**: 1-6.
- PALLÀS, R. 1996. *Geología de l' Illa de Livingston (Shetland del Sud, Antártida)*. Del Mesozoic al Present. Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona. 265 págs.
- PELAYO, A. & WIENS, D. 1989. Seismotectonics and relative plate motions in the Scotia Sea region. *Journal of Geophysical Research*, **94-b6**: 7293-7320.
- REY, J., SOMOZA, L. & MARTÍNEZ-FRÍAS, J. 1995. Tectonic, volcanic and hydrothermal event sequence on Deception Island (Antarctica). *Geo-Marine Letters*, **15**: 1-8.
- SÀBAT, F., SERRAT, D. & VILAPLANA, J. M. 1992. Cenozoic tectonic evolution in Livingston Island (South Shetlands, Antarctica): Mesostructural and geomorphological approach. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, **5**: 159-166.
- SANTANACH, R., PALLÀS, F., SÀBAT, F. & MUÑOZ, J. A. 1992. La fracturación en la Isla Livingston, Islas Shetland del Sur. In: *Geología de la Antártida Occidental*. J. LÓPEZ-MARTÍNEZ, Ed. Simposios, **3**: 141-151. III Congreso Geológico de España. Salamanca.
- SCHNEIDER, A. E. 1990. Joints and the neotectonics of the Scotia Plate, Antarctica. In: *Mechanics of Jointed and Faulted Rocks*. D. ROSSMANITH, Ed. Balkema. Rotterdam. 187-193.
- SMELLIE, J. L., PALLÀS, R., SÀBAT, F. & ZHENG, X. 1996. Age and correlation of volcanism in central Livingston Island, South Shetland Islands: K-Ar and geochemical constraints. *Journal of South American Earth Sciences*, **9 (3/4)**: 265-272.
- SMELLIE, J. L., PANKHURST, R. J., THOMSON, M. R. A. & DAVIES, R. E. S. 1984. The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *British Antarctic Survey Scientific Reports*, **No. 85**: 87 págs.
- TOKARSKI, A. K. 1991. The Late Cretaceous-Cenozoic structural history of King George Island, South Shetland Islands, and its plate-tectonic setting. In: *Geological Evolution of Antarctica*. M.R.A. THOMSON, J. A. CRAME & J. W. THOMSON, Eds. Cambridge University Press. 417-422.
- TROUW, R. A. J. & GAMBÓA, L.A.P. 1992. Geotranssect Drake Passage - Wedell Sea, Antarctica. In: *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Y. YOSHIDA, K. KAMINUMA & K. SHIRAIISHI, Eds. págs. 153-161. Terrapub. Tokyo.
- UHLER, A., TROMPETTE, R. R., ROCHA-CAMPOS, A. C., DOS SANTOS, P. R., GIPP, M. & SIMÕES, J. C. 1993. Regime compressivo através de uma zona de subducção: juntas subhorizontais no arco magmático cenozoico da Ilha Rei George. *Anais IV Simposio Brasileiro de Geologia*. Sociedade Brasileira de Geologia. Nucleo Minas Gerais. Bol. **12**. 330-339.
- VALENCIO, D. A., MENDÍA, J. E. & VILAS, J. F. 1979. Palaeomagnetism and K-Ar Age of Mesozoic and Cenozoic igneous rocks from Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, **45**: 61-68.
- VILA, J., ORTIZ, R., CORREIG, A. & GARCÍA, A. 1992. Seismic activity on Deception Island. In: *Recent Progress in Antarctic Earth Science*. Y. YOSHIDA, K. KAMINUMA & K. SHIRAIISHI, Eds. Terrapub. Tokyo. 153-161.
- WILLAN, R. C. R. 1994. Structural setting and timing of hydrothermal veins and breccias on Hurd Peninsula, South Shetland Island: a possible volcanic-related epithermal system in deformed turbidites. *Geological Magazine*, **131(4)**: 465-483.