REVISTA DE LA
ASOCIACIÓN GEOLÓGICA ARGENTINA
www.geologica.org.ar
Julio 2025

Caracterización de indicadores de peligro sísmico y del potencial tsunamigénico en la región del Arco de Scotia y Península Antártica

Oscar Marcos ZAMBRANO[1,2(*)], Andrés Federico ZAKRAJSEK[1], Juan Manuel LIRIO[1], Adriana María GULISANO[1,3,4], Stella POMA[2,5], José Leonardo PINTO[1], Milton Plasencia LINARES[6], Carlos WILSON[7], Diego AZCURRA[7], Mariano HERNÁNDEZ[7], Silvia LAGORIO[7], Marcela YAMIN[7], Javier BENÍTEZ[7]

[1]Instituto Antártico Argentino (IAA), Dirección Nacional del Antártico (DNA), Secretaría de Malvinas, Antártida y Atlántico Sur, Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto (MRECIC), Argentina.

[2] Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FECEN), Departamento de Ciencias Geológicas, Argentina.

[3] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Universidad de Buenos Aires (UBA), Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), Grupo LAMP, Argentina.

[4] Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FECEN), Departamento de Física, Grupo LAMP, Argentina.

[5] Laboratorio de Petrología. Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires, Instituto de Geociencias Básicas y Aplicadas (IGEBA) – Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

[6] Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS), Trieste, Italia.

[7] Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), Argentina.

E-mail: omzambrano1966@gmail.com ; osz@mrecic.gov.ar

Editor: Ricardo A. Astini

Recibido: 27/02/2024
Aceptado: 26/05/2025

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar indicadores de peligro sísmico para la región del Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica. Dicho ámbito concentra la mayor actividad sísmica de la región circumpolar antártica. En una primera instancia, se caracterizó la sismicidad a través de su ocurrencia temporal, distribución espacial y energía sísmica radiada, correspondientes al período comprendido entre los años 1970 a 2023 inclusive. Se evaluaron los distintos ámbitos de deformación cortical asociados a la sismicidad, estableciendo para cada uno su mayor o menor potencial sismogénico. Asimismo, como factor contribuyente al peligro sísmico de la región se determinaron las zonas marinas de mayor potencial tsunamigénico. Para ello, mediante simulación numérica con base en la teoría de propagación de las ondas gravitacionales en medios fluidos, se estimaron indicadores dinámicos que caracterizan la evolución temporal y espacial del fenómeno tsunami en el ámbito marino antártico y subantártico propiamente dicho. A partir del análisis de los indicadores de peligro sísmico, se estableció una división en zonas sísmotectónicas de acuerdo al grado de peligro sísmico potencial. Los resultados indican que la localidad que reviste mayor riesgo sísmico son las Islas Orcadas del Sur, donde se ubica la base argentina permanente Orcadas. En orden decreciente de vulnerabilidad, las Islas Shetland del Sur representan la segunda zona de riesgo sísmico. Este archipiélago alberga numerosas bases antárticas permanentes. En las Islas Sandwich del Sur no hay asentamientos humanos permanentes, por lo tanto, aunque constituiría la zona de mayor peligro sísmico de la región, usualmente no implica riesgo sísmico local.

Palabras clave: Arco de Scotia; Península Antártica; Sismicidad; Tsunamis; Peligro sísmico.

ABSTRACT

Characterization of seismic hazard indicators and tsunamigenic potential in the Scotia Arc region and Antarctic Peninsula

The objective of this study is to evaluate seismic hazard indicators for the Scotia Arc region and the northern tip of the Antarctic Peninsula—an area that concentrates the highest seismic activity within the Antarctic circumpolar zone. Seismicity from 1970 to 2023 was analyzed in terms of its temporal occurrence, spatial distribution, and radiated seismic energy. The crustal deformation zones associated with this seismicity were identified and assessed based on their relative potential for seismic hazard. Additionally, marine areas with significant tsunamigenic potential were identified as contributing factors to regional seismic hazard. Using numerical simulations based on the theory of gravity wave propagation in fluid media, dynamic indicators were estimated to characterize the spatial and temporal evolution of tsunami phenomena in the Antarctic and sub-Antarctic marine areas. Based on the analysis of these seismic hazard indicators, a division into seismotectonic zones was proposed, reflecting varying degrees of seismic hazard potential. The results indicate that the South Orkney Islands—home to Argentina's year-round Antarctic station Orcadas—present the highest level of risk. The South Shetland Islands rank second in seismic vulnerability and also host permanent Antarctic research bases. While the South Sandwich Islands exhibit the greatest seismic hazard, their lack of permanent human settlements generally mitigates the associated local seismic risk.

Keywords: Scotia Arc; Antarctic Peninsula; Seismicity; Tsunamis; Seismic hazard.

INTRODUCCIÓN

La región meridional del Océano Atlántico comprendida entre el extremo sur de Sudamérica y la Península Antártica, denominada región del Scotia, alberga una serie de archipiélagos que comprenden, en su ámbito septentrional la expresión de sectores emergidos de la Plataforma Continental Argentina (COPLA 2017, entre otros), y en su ámbito austral la manifestación de sectores emergidos de la plataforma de la Península Antártica (COPLA 2017, entre otros). Dichos sectores se conectan, geográficamente a través de un arco de islas volcánicas, y geológicamente a través de una historia evolutiva en común que permite recomponerlos en una unidad morfoestructural continua del margen suroccidental del Gondwana previo a su desmembramiento a partir del Jurásico Superior (ej.: Vérard et al. 2012, entre otros).

Los estudios sismológicos concernientes a la región del Arco de Scotia, se orientaron fundamentalmente a caracterizar la actividad sismotectónica y las propiedades físicas de los terremotos (Russi et al. 1994, Febrer et al. 2001, Plasencia Linares 2008, entre otros) así como a desentrañar la estructura interna de la Tierra (ej.: Russi et al. 1995, Vuan et al. 2000, 2014, Plasencia Linares 2008, Park et al. 2012, Zambrano et al. 2022a, entre otros).

En los últimos años, los estudios de sismicidad asociada con la actividad volcánica en Antártida, se enfocaron especialmente en las Islas Shetland del Sur, lugar de establecimiento de alrededor de veinte bases antárticas. En dicho archipiélago, la Isla Decepción representa el escenario de numerosas erupciones volcánicas registradas durante el Holoceno, y más recientemente en el siglo XX (ej.: Bartolini et al. 2014, Moreno-Vacas y Almendros 2021, entre otros). Asimismo, otras erupciones volcánicas fueron documentadas en tiempos históricos en las islas Bridgeman y Pingüino (Smellie et al. 2023, entre otros). En años recientes, la formación de enjambres sísmicos profusos de larga duración (algunos meses) al sur de la Isla 25 de Mayo, indican actividad magmática subyacente en torno al volcán submarino Orca, considerado hasta entonces inactivo (ej.: Kaminuma 2001, Olivet et al. 2021, Seivane et al. 2022, Cesca et al. 2022, entre otros).

En lo que respecta a la amenaza de tsunamis en la región antártica, su estudio cobró especial énfasis a partir del evento sísmico de agosto del 2021 ocurrido en el sector de las Islas Sandwich del Sur, generador de un tsunami global que se propagó a través de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico (ej.: Hubbard 2021, Roger et al. 2022, Govers et al. 2022, entre otros). El peligro que un tsunami de origen tectónico producido en la región del Arco de Scotia podría implicar para las costas de Sudamérica y África fue caracterizado por Okal y Hartnady (2009). Por otra parte, Dragani et al. (2009) caracterizaron la vulnerabilidad de las costas patagónicas frente al avance de un potencial tsunami y su interacción con la plataforma continental. Bujalesky (2012) encuentra indicios paleogeomorfológicos en el litoral atlántico de Tierra del Fuego, que dan cuenta de la ocurrencia en dichas costas de al menos tres eventos de incursión de tsunamis de energía moderada durante los últimos 6000 años.

Debido a que en la región del Arco de Scotia se desarrolla una actividad sísmica profusa inmersa en un entorno predominantemente marino, para poder realizar una evaluación de su impacto local en relación a asentamientos humanos situados en bases antárticas, es preciso en primera instancia caracterizar el potencial que la región encierra para generar sismos y tsunamis.

En el presente trabajo se realiza una evaluación preliminar de indicadores de peligro sísmico en la región del Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica, donde las franjas costeras insular y continental de Antártida y del extremo sur de Sudamérica, están continuamente expuestas al elevado nivel de actividad sismotectónica que caracteriza a

la región. Los objetivos del presente trabajo son:

• Caracterizar la sismicidad de la región del Arco de Scotia, determinando los distintos ámbitos de deformación cortical asociados a la sismicidad, estableciendo para cada uno su mayor o menor potencial sismogénico.

• Como factor contribuyente al peligro sísmico, determinar las zonas marinas más propensas a sufrir tsunamis.

• Como resultado de los indicadores de peligro sísmico, establecer las zonas sismotectónicas de acuerdo al grado de peligro potencial.

Para ello, se analiza la actividad sísmica a través de su distribución espacial, variación temporal, energía sísmica radiada, y de la relación frecuencia-magnitud, para cada ámbito sismotectónico reconocido en la región de estudio. A su vez, la misma se caracteriza e interpreta en base al ambiente tectónico y reología predominantes, y a la presencia de zonas críticas de deformación en la corteza. Se establecen las condiciones que favorecen la formación de tsunamis por eventos tectónicos y se determinan las áreas marinas de mayor potencial tsunamigénico en la región. Adicionalmente, mediante simulación numérica, se caracteriza la dinámica del desarrollo de tsunamis en el ámbito marino antártico y subantártico propiamente dicho. En base a los indicadores de peligro sísmico y del potencial tsunamigénico establecidos, se propone una categorización de zonas sismotectónicas de acuerdo al grado de peligro potencial.

Se reconocieron al menos tres ámbitos de elevado peligro sísmico y de tsunamis, dominados por regímenes tectónicos distintos: convergencia en la zona de las Islas Sandwich del Sur, transcurrencia en la zona de las Islas Orcadas del Sur y divergencia en la zona de las Islas Shetland del Sur. Otros ámbitos de similar peligro se reconocen en el Mar de Hoces (Pasaje de Drake) (sector de la Plataforma Fueguina) y Mar del Scotia nororiental (sector del bloque de la Isla San Pedro).

En cuanto a la vulnerabilidad de los asentamientos humanos frente a la generación de sacudidas sísmicas y/o a remociones en masa del terreno y/o al avance de tsunamis producto de un evento sísmico local, la localidad que reviste mayor riesgo sísmico son las Islas Orcadas del Sur. En dicho archipiélago se ubica la base argentina permanente Orcadas, inmersa en zona de alto peligro sísmico y de alto potencial tsunamigénico.

MARCO GEODINÁMICO DE LA REGIÓN DE ESTUDIO

El Arco de Scotia comprende el desarrollo de una serie de islas y bloques continentales que permiten continuar el extremo sur de los Andes con la Península Antártica (Ramos 1999). Los estudios geológicos y geofísicos indican que dicha configuración representa un escenario de fragmentación y dispersión de bloques continentales que fueron conducidos por un flujo de manto sublitosférico dirigido hacia el este, a partir del Paleógeno temprano (ej.: Alvarez 1982, Barker 2001). Representa el sector circumpolar de mayor actividad sismotectónica en torno al continente antártico, donde el elevado nivel de sismicidad y distribución de los sismos denotan una deformación de margen de placa intensa (ej.: Pelayo y Wiens 1989, Caminos et al. 1999, Vuan et al. 2000, Barker 2001, Febrer y Zakrajsek 2005, Smalley et al. 2007, Plasencia Linares 2008, Smalley et al. 2014, Vuan et al. 2014, Zambrano et al. 2022a, entre otros).

Estructuras tectónicas y campo de esfuerzos regional

En el Arco de Scotia se desarrollan dos grandes sistemas estructurales de carácter escencialmente transcurrente y de orientación predominante este-oeste: i) Dorsal Norte del Scotia y ii) Dorsal Sur del Scotia, que constituyen respectivamente los límites septentrional y meridional de la placa Scotia (ej.: Pelayo y Wiens 1989) (ver Fig. 1 en Zambrano et al. 2022a). El carácter sinestral transpresivo dominante de la Dorsal Norte del Scotia (límite entre las placas Scotia y Sudamericana) queda evidenciado por la presencia de dos sistemas de fallamiento inverso oblicuo de polaridades opuestas, localizados uno al norte del Banco Namuncurá y el otro al sur del bloque de la Isla San Pedro (ej.: Pelayo y Wiens 1989). Por otro lado, el carácter sinestral transtensivo dominante de la Dorsal Sur del Scotia (límite entre las placas Scotia y Antártica) se manifiesta por la alternancia entre segmentos transcurrentes y zonas de extensión oblicua que se desarrollan a uno y otro lado de la dorsal (ej.: Pelayo y Wiens 1989).

Las dorsales Norte y Sur del Scotia se conectan al Este a través de la fosa arqueada de las Sandwich del Sur, donde la placa Sudamericana se subduce por debajo de la placa Sandwich. Las Islas Sandwich del Sur integran el arco volcánico producto de la subducción, en tanto que la extensión de retroarco define el límite entre las placas Scotia y Sandwich (denominado Dorsal Este del Scotia). En contraste, el borde occidental de la placa Scotia está determinado por la Zona de Fractura Shackleton (límite entre las placas Scotia y Antártica): un sistema transcurrente de carácter sinestral transpresivo que experimenta un cambio gradual a convergente en dirección al noroeste, donde pasa a conformar el margen de subducción andina a la altura de la Cordillera Fueguina (ej.:

Caminos et al. 1999, Ramos 1999, Yamin y Anselmi 2020) (ver Fig. 1 en Zambrano et al. 2022a).

En el margen Pacífico de la Península Antártica, en el segmento que abarca a las Islas Shetland del Sur, entre las zonas de fractura Hero y Shackleton, se desarrolla el complejo de subducción lenta, producto del hundimiento de la placa Pacífica bajo la placa Antártica (ej.: Pelayo y Wiens 1989, Della Vedova et al. 1997, Caminos et al. 1999, Robertson Maurice et al. 2003, entre otros). A retroarco de dicha subducción se desarrolla el rift central de la cuenca Bransfield, con manifestación de actividad volcánica submarina y algunos volcanes emergidos como Decepción, Pingüino y Bridgeman (ej.: Caminos et al. 1999, entre otros) (ver Fig. 1 en Zambrano et al. 2022a).

Actividad sismotectónica

La actividad sísmica en la región del Arco de Scotia está vinculada a la liberación tanto súbita como gradual de la energía de deformación que se acumula y libera cíclicamente en torno a los principales lineamientos estructurales que afectan a la capa litosférica, producto de la dinámica de las placas tectónicas (ver Figs. 1 y 2 en Zambrano et al. 2022a).

En la Dorsal Norte del Scotia, la actividad sísmica se desarrolla intermitentemente por más de 2500 km. En el tramo continental se distribuye a lo largo del sistema transforme Magallanes-Fagnano (ej.: Buffoni et al. 2009, Torres Carbonell et al. 2014, Buffoni 2016), y en el tramo marino se concentra en el sector de los bancos Namuncurá, Davis y Aurora, y el bloque de la Isla San Pedro (ej.: Pelayo y Wiens 1989, Buffoni 2016, Buffoni et al. 2009). En la fosa de las Sandwich del Sur, la sismicidad se desarrolla en forma profusa en la zona de Wadati-Benioff, hasta aproximadamente 400 km de profundidad. A retroarco la sismicidad se distribuye en torno al eje de expansión oceánica (Dorsal Este del Scotia), concentrándose especialmente en los extremos norte y sur, que corresponden a los puntos triples determinados por las placas Sudamericana, Scotia y Sandwich, y las placas Antártica, Scotia y Sandwich, respectivamente. En la Dorsal Sur del Scotia la actividad sísmica es más frecuente que en la Dorsal Norte del Scotia y se extiende por más de 1500 km. En el tramo correspondiente a la dorsal Irízar y banco Discovery se manifiesta en forma difusa, mientras que en el tramo central se concentra al norte del bloque de las Islas Orcadas del Sur y de la Cuenca Powell. En la zona de Fractura Shackleton la sismicidad es somera y se extiende por más de 800 km. Se intensifica en aquellos sectores donde las dorsales fósiles Antártica-Phoenix y Oeste del Scotia intersectan la franja de transcurrencia, y se ramifica en forma difusa por dichas estructuras hacia el interior de las placas Antártica y Scotia, respectivamente. También se intensifica en el extremo meridional de la Plataforma Fueguina, donde se produce la transición del régimen transcurrente al convergente. En la región del Mar de la Flota, la sismicidad se distribuye a lo largo del rift activo del Bransfield por más de 400 km, y su ocurrencia denota nucleamientos en torno a los principales centros de actividad volcánica, emergidos y submarinos. A lo largo del margen noroccidental de las Islas Shetland del Sur, la sismicidad es difusa y se asocia al proceso de subducción lenta que tiene lugar en la trinchera de las Shetland del Sur. La actividad se prolonga hasta profundidades cercanas a los 100 km, lo cual indica actividad de deformación a nivel del manto superior (Robertson Maurice et al. 2003).

Eventos tsunamigénicos

En lo que respecta al ámbito circumpolar austral de nuestro planeta, no han trascendido documentos (publicaciones, registros, reportes, cuadernos de bitácora o cartas) que relaten, durante los tiempos de exploración marina del continente antártico (siglos XVI, XVII, XVIII y XIX), el avistamiento de tsunamis en sus costas.

Teniendo en cuenta que el primer asentamiento humano de permanencia ininterrumpida en Antártida data del año 1904, con el establecimiento de la base argentina Orcadas (en la Isla Laurie del archipiélago Orcadas del Sur), y que no fue sino hasta entrada la segunda mitad del siglo XX que el número de bases antárticas aumentó de tres a alrededor de un centenar (ya en la actualidad), localizadas preferentemente sobre las franjas costeras continental e insular del continente, puede afirmarse con suficiente grado de confianza que en el período que abarca los años 1950 a 2020, no se produjeron en la region del Arco de Scotia, tsunamis de origen tectónico que hubieren impactado sobre alguna de las estaciones científicas o bases antárticas ya establecidas.

No obstante, determinaciones mareográficas y satelitales permitieron detectar en los últimos años el arribo a las costas antárticas de ondas tsunami atenuadas, generadas por eventos telesísmicos (desencadenados a miles de kilómetros de distancia). Tal es el caso del tsunami generado por el sismo Honshu (Japón) en el año 2011, proveyendo la primera evidencia en el ámbito antártico de un calving de plataforma de hielo causado por el arribo de un tsunami global atenuado (Brunt et al. 2011). Otro caso de calving en Antártida se produjo a raíz de un tsunami volcánico que se propagó desde el sitio de erupción del Hunga Tonga en el año 2022, dando lugar al desprendimiento de un gran témpano (Liang et al. 2023).

Con respecto a la formación de tsunamis en la región del Arco de Scotia, en lo que ha transcurrido del siglo XXI, fueron

documentados: i) un evento tsunami corroborado, de repercusión global en el planeta, ocurrido el 12/08/2021, y ii) un evento tsunami probable, de repercusión local en el Antártida, ocurrido el 04/08/2003. Ambos eventos se describen a continuación:

Tsunami de origen tectónico producido por el sismo del 12/08/2021 (Mw 8.1), Islas Sandwich del Sur. El 12 de agosto de 2021, en el sector de las Islas Sandwich del Sur se produjo una compleja e inusual secuencia de fuertes sismos de magnitud M_w= 7.6 (18:32:54 UTC; lat. 57°34'03''S, long. 25°01'54''O), M_w= 8.1 (18:35:20 UTC; lat. 58°27'05''S, long. 25°19'37''O), y decenas de réplicas de magnitud mayor a 4.5, durante un lapso de 24 hs (ej.: Hubbard 2021, Titov et al. 2021, Roger et al. 2022, Weinstein et al. 2021, entre otros). La determinación de la profundidad hipocentral del sismo principal, indica que el sismo podría haber correspondido a un evento de megathrust (Hubbard 2021). El evento provocó un tsunami que se propagó por todo el planeta, siendo registrado en estaciones mareográficas distribuidas en las costas de los océanos Atlántico, Índico y Pacífico. La estación mareográfica King Eduard Point (lat. 54°16'59''S, long. 36°30'00''O) situada en las Islas Georgias del Sur, ~ 830 km al noroeste del epicentro del sismo principal, registró un pico máximo de amplitud de 75 cm ante el paso del tsunami, 3 horas después de haberse producido el evento, mientras que en Alaska los registros indicaron amplitudes de ~15 cm con tiempos de arribo de ~24 horas (Titov et al. 2021).

Dicho tsunami representa hasta la fecha (2024), el de mayores proporciones documentado en la región circumpolar antártica.

Evento sísmico del 04/08/2003 (Mw 7.6), sector Islas Orcadas del Sur, y probable tsunami. El 04/08/2003, hora 04:37:19 UTC, un sismo de magnitud M_w= 7.6 se produjo en el flanco norte del bloque de las Islas Orcadas del Sur (lat.60°31'56''S, long.43°27'04''O), en el límite entre las placas Antártica y Scotia. Dicho sismo (denominado Centenario) fue sucedido por una secuencia de réplicas a lo largo del sistema de fallamiento transforme situado ~ 20 km al norte de la Isla Laurie (Febrer y Zakrajsek 2005).

La determinación del mecanismo focal del evento principal, indicó un fallamiento normal de rumbo aproximado este-oeste en la zona de ruptura (Plasencia Linares 2008). El sismo se sintió fuertemente en la base debido a los temblores locales producidos por el paso de las ondas superficiales, causando daños menores a las instalaciones edilicias, sin afectar al personal que en ese momento ocupaba la base en horas nocturnas (Russi et al. 2010). A la mañana siguiente al evento, se observó el desarrollo de un sistema de fracturas en el pack de hielo marino siguiendo la línea de costa de la Bahía Uruguay (Russi et al. 2010). El sistema mostraba sectores con bloques de hielo de hasta 10 m de longitud y 2 m de altura desplazados sobre la playa unos pocos metros tierra adentro, a pocas decenas de metros de las instalaciones de la base (Russi et al. 2010).

Si bien existe la posibilidad de que los efectos observados en las inmediaciones de la base Orcadas, posteriores a dicho sismo, fueran el producto del ingreso a Bahía Uruguay de un tsunami sismotectónico originado en el sitio del epicentro, a la fecha no existen pruebas concluyentes al respecto, como ser observaciones y mediciones mareográficas, satelitales y gravimétricas, que den cuenta de la propagación de una perturbación oceánica de tipo gravitacional originada en la zona de ruptura.

DATOS

La ocurrencia temporal y coordenadas epicentrales de los eventos sismotectónicos fueron extraídas del catálogo de libre acceso IRIS Incorporated Research Institutions for Seismology (https://ds.iris.edu). Para los eventos de magnitud relevante descriptos en este trabajo, la información correspondiente fue cotejada con la del catálogo GEOFON del GFZ German Research Centre for Geosciences (https://geofon.gfz-potsdam.de). Los datos corresponden al período que abarca desde el año 1970 al año 2023 inclusive. La información sismológica fue empleada para la realización de los mapas de sismicidad y caracterizaciones estadísticas.

Se empleó la grilla GEBCO_2022 (GEBCO Compilation Group 2022): a) para la realización de los distintos mapas topográfico-batimétricos, b) para la obtención del modelo de pendiente máxima del lecho marino, y c) como grilla base para el modelado numérico de las ondas tsunami en el océano.

MÉTODOS

La magnitud máxima esperable para cada zona sismotectónica evaluada, se obtuvo a partir del correspondiente gráfico de distribución frecuencia-magnitud o relación Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter 1954).

Para el cálculo de la energía sísmica radiada (por sismo y por grupo de sismos) se emplearon las relaciones recomendadas por IASPEI (*International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior*) para escalas de magnitud no saturadas (IASPEI 2005, Kanamori 1977, Bormann y Saul 2008), a partir de las cuales se expresa la energía sísmica radiada en función de la magnitud sísmica M_w.

Para mantener consistencia de las estimaciones efectuadas con las distintas poblaciones de datos, se aplicó el filtro pasa-alto: M_w≥4.5, obtenido mediante el criterio de frecuencia de corte a partir de las correspondientes relaciones frecuencia-magnitud.

Para la simulación numérica de tsunamis se empleó la teoría lineal de las ondas de largo período, que representa la versión más simple de la teoría de ondas gravitacionales en medios fluidos y sirve como aproximación para describir la propagación de un paquete de ondas de tipo tsunami en aguas abiertas (Levin y Nosov 2016). Se simuló: el tiempo de viaje del frente de onda, su amplitud, velocidad de propagación y densidad de energía transportada. La distancia máxima de modelado fue de 3500 km, la cual resulta inferior a la distancia de destrucción dispersiva para el rango de profundidad oceánica correspondiente a la región de estudio. En consecuencia, los resultados y predicciones obtenidas por las simulaciones numéricas, conviven dentro del campo de validez de la teoría de ondas aplicada (Levin y Nosov 2016). El cómputo de propagación de coordenadas fue basado en la utilidad geoddistance, recurso de cálculo geodésico de la librería GeographicLib compatible con a Octave/MATLAB (Karney 2013, 2022, 2024). Se emplearon la grilla batimétrica GEBCO_2022 y su correspondiente modelo digital de elevación, como dominio discreto y condición de contorno, respectivamente. El marco teórico del modelo empleado se encuentra desarrollado en el libro de Levin y Nosov (2016).

El mapa de pendiente máxima del lecho marino se obtuvo a partir del cómputo del módulo del gradiente del modelo digital de elevación GEBCO_2022. Para ello, se aplicó el esquema numérico de diferencia central correspondiente al método de diferencias finitas.

RESULTADOS

Con el objetivo de establecer el mayor o menor grado de peligro sísmico que caracteriza a los distintos ámbitos sismotectónicos de la región del Arco de Scotia, se evaluó la actividad sísmica teniendo en cuenta determinadas características y condiciones del medio terrestre y marino antárticos, tal que al evaluarlas en forma conjunta representen adecuadamente el estado potencial de peligro sísmico. Los indicadores de valoración cuantitativa evaluados son: magnitud máxima esperable, magnitud máxima registrada y porcentaje de energía sísmica radiada. Por otro lado, los indicadores de valoración cualitativa evaluados son: ambiente geotectónico, estructuras geológicas, régimen de deformación, actividad volcánica, reología y edad de la corteza, geoformas terrestres, relieve submarino y peligro de generación de tsunamis con la indicación cuantitativa de tiempo de viaje, amplitud característica, velocidad y densidad de energía radiada.

Energía sísmica radiada, magnitud máxima esperable y reología

Para entender la forma en que se distribuye la energía sísmica radiada en la región del Arco de Scotia y cuáles representan las zonas de mayor potencial sismogénico, esta se analizó en términos de su distribución porcentual y de su magnitud máxima esperable.

Los resultados indican que del total de energía sísmica radiada (de magnitud M≥4.5) en el período que abarca los años 1970 a 2023, el 74.5 % fue radiada en el margen de convergencia de las Sandwich del Sur, 22.2 % en la Dorsal Sur del Scotia, 1.3 % en la Dorsal Norte del Scotia, 0.6 % en la Zona de Fractura Shackleton y 1.2 % en el Rift del Bransfield (Cuadro 1 y Fig. 1). Por otra parte, el 86.5 % de eventos sísmicos (de magnitud M≥4.5) se desarrolló profusamente en la zona de subducción de las Sandwich del Sur. El resto se produjo intermitentemente a lo largo de la Dorsal Sur del Scotia (6 %), la Dorsal Norte del Scotia (2 %), la Zona de Fractura Shackleton (1.8 %) y el Rift del Bransfield (2.2 %). En intraplaca, la sismicidad fue infrecuente y difusa, representando menos del 0.1% del total (Cuadro 1 y Fig. 1).

En términos de valor absoluto, durante el último medio siglo, se observa un máximo de energía sísmica radiada (de magnitud M≥4.5) de ~1.75×10^{17}Joules en el margen de subducción de las Sandwich del Sur (límite entre las placas Sudamericana y Sandwich), en marcado contraste con los ~5.2×10^{14} Joules radiados en la Dorsal Este del Scotia (límite divergente entre las placas Scotia y Sandwich). Las cantidades estimadas de energía sísmica radiada en el límite de la placa Scotia con la placa Sudamericana son, de este a oeste: a) bloque de la Isla San Pedro: ~5.9×10^{14} Joules, b) bancos Aurora y Davis: ~8.4×10^{14} Joules, c) Banco Namuncurá: ~1.5×10^{15} Joules y d) Tierra del Fuego: ~2.9×10^{13}Joules (Fig. 1). Las cantidades estimadas de energía radiada por sector en el límite de la placa Scotia con la placa Antártica son, de este a oeste: a) dorsal Irízar: ~2.6×10^{15} Joules, b) bloque de las Islas Orcadas del Sur (incluyendo el margen norte de la cuenca Powell): ~4.9×10^{16} Joules, c) Islas Shetland del Sur (sector Rift del Bransfield, dentro de la placa Antártica): ~2.8×10^{15}Joules (Fig. 1). Por último, la cantidad estimada de energía sísmica radiada en el límite de la placa Scotia con la placa Pacífica es (sector Mar de Hoces): ~1.4×10^{15} Joules (Fig. 1).

Un aspecto destacable de la sismicidad durante el período considerado, es la diferencia considerable de energía sísmica

Sector / Ambiente tectónico		Período 1970-2023				
		Distribución porcentual de eventos sísmicos (%)		Distribución porcentual de la energía sísmica radiada (%)		Longitud de la franja de sismicidad (km)
Bloque Isla San Pedro	Dorsal Norte del Scotia / Régimen transpresional sinestral	0,62	**2,02**	0,25	**1,28**	500
Bancos Aurora y Davis		0,55		0,36		900
Banco Namuncurá		0,62		0,65		600
Tierra del Fuego		0,23		0,02		500
Islas Sandwich del Sur	Subducción de las Sandwich del Sur.	86,45	**86,45**	74,50	**74,50**	750
Dorsal Este del Scotia	Dorsal oceánica. Régimen extensional.	1,53	**1,53**	0,22	**0,22**	500
Dorsal Irízar	Dorsal Sur del Scotia. Falla transforme / Régimen transtensional sinestral	0.89	**6,06**	1,10	**22,23**	500
Bloque Orcadas del Sur		5,17		21,13		750
Islas Shetland del Sur	Rift del Bransfield. Fosa tectónica / Régimen extensional.	2,17	**2,17**	1,18	**1,18**	550
Mar de Hoces	Zona de Fractura Shackleton. Falla transforme / Régimen transpresional sinestral	1,79	**1,79**	0,60	**0,60**	800

Cuadro 1. Actividad sísmica en la región del Arco de Scotia expresada en función de la cantidad porcentual de eventos sísmicos por sector y por ambiente tectónico; y distribución relativa porcentual de la energía sísmica radiada y longitud de la franja de sismicidad correspondiente, entre los años 1970 y 2023. Para la estimación de la energía sísmica radiada se emplearon las relaciones recomendadas por IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) (ver sección Métodos).

radiada entre los tramos norte y sur del Arco de Scotia. Mientras que el tramo norte (límite entre la placa Scotia y Sudamericana) radió ~3×10^{15} Joules, el tramo sur (límite entre la placa Scotia y Antártica) radió ~5.3×10^{16} Joules. Esto representa una diferencia de poco más de un orden de magnitud. Asimismo, destaca la anomalía del bloque de las Islas Orcadas del Sur, con una energía sísmica radiada comparable a la radiada en el sector de las Islas Sandwich del Sur, y notablemente superior a las radiadas conjuntamente en: i) Islas Shetland del Sur (Rift del Bransfield), ii) Mar de Hoces (Zona de Fractura Shackleton), iii) Tierra del Fuego, y iv) Dorsal Norte del Scotia (Fig. 1).

El contraste de emisividad de energía sísmica entre las dorsales Sur y Norte del Scotia, puede deberse fundamentalmente a la diferencia litológica y de edad de las cortezas constituyentes sobre las que se desarrollan los respectivos sistemas estructurales. Mientras que la Dorsal Norte del Scotia se desarrolla en corteza continental de edad predominantemente cretácica, la Dorsal Sur del Scotia lo hace en tramos que alternan entre corteza oceánica y corteza continental, de edades variables (Yamin y Anselmi 2020, Beniest y Schellart 2020) (Fig. 2). La presencia de contrastes reológicos implicaría respuestas disímiles ante la deformación que es ejercida por el campo de esfuerzo tectónico regional, con repercusión en el nivel de sismicidad. Asimismo, la Dorsal Sur del Scotia estuvo continuamente afectada por procesos geodinámicos complejos. Dicha situación puede observarse en el sector del bloque de las Islas Orcadas del Sur (tramo central de la Dorsal Sur del Scotia), el cual experimentó hace ~ 18 millones de años la colisión oblicua de la dorsal Sudamericana-Antártica con el entonces margen de convergencia activo (actual Arco Jane) situado al sur de dicho bloque, dando como resultado la formación de una ventana astenosférica por debajo de la actual Dorsal Sur del Scotia (Vérard et al. 2012). De acuerdo con Zambrano et al. (2022a), la presencia de dicha ventana queda evidenciada en resultados recientes de tomografías sísmicas, por altos valores de anelasticidad y bajos valores de rigidez, similares a los observados en la región del Rift del Bransfield.

Otro aspecto de la constitución reológica con posible repercusión en la sismicidad, se observa en el cambio progresivo de edad que manifiesta el segmento de corteza oceánica de la placa Sudamericana a lo largo del margen de subducción de las Sandwich del Sur (Fig. 2). El cambio de edad se

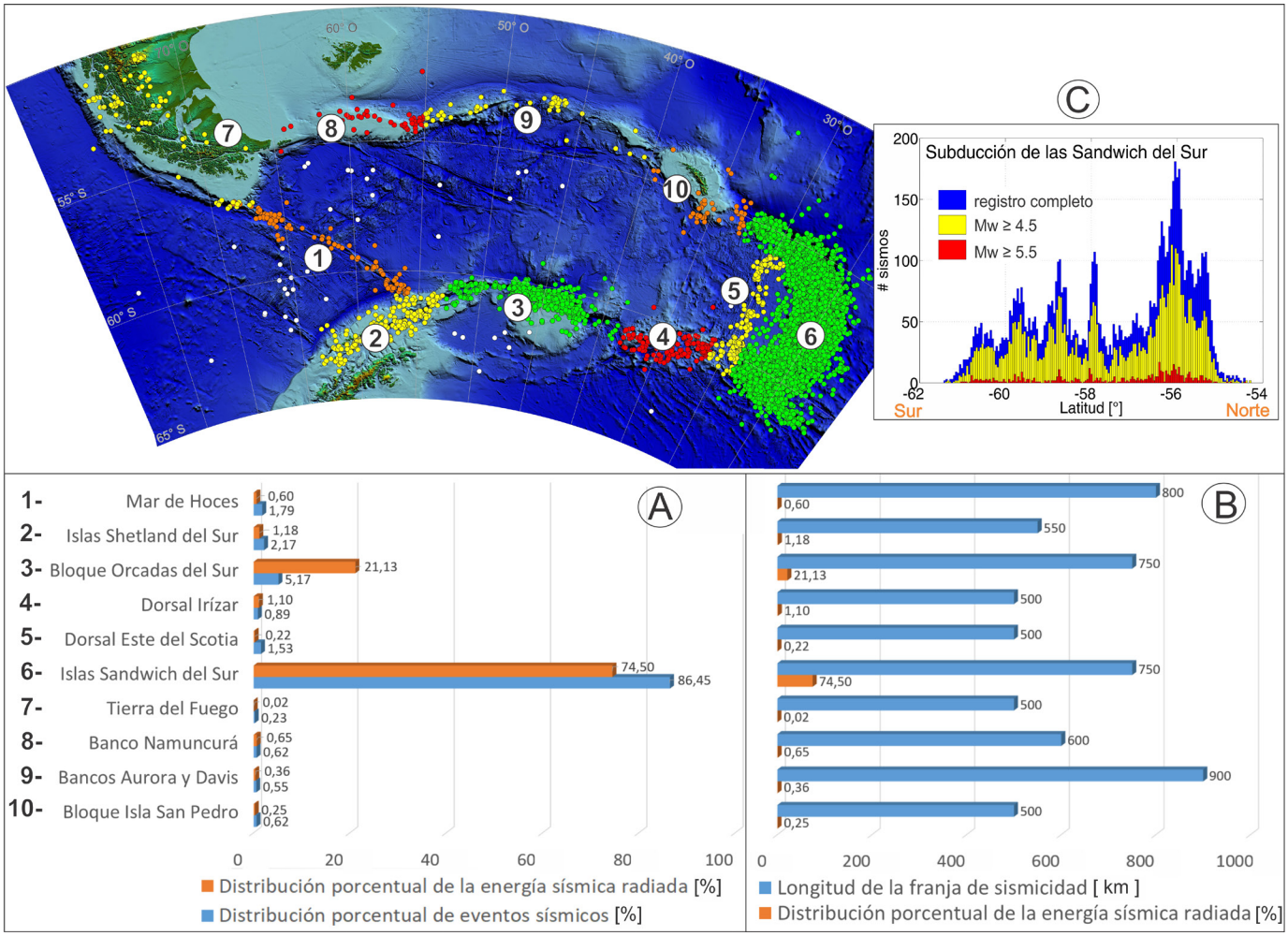

Figura 1. Mapa de la distribución espacial de la sismicidad discriminada por sector, correspondiente a la región del Arco de Scotia. Cada sector se caracteriza por un ambiente geotectónico y un estilo estructural que lo distingue de los restantes. A) Comparación entre la cantidad porcentual de eventos sísmicos y la cantidad porcentual de energía sísmica radiada, por sector, entre los años 1970 y 2023. B) Comparación entre la cantidad porcentual de eventos sísmicos y la longitud de la franja de sismicidad asociada, por sector. Nótese que el sector de las Islas Sandwich del Sur reúne el mayor número de eventos sísmicos y la mayor energía sísmica radiada de toda la región, con valores de ~86 % y ~74 %, respectivamente (Cuadro 1). En segundo lugar, le sigue el sector de las Islas Orcadas del Sur, con porcentajes de ~5 % y ~21 %, respectivamente. Los restantes sectores exhiben valores de sismicidad y de energía radiada significativamente menores: < 2.2 % y < 1.2 %, respectivamente. Obsérvese que las franjas de sismicidad asociadas a cada sector tienen longitudes (l_i) comparables entre sí, con una media y desvío estándar: $\bar{l} \pm \sigma_l$=635 km±150 km. Esto permite distinguir entre (i): un ámbito de intensa actividad sísmica representado por la subducción en la fosa de las Sandwich del Sur y la transcurrencia de las Islas Orcadas del Sur, de (ii): otro ámbito de moderada a baja actividad sísmica representado por el Rift del Bransfield, Dorsal Este del Scotia y restantes sectores de transcurrencia. C) Variación de la sismicidad en función de la latitud en el margen de subducción de las Sandwich del Sur.

produce desde una corteza oceánica más antigua (de edad cretácica superior) a la altura del punto triple norte (límite entre las placas Sudamericana, Scotia y Sandwich), a una corteza oceánica más joven (de edad miocena) a la altura del punto triple sur (límite entre las placas Sudamericana, Antártica y Sandwich) (Yamin y Anselmi 2020, Beniest y Schellart 2020) (Fig. 2). Es probable que la variación de edad de la corteza oceánica pudiera estar repercutiendo en los cambios de sismicidad que se observan en sentido latitudinal en la zona de Wadati-Benioff correspondiente. La sismicidad, disminuye desde el flanco norte, donde la corteza es más antigua y más rígida, al flanco sur, donde la corteza es más joven y menos rígida (Fig. 2).

Otro sector, estructuralmente complejo, corresponde a la Dorsal Irízar (extremo oriental de la Dorsal Sur del Scotia) (Fig. 2). Estuvo sometido a deformación por transtensión oblicua desde el Mioceno, a partir del proceso de escisión del antiguo arco de subducción por desgarre de la placa Sudamericana, causado por la colisión de la dorsal centro-oceánica del Weddell (Vérard et al. 2012). Corresponde por tanto a un ámbito extensional y de atenuamiento litosférico que fue conformándose desde entonces, por migración hacia el este de la parte activa del arco (actual arco de las Sandwich del Sur) respecto de la parte extinta del arco (actual arco Jane). Al igual que el segmento correspondiente al bloque de las Islas Orcadas del Sur, este ámbito establece contactos entre uni-

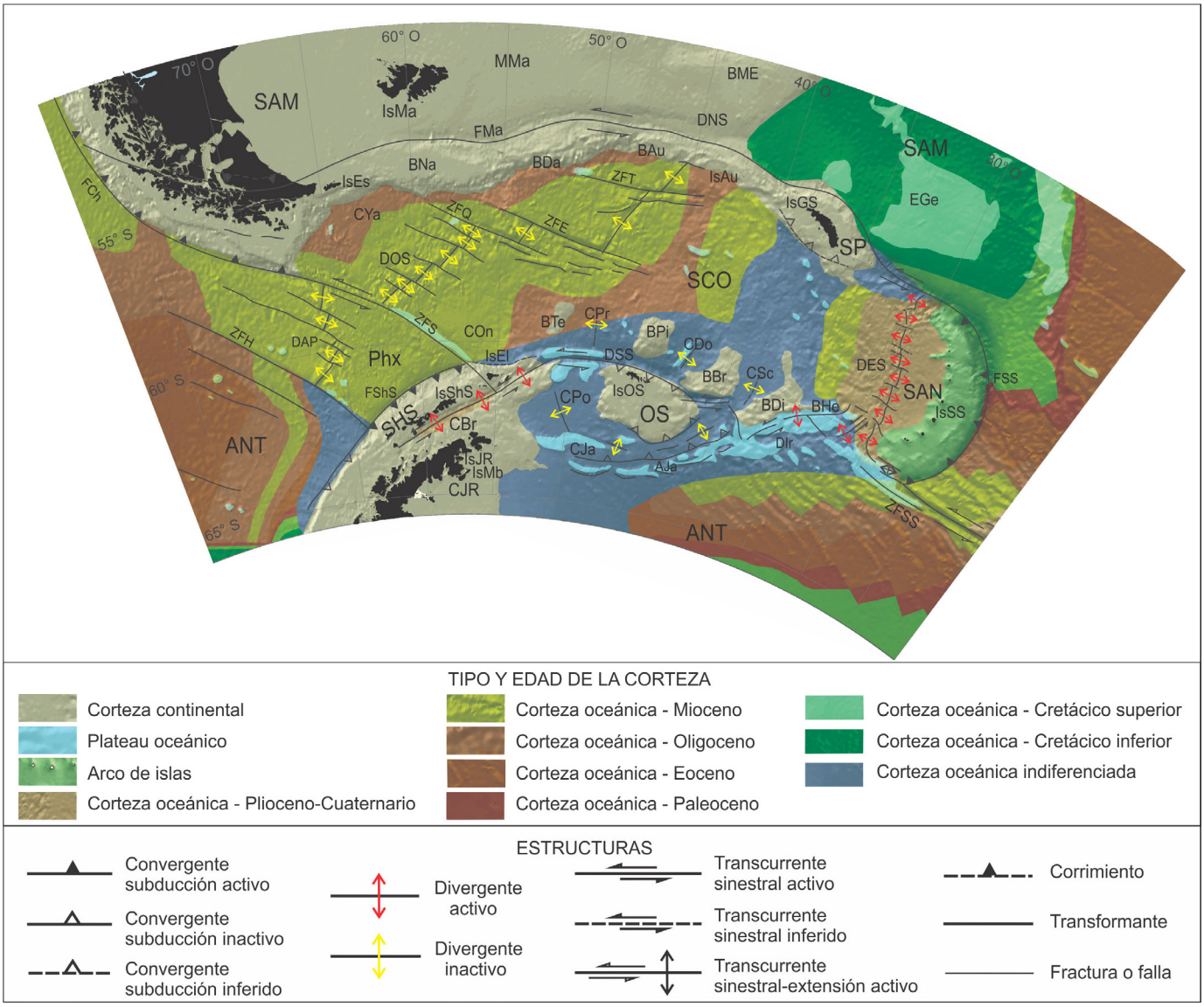

Figura 2. Principales lineamientos estructurales, regímenes tectónicos activos y fósiles, y tipo y edad de la corteza oceánica en la región del Arco de Scotia y el extremo norte de la Península Antártica. Obsérvese el arreglo simétrico en orden creciente de edad de la corteza oceánica en torno a antiguos centros de expansión de fondo oceánico (inactivos a partir del Plio-Pleistoceno), tales como las dorsales Oeste del Scotia y Antártica-Phoenix. Se advierten procesos de consumisión de corteza oceánica con subducción de antiguas dorsales oceánicas, ocurridos en los márgenes de convergencia actualmente inactivos, tales como la trinchera del margen Pacífico de la Península Antártica y el Arco Jane. Los únicos centros de generación de corteza Plio-Pleistocena, actualmente activos, son: i) la Dorsal Este del Scotia, a retroarco de la subducción de las Sandwich del Sur, y ii) el Rift del Bransfield, en el mar de la Flota. Se observa el resultado de lo que constituyó el desmembramiento de la corteza continental mesozoica que en su origen integró parte del margen suroccidental del continente Gondwana, actualmente representada por los bloques de las Islas Orcadas del Sur, Shetland del Sur, Isla San Pedro, Banco Namuncurá, plataforma de la Península Antártica, y en otros fragmentos menores distribuidos a lo largo de las dorsales Sur y Norte del Scotia. SAM: Placa Sudamericana; ANT: Placa Antártica; SCO: Placa Scotia; SAN: Placa Sandwich; Phx: Placa Phoenix; SHS: Bloque de las Islas Shetland del Sur; OS: Bloque de las Islas Orcadas del Sur; SP: Bloque de la Isla San Pedro; MMa: Meseta de Malvinas. IsEs: Isla de los Estados; IsMa: Islas Malvinas; IsAu: Islas Aurora; IsGS: Islas Georgias del Sur; IsSS: Islas Sandwich del Sur; IsOS: Islas Orcadas del Sur; IsEl: Isla Elefante; IsShS: Islas Shetland del Sur; IsJR: Isla James Ross; CJR: Cuenca James Ross; CBr: Cuenca Bransfield (en el Mar de la Flota); CPo: Cuenca Powell; CJa: Cuenca Jane; COn: Cuenca de los Ona; CPr: Cuenca Protector; CDo: Cuenca Dove; CSc: Cuenca Scan; CYa: Cuenca de los Yaganes; BNa: Banco Namuncurá; BDa: Banco Davis; BAu: Banco Aurora; BME: Banco Maurice Ewing; EGe: Elevación noreste de las Georgias; BHe: Banco Herdman; BDi: Banco Discovery; BBr: Banco Bruce; BPi: Banco Pirie; BTe: Banco Terror; FMa: Fosa de Malvinas; FCh: Fosa Chilena; FSS: Fosa de las Sandwich del Sur; FShS: Fosa de las Shetland del Sur; AJa: Arco Jane; DNS: Dorsal Norte del Scotia; DSS: Dorsal Sur del Scotia; DOS: Dorsal Oeste del Scotia; DES: Dorsal Este del Scotia; DAP: Dorsal Antártica-Phoenix; Dlr: Dorsal Irízar; ZFH: Zona de fractura Hero; ZFS: Zona de Fractura Shackleton; ZFSS: Zona de fractura Sandwich del Sur; ZFQ: Zona de fractura Quest; ZFE: Zona de fractura Endurance; ZFT: Zona de fractura Tehuelche. Extraído y modificado de Yamin y Anselmi (2020): También basado en Torres Carbonell et al. 2014, Caminos et al. 1999, Ramos 1999 y Zambrano et al. 2022a.

dades de corteza continental y unidades de corteza oceánica, de diferentes edades (Yamin y Anselmi 2020, Beniest y Schellart 2020) (Fig. 2). La combinación de dichas características, produce un nivel de sismicidad significativo, comparable al de

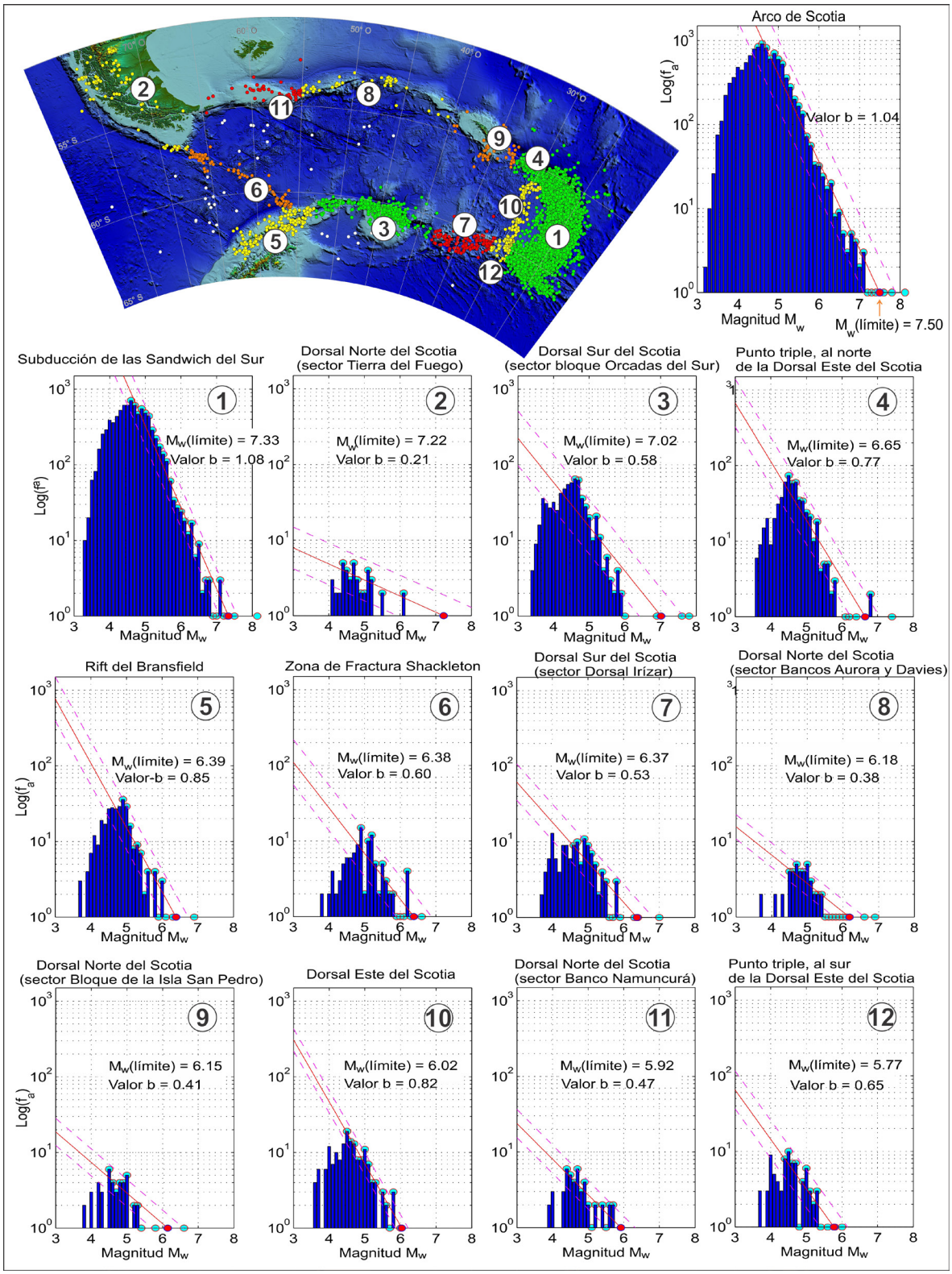

Figura 3. Relación frecuencia-magnitud para la región del Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica. Las rectas de regresión lineal se obtuvieron mediante cuadrados mínimos con un margen de incertidumbre de ~ 95 %. La magnitud máxima esperable correspondiente a la zona de subducción de las Sandwich de Sur (Mw = 7.33) (distribución (1)), es consistente con la esperable para un ámbito de consumisión de placa. A a su vez, es sustancialmente mayor a la que exhiben los restantes ámbitos tectónicos de la región, marcando una diferencia de una a dos magnitudes (distribuciones (3) a (12)). En el sector de la Isla Grande de Tierra del Fuego, la sismicidad se encuentra afectada en parte por el régimen de subducción de la placa Antártica por debajo del extremo suroccidental de Sudamérica (distribución (2)). Los epicentros identificados con círculos blancos representan sismicidad difusa de intraplaca localizada a lo largo de estructuras relícticas menores.

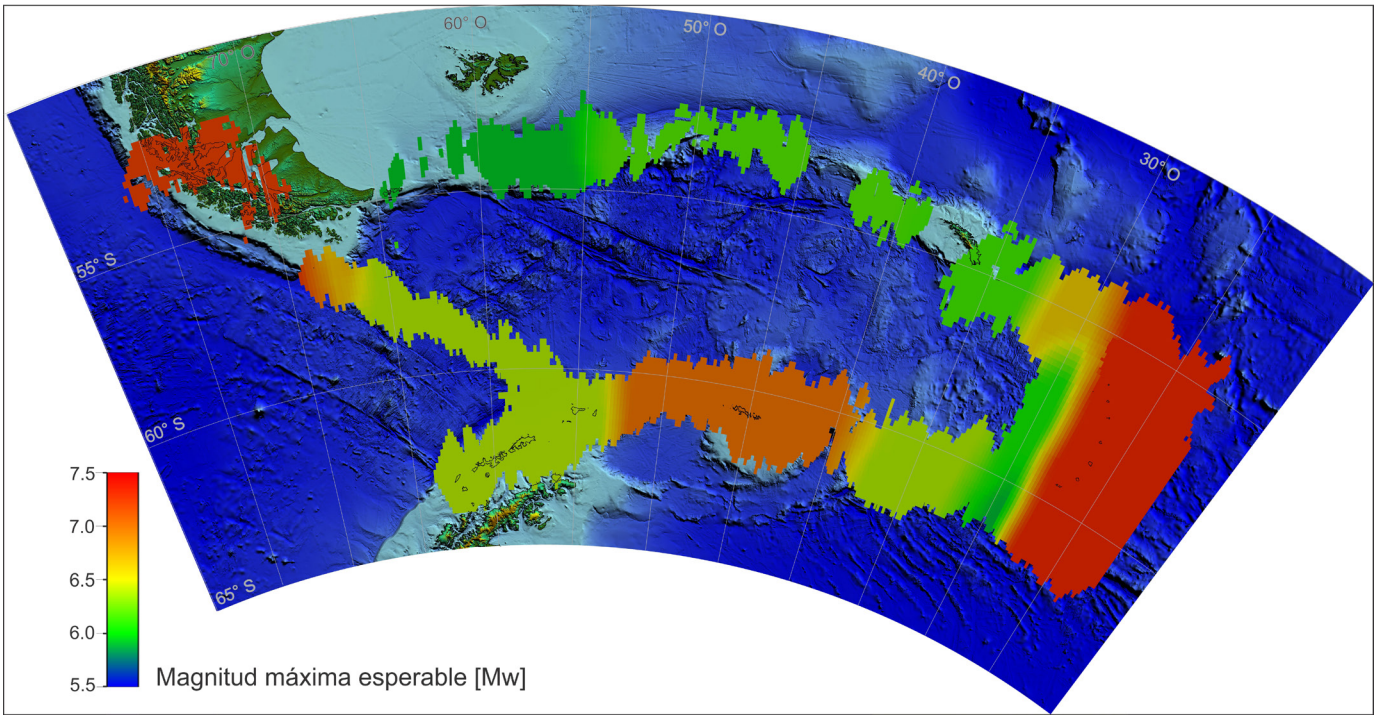

Figura 4. Mapa de distribución espacial de la magnitud máxima esperable a lo largo del Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica, obtenida a partir de la distribución frecuencia vs magnitud sísmica (Fig. 3). El pico de magnitud máxima esperable se da en el sector de las Islas Sandwich del Sur (Mw ~ 7.3), en consistencia con el régimen de subducción. A lo largo de la Dorsal Sur del Scotia, destaca en el tramo central (sector bloque de las Islas Orcadas del Sur) la anomalía positiva de magnitud máxima esperable Mw ~ 7.0, significativamente mayor a la de los restantes tramos de transcurrencia y divergencia (Mw ~ 5.7-6.4). La magnitud máxima esperable es mayor en la Dorsal Sur del Scotia que en la Dorsal Norte del Scotia, reflejando diferencias en los mecanismos de deformación que afectan a una y la otra dorsal. Otro máximo local de magnitud máxima esperable se produce en el sector de Tierra del Fuego (Mw ~ 7.2), determinado por el régimen de subducción en la trinchera chilena al oeste.

las Islas Shetland del Sur, con la diferencia de que la actividad sísmica acontece exclusivamente en un fondo oceánico al doble de profundidad (~ 3500 - 4000 m) que en el Mar de la Flota (Fig. 2).

En lo que respecta a la magnitud máxima esperable, su estimación fue abordada, por un lado, considerando la relación frecuencia-magnitud que describe al Arco de Scotia como una unidad estructural mayor integrada por unidades estructurales menores, y por otro lado, considerando las relaciones frecuencia-magnitud que describe a cada una de las unidades menores.

Los resultados indican que:

La magnitud máxima esperable correspondiente al Arco de Scotia, visto como una unidad coherente, es $M_{w(lím)}$ =7.50±0.5 (Fig. 3). Este resultado se encuentra en consistencia con los eventos históricos de mayor magnitud registrados en dicha región (M_w=7.4, M_w=7.6, M_w=7.8, M_w=8.1 y M_{PAS}=8.3).

Por su parte, la magnitud máxima esperable restringida en la zona de subducción de las Sandwich del Sur resulta ligeramente menor ($M_{w(lím)}$ ≅7.33±0.3) que la considerada para todo el Arco de Scotia, lo cual sugiere que parte de la actividad sísmica de alta emisión de energía debiera estar ocurriendo más allá del complejo de subducción propiamente dicho. Esto se observa en el tramo de transcurrencia de la Dorsal Sur del Scotia, a la altura del bloque de las Islas Orcadas del Sur, donde la magnitud máxima esperable es $M_{w(lím)}$ ≅7.0±0.6, en consistencia con los eventos sísmicos de alta magnitud registrados en dicho tramo: M_w=7.6 y M_w=7.8 (Figs. 3 y 4).

Se observa que para la Dorsal Sur del Scotia la magnitud máxima esperable promediada entre los distintos tramos que la conforman es $M_{w(máx)}$ =6.7, mientras que para la Dorsal Norte del Scotia resulta: i) $M_{w(máx)}$=6.4, si se incluye el tramo de Tierra del Fuego y ii) $M_{w(máx)}$ =6.1, si se excluye el tramo de Tierra del Fuego (Figs. 3 y 4). Esto determina una diferencia de alrededor de media magnitud entre ambas dorsales. Asimismo, se observa que a lo largo de cada dorsal, los distintos tramos que la integran están caracterizados por valores-*b* similares entre sí: i) *b*~0.55 para la Dorsal Sur del Scotia y b ~ 0.42 para la Dorsal Norte del Scotia. Esto sucede independientemente del tamaño de las poblaciones de sismos y de su distribución areal (Fig. 3), lo cual podría estar implicando la presencia de un mecanismo de deformación accionando uniformemente a lo largo de cada dorsal. En contraste, la diferencia de valor-b entre una y otra dorsal sugiere diferencias en sus mecanismos de deformación (Figs. 3).

Con excepción del tramo extensional correspondiente a la

Dorsal Este del Scotia, y del tramo de transcurrencia transpresiva correspondiente al Banco Namuncurá y Plataforma Fueguina, se observa que los restantes ámbitos de la región del Arco deScotia han experimentado sismos cuyas magnitudes ocupan la mitad superior de la banda de incertidumbre $M_w \pm 2\sigma_{Mw}$ en la proyección fractal de la magnitud máxima esperable, durante el período de tiempo que abarca los años 1970 a 2023 (Fig. 3). Incluso en algunos casos la magnitud máxima observable superó en algunas décimas de magnitud dicha banda (Fig. 3). Esto sugiere que en años venideros podrían estar sobreviniendo (en términos de la magnitud máxima esperable) sismos de magnitud mayor a 6 en el sector Banco Namuncurá y Dorsal Este del Scotia, y sismos de magnitud mayor a 7 en el sector de la Plataforma Fueguina (Figs. 3 y 4).

Características de la sismicidad y eventos sísmicos destacables

Uno de los eventos sismotectónicos más destacables producidos en la región del Arco de Scotia, en parte por la considerable energía liberada y en parte por ser el desencadenante de un probable evento tsunami, fue el denominado Sismo Centenario, del 4 de agosto de 2003 (M_w= 7.6) (Febrer y Zakrajsek 2005, Linares Plasencia 2008, Russi et al. 2010) (sección Marco geodinámico de la región de estudio: Eventos tsunamigénicos).

Una década más tarde, el 16 y 17 de noviembre de 2013, superpuesto parcialmente a la zona de ruptura del evento Centenario, dio inicio un nuevo nucleamiento sísmico cuya actividad de alta energía se extendió durante aproximadamente dos semanas. El evento estuvo liderado por dos sismos principales de magnitud M_w= 6.9 (16/11/2013) y M_w= 7.8 (Ye et al. 2014), y alrededor de medio centenar de réplicas cuyas magnidudes M_w estuvieron comprendidas entre 4.5 y 5.5. Las réplicas se originaron en la franja de transcurrencia de la Dorsal Sur del Scotia situada frente a Bahía Uruguay, unos 20 km al norte de la base Orcadas. Al igual que en el evento Centenario, los temblores en la base fueron sentidos sincrónicamente con las primeras réplicas producidas y su correspondiente registración en los sismógrafos locales (Pinto, J.L. com. pers.). En cercanías de la base se observaron desprendimientos de hielo en los cerros Mossman y La Monja, situados en márgenes opuestos de la Bahía Uruguay. Durante el evento sísmico, una lengua de mar ingresó unos 120 metros por el extreno noreste del itsmo, entre el pie del Glaciar La Monja y su morena frontal, debiendo sortear para ello un resalto de playa de entre 0.5 y 1 m (Pinto, J.L. com. pers.).

Otros eventos que radiaron importantes cantidades de energía sísmica en la región del Arco de Scotia fueron: i) el sismo del 12/08/2021 (M_w= 8.1) ocurrido en la zona de subducción de las Sandwich del Sur (comentado en la sección *Marco geodinámico de la región de estudio*), ii) el sismo aislado del 02/01/2006 (M_w= 7.4) ocurrido en la zona de Fractura de las Sandwich del Sur (al este del punto triple determinado por las placas Scotia, Sandwich y Antártica), y iii) el cúmulo sísmico del 19/08/2016 (M_w= 7.4, sismo principal) focalizado en el extremo norte de la dorsal Este del Scotia (al oeste del punto triple determinado por las placas Scotia, Sandwich y Sudamericana) (Figs. 5 y 2).

Es destacable el evento sísmico del 12/08/2021 (M_w= 8.1) ocurrido en la región de las Sandwich del Sur, el cual radió poco más de un tercio de la energía sísmica radiada en el Arco de Scotia durante las últimas cinco décadas (años 1970 a 2023) (Fig. 5), en tanto que los sismos del 17/11/2013 (M_w= 7.8) y del 04/08/2003 (M_w= 7.6), ocurridos en el sector de las Islas Orcadas del Sur, radiaron conjuntamente la quinta parte del total (Figs. 5 y 2).

Sin embargo, el evento sísmico de mayor magnitud documentada a la fecha (año 2024) en la región del Arco de Scotia, fue el ocurrido el 27 de junio de 1929, 110 km al nor-noreste del punto triple determinado por las placas Sudamericana, Scotia y Sandwich (Okal y Hartnady 2009). Para dicho evento se determinó una magnitud Pasadena M_{PAS}= 8.3 (Gutenberg y Richter 1954) y un mecanismo focal normal de alto ángulo que fue interpretado como un desgarre de intraplaca producido en la placa Sudamericana (Okal y Hartnady 2009).

Se reconocen diferencias significativas cuando se comparan los nucleamientos sísmicos producidos en i) sector de las Islas Sandwich del Sur e Islas Orcadas del Sur, con los producidos en ii) sector de las Islas Shetland del Sur. En el primer caso los nucleamientos se presentan frecuentemente en forma de cúmulos, caracterizados por un sismo principal de elevada magnitud (en general M_w> 7) sucedido por un tren de réplicas en progresión decreciente de la magnitud cuya tendencia general sigue la ley de Omori (Omori 1984) (Fig. 5). En contraste, en el sector de las Islas Shetland del Sur, en el Mar de la Flota, los nucleamientos suelen presentarse en forma de enjambres, de magnitud baja a intermedia (M_w <~ 5.5 - 6), con ausencia de un sismo principal de elevada magnitud (Fig. 5). Un caso singular de esta región lo constituye el nucleamiento sísmico del 23/01/2021 (focalizado en las inmediaciones de la Isla Bridgeman, en el tramo nororiental del rift), el cual fue precedido por un sismo principal de magnitud considerable M_w= 7 (Fig. 5). Dicho evento pareciera estar vinculado dinámicamente con el enjambre sísmico de larga duración, iniciado cinco meses antes (29/08/2020) en el sector central del rift frente a la Isla 25 de Mayo, precisamente en las inmediaciones del volcán submarino Orca (ej.: Olivet el al. 2021, Cesca et al. 2021, entre otros) (Fig. 5).

Otra diferencia sustancial que se observa es la ocurrencia de nucleamientos sísmicos con liberación súbita de energía sísmica en la zona de convergencia de las Islas Sandwich del Sur y de transcurrencia compresional al norte de las Islas Orcadas del Sur (Fig. 5), mientras que en la zona de divergencia del Mar de la Flota la liberación de la energía sísmica de los nucleamientos se da en forma progresiva (Fig. 5). Las diferencias indicadas sugieren diferencias en los mecanismos intrínsecos que rigen la deformación sismotectónica de cada ambiente en particular. Cabe destacar que la región del Mar de la Flota se encuentra afectada por un flujo térmico anómalo proveniente del manto infrayacente, el cual puede conferir a las rocas corticales mayor anelasticidad y por lo tanto un comportamiento más dúctil ante la deformación ejercida por los esfuerzos tectónicos y la actividad magmática subyacente (ej.: Vuan et al. 2005, Park et al. 2012, Vuan et al. 2014, Biryol et al. 2018, Zambrano et al. 2022a, entre otros).

El análisis de la serie temporal de eventos sísmicos ocurridos entre los años 2000 y 2023, teniendo en cuenta los límites de error estadístico, indica que tanto la media anual como la mediana anual de la magnitud sísmica se mantuvieron esencialmente uniformes a lo largo de dicho período (Fig. 6). A pesar de ello, la frecuencia sísmica exhibió cambios significativos, con variaciones relativas de hasta un orden de magnitud en los años 2013, 2016 y 2021 (Fig. 6). Dichos años estuvieron caracterizados por la aparición de cúmulos sísmicos de gran productividad de sismos. Tales son los casos de los eventos ocurridos en las fechas: i) 04/08/2003, ii) 17/11/2013, iii) 28/05/2016 y 19/08/2016 y iv) 23/01/2021. Posteriormente a los mencionados eventos, la frecuencia anual prosiguió en descenso hasta la irrupción del evento consecutivo, a excepción del caso del sismo Centenario del 04/08/2003 (Febrer y Zakrajsek 2005, Russi et al. 2010) (Fig. 6).

El comportamiento uniforme que presentan la media y mediana anual de la magnitud con el paso del tiempo como indicadores de tendencia central de la actividad sísmica, estaría indicando que el Arco de Scotia evoluciona sísmicamente en forma equilibrada, al menos durante los últimos años, ante la ejecución del ciclo sísmico (Fig. 6). Esto implica que la estructura reacciona frente al campo de esfuerzos regional, absorbiendo y liberando regularmente la energía de deformación que surge de la interacción entre las placas tectónicas intervinientes, y de su interacción con la circulación del manto subyacente.

Zonas de deformación cortical

La actividad sísmica en el Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica está vinculada con la liberación tanto súbita como gradual de la energía de deformación que se concentra en los principales lineamientos estructurales que afectan la litosfera terrestre de la región, producto de la dinámica de las placas tectónicas. Se observa una mayor concentración de la sismicidad donde se intersectan las principales estructuras tectónicas, pero también en los márgenes de algunos bloques continentales donde éstos hacen contacto con dichas estructuras (Figs. 5 y 2) (Zambrano et al. 2022b). Dependiendo de la orientación del campo de esfuerzos regional, dichas concentraciones suelen representar zonas críticas de acumulación de deformación cortical y de energía potencial sísmica durante la fase previa al evento sísmico. Los sismos producidos en aquellas estructuras o contrastes reológicos caracterizados por bajos umbrales de resistencia a la deformación frágil-dúctil, resultarán en promedio de magnitud moderada o intermedia (Mw~5). A nivel del espesor elástico litosférico, corresponden a zonas de baja emisión de energía sísmica radiada. En cambio, aquellas estructuras o contrastes reológicos caracterizados por un alto umbral de resistencia frágil-dúctil, pueden eventualmente generar sismos de gran magnitud debido a la mayor capacidad de deformación elástica. A nivel del espesor elástico litosférico, corresponden a zonas de alta emisión de energía sísmica (Zambrano et al. 2022b).

Para poder reconocer ámbitos de potencial peligro sísmico en la región del Arco de Scotia, como primer paso podemos establecer una distinción entre zonas de alta emisividad de energía sísmica y zonas de baja emisividad de energía sísmica:

A)- Zonas de concentración de la deformación cortical caracterizadas por alta emisión de energía sísmica:

1)- Extremo norte de la Dorsal Este del Scotia, al oeste del punto triple determinado por las placas Scotia, Sandwich y Sudamericana (Figs. 5 y 2). Este sector está caracterizado por un régimen de deformación transcurrente sinestral (ej.: Yamin y Anselmi 2020, entre otros) y por la aparición del nucleamiento sísmico profuso del 19/08/2016 (Figs. 5 y 7). Cercano a este nucleamiento se produjo el sismo del 27/06/1929, M_{PAS}=8.3, el de mayor magnitud registrada en la región (Okal y Hartnady 2009).

2)- Extremo norte de la Dorsal Este del Scotia, al este del punto triple determinado por las placas Scotia, Sandwich y Sudamericana (Figs. 5 y 2). En este sector, los regímenes tectónicos se superponen y la deformación es particularmente compleja como resultado de la alineación de la trinchera de las Sandwich del Sur con la orientación este-oeste del sistema transcurrente de la Dorsal Norte del Scotia, y su intersección con el centro de expansión oceánica Dorsal Este del Scotia (ej.: Yamin y Anselmi 2020, entre otros) (Figs. 5 y 2). La

deformación abarca en profundidad desde el arco volcánico activo, sobre la placa Sandwich, hasta la zona de Wadati-Benioff de la placa Sudamericana subducida, inclusive. Representa el sector de mayor producción de sismos en la región del Arco de Scotia.

3)- Zona de Wadati-Benioff de la placa Sudamericana subducida (Figs. 5 y 2). En este ámbito, los estados de esfuerzos y los mecanismos de deformación son muy variados, dependiendo de la curvatura de la placa, del nivel de profundidad y de la interacción con la circulación local del manto. Regiones de anisotropía relíctica en el interior de la placa pueden favorecer la formación de estructuras de deformación, como por ejemplo fracturas de desgarre o ventanas astenosféricas (ej.: Müller et al. 2008, Vérard et al. 2012, Zambrano et al. 2022a, entre otros).

4)- Sector oriental de la fosa de las Sandwich del Sur, sobre la placa Sudamericana, caracterizado por mecanismos de desplazamiento de rumbo asociados a sistemas de fallas transformes paralelas a la dirección de convergencia (ej.: Yamin y Anselmi 2020, entre otros) (Figs. 5 y 2).

5)- Zona de Fractura Sandwich del Sur, caracterizado por un régimen de deformación transcurrente sinestral, límite transforme entre las placas Antártica y Sudamericana (ej.: Yamin y Anselmi 2020, entre otros) (Figs. 5 y 2). Este sistema produjo uno de los sismos aislados de mayor magnitud registrados en la región del Arco de Scotia (sismo del 02/01/2006, M_w=7.4).

6)- Dorsal Sur del Scotia, sobre el margen norte del bloque de las Islas Orcadas del Sur. Caracterizada por un régimen de deformación transcurrente sinestral con componente compresional (ej.: Smalley et al. 2007, Plasencia Linares 2008, Smalley et al. 2014, Ye et al. 2014, Yamin y Anselmi 2020, entre otros). Este sector pone en contacto corteza continental (al sur de la dorsal) con corteza oceánica generada en cuencas de pull apart (al norte de la dorsal) (Figs. 5 y 2).

7)- Dorsal Sur del Scotia, al norte de la cuenca Powell (Fig. 7). Caracterizada por un régimen de deformación transcurrente sinestral (ej.: Smalley et al. 2007, Plasencia Linares 2008, Smalley et al. 2014, entre otros). Este segmento pone en contacto unidades de corteza oceánica reciente (Plio-Pleistocena) generadas en regímenes de pull apart. Se caracteriza además por la presencia de plateau oceánicos (ej.: Yamin y Anselmi 2020, Beniest y Schellart 2020).

B)- Zonas de concentración de la deformación cortical caracterizadas por baja emisión de energía sísmica:

1)- Margen septentrional y extremo oriental del Banco Namuncurá, caracterizado por un régimen de deformación transcurrente sinestral con componente compresional y estructuras de fallamiento inverso oblicuo de profundidad somera (ej.: Pelayo y Wiens 1989, Yamin y Anselmi 2020, entre otros) (Figs. 5 y 2). Se desarrolla en corteza continental como la prolongación de la Cordillera de los Andes, donde la Isla de los Estados representa el primer tramo emergido.

2)- Sector septentrional del banco Aurora, caracterizado por un régimen de deformación transcurrente sinestral con componente compresional (ej.: Pelayo y Wiens 1989) (Figs. 5 y 2).

3)- Sector suroriental del bloque de la Isla San Pedro (Figs. 5 y 2), caracterizado por un régimen de deformación transpresional sinestral (ej.: Ramos 1996, Yamin y Anselmi 2020, entre otros), posiblemente relacionado con la actividad de deformación en la prolongación sureste de la zona de cizalla Cooper Bay (Ramos 1996, Yamin y Anselmi 2020, entre otros).

4)- Dorsal Este del Scotia, caracterizada por un régimen de deformación extensional divergente en corteza adelgazada, asociado al ascenso de manto astenosférico y la creación concomitante de corteza oceánica (ej.: Yamin y Anselmi 2020, entre otros) (Figs. 5 y 2).

5)- Dorsal Irízar. Caracterizada por un régimen de deformación transcurrente sinestral con componente extensional (ej.: Yamin y Anselmi 2020, entre otros). Desarrollo de crestas irregulares asociadas a la dorsal y de pequeños plateau oceánicos. El 20/08/2006 se produjo el cúmulo sísmico precedido por un sismo principal de magnitud M_w=7.0 (Figs. 5 y 2).

6)- Intersección entre la Zona de Fractura Shackleton y la Dorsal Sur del Scotia (sector islas Elefante y Clarence). Es un ámbito de deformación particularmente complejo debido a que allí convergen regímenes de deformación distintos: transcurrencia transtensiva de la Dorsal Sur del Scotia, transcurrencia transpresiva de la Zona de Fractura Shackleton, divergencia del Rift del Bransfield y subducción lenta de las Shetland del Sur. Está caracterizado fundamentalmente por sistemas de fallamiento inverso y de desplazamiento de rumbo (ej.: Pelayo y Wiens 1989, Klepeis y Lawver 1996) (Figs. 5 y 2).

7)- Rift del Bransfield (Figs. 5 y 2). Desarrollo de un rift extensional con componente de rumbo, entre la Península Antártica e las Islas Shetland del Sur (ej.: Ramos 1996, Yamin y Anselmi 2020, entre otros). Se encuentra actualmente activo con manifestación de actividad volcánica reciente y generación de corteza oceánica de edad Plio-Pleistocena. Las zonas de mayor sismicidad se concentran en las inmediaciones de las islas: Bridgeman (sector noreste), 25 de Mayo (sector central-noreste), Decepción (sector central-sureste) y Baja (sector sureste).

8)- Zona de Fractura Shackleton (Figs. 5 y 2). La deforma-

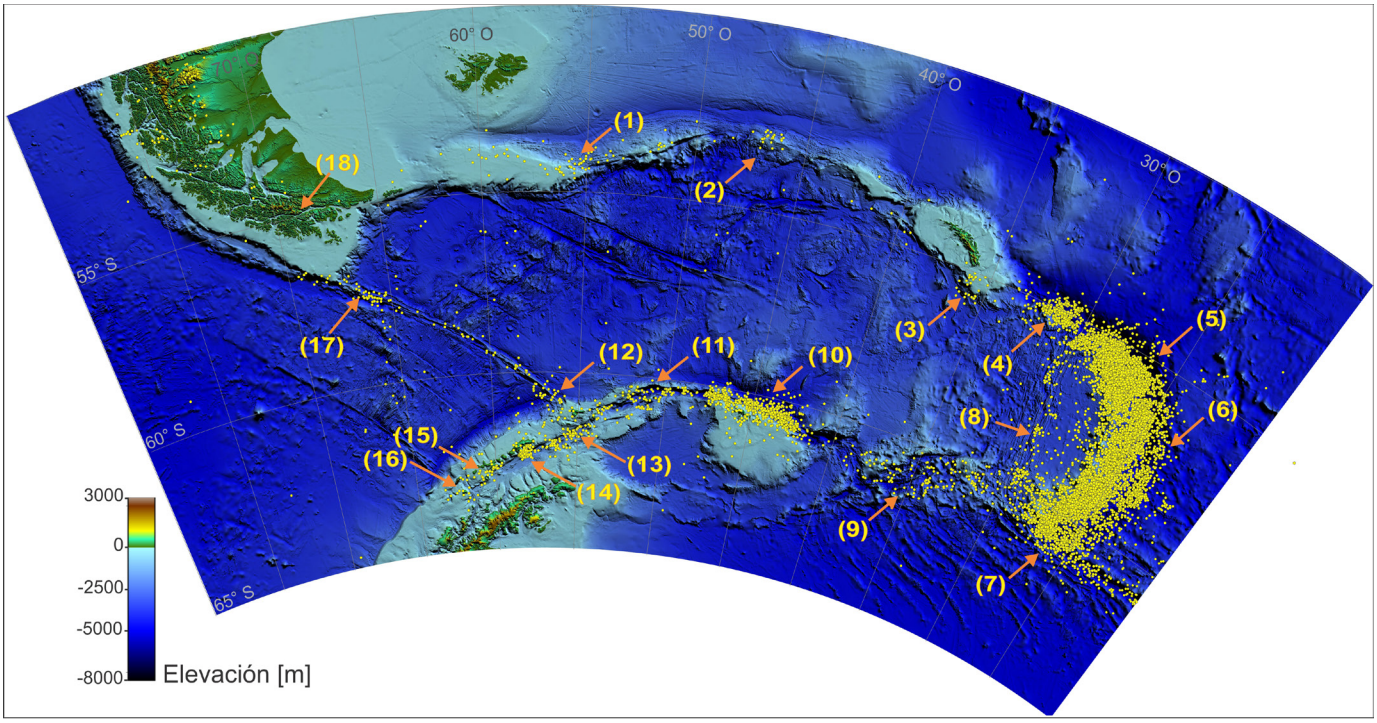

Figura 5. Manifestación de la actividad sísmica en la región del Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica. Obsérvese la concentración de los epicentros en torno a las estructuras regionales. Nótese asimismo la aparición de cúmulos focalizados en la intersección de las principales estructuras y en los márgenes de los bloques continentales (indicados por flechas). Estos últimos, representan focos de liberación episódica y abrupta de la energía sísmica acumulada durante la etapa de deformación presísmica. En el Mar de la Flota, los enjambres de sismos se encuentran asociados con la actividad tectónica y de centros de actividad volcánica distribuidos a lo largo del Rift del Bransfield. Zonas de deformación crítica: (1) Extremo nororiental del Banco Namuncurá; (2) Bancos Aurora y Davis; (3) Extremo suroriental del bloque de la Islas Georgias del Sur; (4) Extremo norte de la Dorsal Este del Scotia, al oeste del punto triple determinado por las placas Scotia, Sandwich y Sudamericana; (5) Extremo norte de la Dorsal Este del Scotia, al este del punto triple determinado por las placas Scotia, Sandwich y Sudamericana; (6) Zona de subducción de las Sandwich del Sur; (7) Zona de Fractura Sandwich del Sur, al este del punto triple determinado por las placas Sandwich, Sudamericana y Antártica; (8) Dorsal Este del Scotia; (9) Dorsal Irízar; (10) Dorsal Sur del Scotia, al norte del bloque de las Islas Orcadas del Sur; (11) Dorsal Sur del Scotia, al norte de la cuenca Powell; (12) Intersección entre Dorsal Sur del Scotia y Zona de Fractura Shackleton (sector islas Elefante y Clarence); (13) Rift del Bransfield (sector Isla Bridgeman); (14) Rift del Bransfield (sector Isla 25 de Mayo); (15) Rift del Bransfield (sector Isla Decepción); (16) Rift del Bransfield (sector Isla Baja); (17) Intersección entre Zona de Fractura Shackleton y dorsal Antártica-Phoenix (fósil); (18) Zona de Fractura Magallanes-Fagnano.

ción en esta región resulta de un sistema de fallas con desplazamiento lateral izquierdo, con componente transpresivo debido a la convergencia oblicua entre las placas Antártica y Scotia, generando crestas submarinas con componente de desplazamiento relativo vertical entre las placas Antártica y Scotia (Yamin y Anselmi 2020, entre otros). La sismicidad se intensifica en el contacto con la dorsal fósil Antártica-Phoenix y en el sector de la Isla Elefante.

9)- Zona de Fractura Magallanes-Fagnano (Figs. 5 y 2). Este sistema de fallas transformes representa la prolongación continental de la Dorsal Norte del Scotia, en Isla Grande de Tierra del Fuego. Es una zona de intensa deformación y de acortamiento cortical, donde la sismicidad se encuentra en parte influenciada por el proceso de subducción de la placa Antártica por debajo del margen suroccidental de Sudamérica (ej.: Buffoni et al. 2009, Torres Carbonell et al. 2014, Buffoni 2016).

Zonas marinas de potencial tsunamigénico

Una de las razones que convierten a los grandes tsunamis en eventos amenazantes para las comunidades humanas y ecosistemas que habitan las franjas costeras de baja pendiente, es su potencial para desarrollar grandes amplitudes de onda e inercia mecánica en exceso para sobrepasar la línea de costa pocos kilómetros tierra adentro e impactar destructivamente ante los obstáculos interceptados, (ej.: Titov et al. 2005, IOC-UNESCO 2019, entre otros).

Como se indicó en la sección *Eventos tsunamigénicos*, en lo que va del siglo XXI pudo observarse y medirse en el entorno antártico un tsunami de origen tectónico causado por el sismo del 12/08/2021 en la región de las Islas Sandwich del Sur. Éste representa hasta la fecha (2024) el único registro de un tsunami originado en el ámbito circumpolar antártico que haya alcanzado repercusión global en el planeta, no obstante, sin daños observados.

Para establecer zonas marinas de potencial tsunamigénico, debemos tener en cuenta un conjunto de condiciones o factores que favorecen la formación de un tsunami y que

Figura 6. Serie temporal de los eventos sísmicos de magnitud Mw ≥ 4.5 ocurridos en la región del Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica, entre los años 2000 y 2023. El filtro aplicado a la magnitud sísmica (Mw ≥ 4.5) fue determinado en base a la frecuencia de corte que exhibe la distribución frecuencia-magnitud para dicha región (Fig.3). A) Magnitud sísmica por evento, en función del tiempo. B) Magnitud media anual y barra de error de la desviación estándar correspondiente. C) Magnitud mediana anual y barra de error de la desviación estándar correspondiente. D) Frecuencia sísmica anual o cantidad de eventos sísmicos por año.

deben caracterizar al ámbito submarino terrestre en las inmediaciones del epicentro del sismo. Estos comprenden:

i)- Zonas de concentración de la deformación cortical: Se localizan predominantemente en los márgenes de las placas litosféricas. Se encuentran caracterizadas por altas tasas de deformación: un orden de magnitud superior a las tasas de deformación que se registran en las regiones centrales de una placa. La deformación puede intensificarse y resultar especialmente compleja donde los límites de placas convergen, como el caso de los puntos triples. Pueden o no corresponder a zonas de alta emisión de energía sísmica, dependiendo de las particularidades del campo de esfuerzos regional, de las características reológicas y condiciones termodinámicas de la litosfera y manto subyacentes. Para el área de estudio, estas zonas fueron descriptas en la sección *Zonas de deformación cortical*. Debido a que la ocurrencia de sismos en el margen activo de una placa es más frecuente que en otros sectores de la placa, los márgenes de placas tienen mayor probabilidad de generar tsunamis.

ii)- Zonas de alta magnitud máxima esperable: La magnitud máxima esperable es una propiedad estadística de un sistema sísmico que evoluciona en el tiempo, y denota la capacidad que posee dicho sistema para producir sismicidad de alta energía. Para el área de estudio, estas zonas fueron descriptas en la sección *Energía sísmica radiada, magnitud máxima esperable y reología*. Debido a que zonas con mayor magnitud máxima esperable poseen capacidad para producir sismos de mayor magnitud, también será mayor la probabilidad de que allí se produzcan tsunamis de mayor magnitud.

iii)- Zonas de alto contraste reológico: Corresponden a aquellos sectores de la litosfera en que las condiciones físico-químicas del medio experimentan variaciones significativas,

debido a cambios litológicos, estructurales e incluso de edad de las rocas. Pueden afectar en forma significativa la respuesta a la deformación del material sometido a determinado campo de esfuerzos. A escala litosférica, pueden corresponder a zonas de contacto entre placas, franjas de sutura, amalgamamiento de terrenos, cambios de facies metamórficas, presencia de complejos volcánicos, e incluso a zonas de fusión parcial. En general constituyen zonas de debilidad estructural y de alta tasa de deformación, favoreciendo la concentración de la sismicidad. Dependiendo del contexto geodinámico en el que se hallen inmersos, los contrastes reológicos pueden favorecer la generación de sismos de elevada magnitud, por ejemplo, en la formación de fallamientos en modo de desgarre o de apertura en losas oceánicas próximas a trincheras en regímenes de subducción. Estos tipos de rupturas pueden eventualmente producir tsunamis de origen tectónico de proporciones significativas.

iv)- Zonas de alta pendiente del lecho marino: Los ambientes oceánicos donde se desarrollan las mayores pendientes batimétricas, como las fosas, taludes y cañones submarinos, debido a su mayor inestabilidad, son propensos a generar deslizamientos, entre otros tipos de remociones en masa. Dependiendo de la magnitud de la remoción, pueden generarse ondas gravitacionales en la columna de agua sobreyacente, denominadas tsunamis por deslizamiento de suelos (Levin y Nosov 2016). Los deslizamientos submarinos pueden proveer energía adicional a los tsunamis de origen tectónico producidos durante eventos sísmicos. Los estudios indican que algunos de los tsunamis históricos cuyas olas afectaron ciudades enteras, se originaron dentro de un área de desarrollo de grandes cañones submarinos enfrentados a las respectivas costas. Tal fue el caso del tsunami de Lisboa de 1775 (ej.: Levin y Nosov 2016, IOC-UNESCO 2019).

v)- Zonas volcánicas activas: Las observaciones indican que los colapsos de calderas de islas oceánicas, las erupciones volcánicas explosivas submarinas y el ingreso de flujos piroclásticos al mar, pueden generar tsunamis capaces de equiparar localmente las fuerzas destructivas que pueden acarrear los tsunamis de origen tectónico (Levin y Nosov 2016). Del mismo modo, los tsunamis volcánicos pueden resultar particularmente peligrosos cuando se producen en cercanías de estrechos marinos, fiordos, y bahías cerradas.

De este modo, podemos definir (establecer) las zonas de mayor potencial tsunamigénico como aquellas que reúnen el mayor número de condiciones favorables (de las enumeradas más arriba) para la generación de un tsunami. Para la región de estudio, las mismas se representan en la Fig. 7, y se describen a continuación:

1)- La zona de subducción de las Sandwich del Sur (sector oriental del Mar del Scotia) es la que reúne la totalidad de las condiciones favorables: alta concentración de la deformación, alta magnitud máxima esperable, alto contraste reológico, alta pendiente del lecho marino y volcanismo activo. En concordancia, el tsunami del 12/08/2021, el de mayor magnitud registrado en Antártida, tuvo origen dentro de este sector (Fig. 7).

2)- El punto triple al norte de la Dorsal Este del Scotia (sector nororiental del Mar del Scotia) está caracterizado por una alta deformación y marcado contraste reológico, asociado a la dinámica de subducción en el sector de las Islas Sandwich del Sur, y representa, después del sector del bloque de las Islas Orcadas del Sur, el de mayor magnitud máxima esperable, como lo evidencia el cúmulo sísmico profuso de elevada magnitud producido en el año 2016. Adicionalmente, próximo a dicho nucleamiento ocurrió el evento sísmico de mayor magnitud registrado en el ámbito subantártico (evento del 27/06/1929, M_{PAS}= 8.3) (Fig. 7).

3)- Por otro lado, aunque carente de volcanismo, el tramo central de la Dorsal Sur del Scotia (sector centro-sur del Mar del Scotia), se encuentra caracterizado por un alto potencial tsunamigénico, principalmente por la elevada magnitud máxima esperable en relación a los restantes segmentos de transcurrencia del Arco de Scotia, con producción de sismos de elevada magnitud en consistencia con la predicción estadística de la distribución frecuencia-magnitud correspondiente a dicho sector. Un rasgo destacable de este ámbito, es la presencia de pendientes pronunciadas del lecho marino y el desarrollo de prismas acrecionales en el flanco norte del bloque de las Islas Orcadas del Sur (Civile et al. 2012), hecho que puede favorecer la formación de tsunamis por deslizamientos (Fig. 7).

4)- El Mar de la Flota (entre Península Antártica e Islas Shetland del Sur), región tectónicamente activa y de volcanismo reciente caracterizada por una magnitud máxima esperable moderada, tiene la particularidad de desarrollar en su ámbito submarino la alternancia de i) sectores de plataforma continental somera con ii) profundas y angostas gargantas y cañones submarinos, orientados perpendicularmente al eje extensional del rift central, y iii) desarrollo de lóbulos sedimentarios y neotectónica de deslizamientos, lo cual le confiere potencial para desarrollar tsunamis por deslizamiento por causa de sismos tectónicos o de actividad volcánica submarina. Adicionalmente, de todos los ámbitos del Arco de Scotia, es el de menor profundidad oceánica, lo cual puede conferirle a un tsunami originado localmente una mayor energía y amplitud característica (Fig. 7).

5)- Otro ámbito particularmente favorable para la formación de tsunamis es el extremo sur de la Plataforma Fueguina (sector septentrional del Mar del Hoces y de la Zona de

Fractura Shackleton), donde existe una transición de regímenes tectónicos y la intersección de lineamientos estructurales tanto activos como relícticos. Se caracteriza por una elevada magnitud máxima esperable, una plataforma somera con elevadas pendientes de talud y el desarrollo de cañones submarinos, condiciones que pueden aumentar la amenaza de un tsunami originado *in situ* (Fig. 7).

6)- La intersección entre la Dorsal Sur del Scotia y la Zona de Fractura Shackleton (margen suroccidental del Mar del Scotia) representa un ámbito de deformación particularmente complejo y sísmicamente activo, donde convergen sistemas tectónicos con regímenes de deformación disímiles: transcurrencia transtensiva, transcurrencia transpresiva y divergencia (Fig. 7).

7)- La Dorsal Irízar (sector suroriental del Mar del Scotia) está caracterizada por un relieve submarino muy accidentado de pendientes pronunciadas y de contrastes reológicos. Es de destacar que la energía sísmica radiada por la deformación transtensional de la Dorsal Irízar es similar a la radiada por el Rift del Bransfield en el Mar de la Flota, con la diferencia que la Dorsal Irízar está a mayor profundidad e inmersa en un ambiente netamente marino, mientras que el *Rift* del Bransfield encuentra en sus hombreras a la plataforma de la Península Antártica por un lado, y a la plataforma de las Islas Shetland del Sur por el otro (Fig. 7). Dichas condiciones pueden atenuar la amenaza que representarí un tsunami originado localmente en avance hacia las costas cercanas.

8)- Otros sectores carentes de actividad volcánica, pero que pueden resultar favorables para la producción de tsunamis de origen tectónico, son el flanco suroriental del bloque de la Isla San Pedro y el flanco oriental del Banco Namuncurá (sector septentrional del Mar del Scotia). Se encuentran sometidos a un régimen de deformación transpresional con desarrollo de estructuras de fallamiento inverso en los márgenes de sus respectivas plataformas, que, sumado a las elevadas pendientes de talud y la escasa profundidad de las plataformas, pueden aumentar la amenaza de un tsunami originado *in situ* en avance hacia las costas cercanas. (Fig. 7).

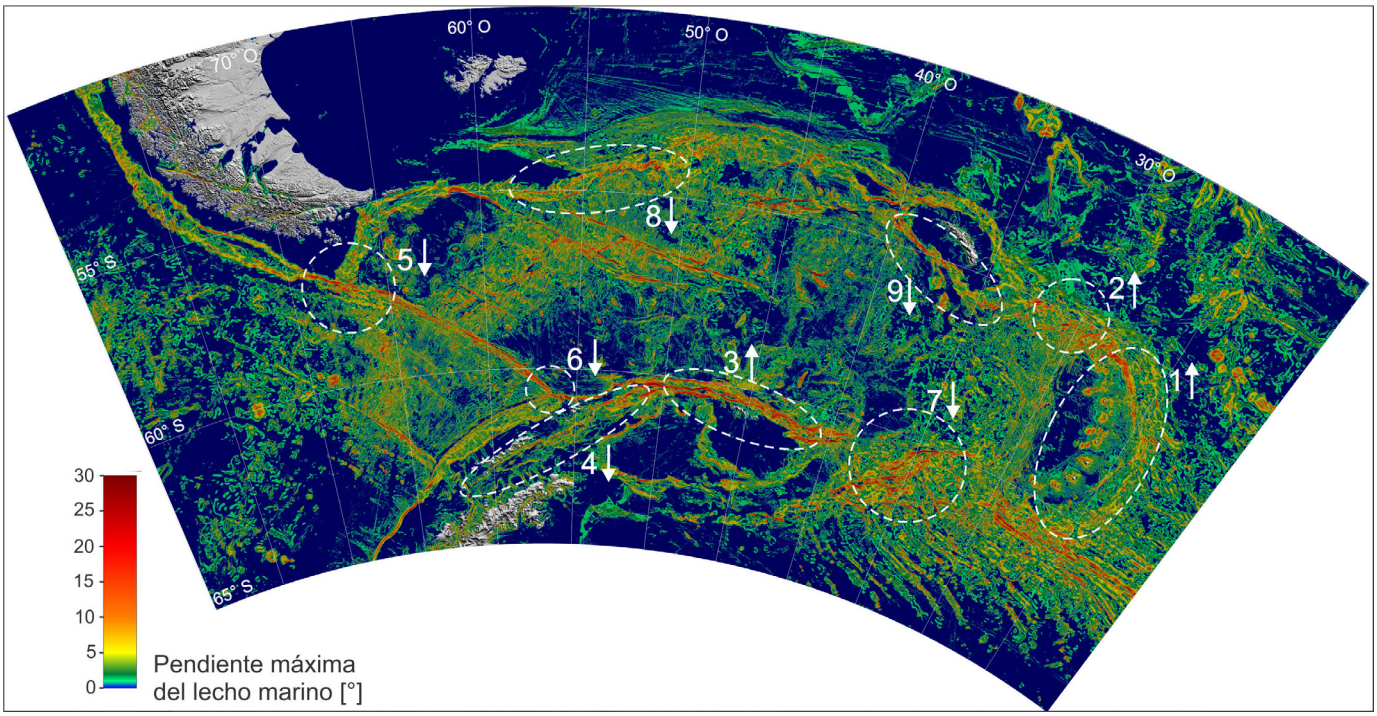

Figura 7. Zonas marinas de mayor potencial tsunamigénico en la región circumpolar antártica del Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica. Las zonas se encuentran distribuidas en los márgenes de las placas tectónicas, donde se producen las mayores tasas de deformacióncortical, concentración de la sismicidad y mayor energía sísmica radiada. Se encuentran caracterizadas por el desarrollo de altas pendientes del lecho marino, y en general exhiben marcados contrastes reológicos y de edad de las unidades geológicas constituyentes. El margen de subducción de las Sandwich del Sur y el Rift del Bransfield se encuentran afectados por volcanismo activo. Las flechas indican: i) apuntando hacia arriba: alta emisión de energía sísmica, ii) apuntando hacia abajo: baja emisión de energía sísmica. (1) Zona de subducción de las Sandwich del Sur (sector oriental del Mar del Scotia); (2) Punto triple al norte de la Dorsal Este del Scotia (sector nororiental del Mar del Scotia); (3) Dorsal Sur del Scotia (sector centro-sur del Mar del Scotia); (4) Mar de la Flota (entre Península Antártica e Islas Shetland del Sur); (5) Plataforma Fueguina (sector septentrional del Mar del Hoces y de la Zona de Fractura Shackleton); (6) Intersección Dorsal Sur del Scotia - Zona de Fractura Shackleton (sector suroccidental del Mar del Scotia); (7) Dorsal Irízar (sector suroriental del Mar del Scotia); (8) Extremo oriental del Banco Namuncurá (sector noroccidental del Mar del Scotia); (9) Extremo suroriental del bloque de la Isla San Pedro (sector nororiental del Mar del Scotia).

Caracterización de tsunamis antárticos

Una vez identificadas las áreas marinas de mayor potencial tsunamigénico en la región del Arco de Scotia y Península Antártica, para poder evaluar el impacto que un tsunami puede implicar en áreas marinas cercanas a las costas y en localidades costeras próximas al foco emisor, es necesario estimar cuantitativamente indicadores dinámicos que caractericen la evolución temporal y espacial de dicho fenómeno, como son: 1- tiempo de viaje de la perturbación, 2-amplitud, 3- velocidad de propagación y 4- densidad de energía transportada.

Para ello se aplicó un modelo hidrodinámico de perturbación gravitacional considerando las condiciones de contorno propias del entorno de propagación correspondiente a la región de estudio. (sección *Simulación numérica de tsunamis*).

Se realizaron cuatro casos de simulación numérica de propagación de un tsunami, a escala regional del área de estudio, con origen en las siguientes zonas tsunamigénicas: 1- margen de subducción de las Sandwich del Sur, 2- Dorsal Sur del Scotia, al norte del bloque de las Islas Orcadas del Sur, 3- extremo norte de la Zona de Fractura Shackleton, y 4- extremo oriental del Banco Namuncurá.

Los resultados de las simulaciones indican que:

1)- Independientemente de la localización del foco emisor de un tsunami en el Arco de Scotia, el mismo evoluciona en el tiempo adquiriendo un patrón de encauzamiento de orientación este-oeste, localizado entre la Dorsal Sur del Scotia y la Dorsal Norte del Scotia. Una vez traspasado el Mar de Hoces, el flujo dirigido se expande a expensas de una disminución en la densidad de energía transportada (Figs. 8, 9, 10 y 11). Esta particularidad hidrodinámica que caracteriza la región meridional del Océano Atlántico comprendida entre Sudamérica y Antártida, es debida a la presencia de dos accidentes topográficos de primer orden en el relieve del fondo marino que tienden a reorientar el flujo que se desplaza como onda gravitacional a medida que ésta va interaccionando con dichos accidentes. Éstos comprenden: i) la cuenca oceánica biextendida orientada en sentido este-oeste que alberga al Mar del Scotia, con una profundidad estadística de 3300 m ±1200 m, y ii) los flancos sur y norte de dicha cuenca, integrados por la Dorsal Norte del Scotia (borde de la Plataforma Continental Argentina, y su prolongación oriental que incluye a los bancos Namuncurá, Aurora y Davis, y al bloque de la Isla San Pedro), y la Dorsal Sur del Scotia (extremo norte de la plataforma de la Península Antártica y su prolongación oriental que comprende al bloque de las Islas Orcadas del Sur).

2)- En relación al resultado precedente, de acuerdo a las observaciones de tsunamis globales, más las predicciones provistas por los modelos teóricos, las dorsales de centro oceánico juegan un rol fundamental como guía de ondas y de canalización de la energía de un tsunami (ej.: Levin y Nosov 2016). Para el tsunami del 26/12/2004 se observó un aumento del flujo de energía cuando éste se desplazó entre los continentes Australia y Antártida, África y Antártida, y Sudamérica y Antártida (ej.: Kowalik et al. 2007). Simulaciones numéricas de la propagación de tsunamis revelan la fuerte influencia de las dorsales Atlántica, suroccidental del Índico y Agulhas, en la focalización y conducción de la onda tsunami, produciendo refuerzos de su amplitud en ciertos tramos de la costa africana (Okal y Hartnady 2009). Del mismo modo observamos en nuestro modelo cómo la presencia de las dorsales Sur y Norte del Scotia tienden a reorganizar el flujo hidrodinámico encauzándolo entre dichas dorsales (Figs. 8, 9, 10 y 11). Debido a que éstas constituyen rasgos submarinos de menor profundidad que la cuenca oceánica mediante, actúan como retardador cinemático de la onda gravitacional que se desplaza en mar abierto, generando en la superficie del océano sectores de menor velocidad que reflejan aproximadamente la forma y posición de dichos accidentes. Por otra parte, la porción de tsunami contenida ente ambas dorsales se adelanta respecto de los márgenes. En términos de valor absoluto, la velocidad de propagación de un tsunami en el Mar del Scotia es de alrededor de 200±50 m/s, mientras que sobre las dorsales Sur y Norte del Scotia se reduce a valores comprendidos entre 50 m/s y 100 m/s, aunque pueden existir tramos de velocidad inferior a los 50 m/s (Figs. 8, 9, 10 y 11).

3)- Se observa la formación de un segundo patrón de encauzamiento comprendido entre la costa Atlántica del extremo sur de Sudamérica y las costas de las Islas Malvinas, caracterizado por un retardo significativo de la onda gravitacional, y por lo tanto de los tiempos de arrivo del tsunami a las respectivas costas (Figs. 8, 9, y 11). Este encausamiento del flujo hidrodinámico se produce por la presencia del plateau de las Islas Malvinas, que destaca como un alto de gran desarrollo sobre la Plataforma Continental Argentina, favorecida por el efecto de enfoque que provoca en el flujo la presencia del Banco Namuncurá. El sentido del encauzamiento se da desde el sureste al noroeste, aunque dicha orientación varía más o menos de acuerdo a la posición del foco emisor del tsunami en el Arco de Scotia (Figs. 8, 9, y 11). El efecto descripto no se desarrolla si el frente de avance intercepta a la Plataforma Fueguina antes que al Banco Namuncurá, por ejemplo, cuando el foco emisor del tsunami se produce a lo largo del tramo noroccidental de la Zona de Fractura Shackleton (Fig. 10). El retardo que experimenta el tsunami en dicho ámbito es significativo, desarrollando velocidades que van en disminución a medida que avanza hacia la costa remontando la

pendiente de la plataforma. El retardo se produce a expensas de la disminución del período del tren de ondas y del aumento de la amplitud (altura vertical respecto al nivel medio del mar) y de la densidad de energía transportada, como asimismo de la energía potencial gravitatoria, lo cual le confiere dentro de dicho contexto un incremento de su peligrosidad, sobre todo en posición de proximidad a la costa. Este fenómeno viene acompañado de otros efectos adicionales como la rotación del flujo, dependiendo de la orientación de la pendiente y de la dirección de avance de la onda gravitacional. La amplitud de onda de un tsunami en mar abierto, incluso en el caso de eventos catastróficos, usualmente alcanza decenas de decímetros y raramente excede 1 m. Debe tenerse en cuenta la posibilidad de combinación de efectos. Por ejemplo, los deslizamientos submarinos eventualmente pueden proveer energía adicional a ondas tsunami generadas por desplazamientos del piso oceánico. Esto puede ocurrir en zonas de inestabilidad debido a pendientes pronunciadas como ocurre en los cañones submarinos. Si dicha perturbación comenzara a remontar la pendiente suave de una plataforma continental, terminaría irrumpiendo en la franja costera con una amplitud superior en más de un orden de magnitud a la perturbación inicial (Figs. 8, 9, 10 y 11). El modelo lineal de onda gravitacional empleado en este trabajo, no considera la interacción de la onda con la forma y relieve de la costa, donde los efectos de dispersión, resonancias y reverberancias podrían resultar en la manifestación de trenes de ondas secundarias, no necesariamente de menor amplitud que la onda original. En este aspecto, es preciso tener en cuenta que la amplitud característica predicha por el modelo no lineal de ondas gravitacionales es a lo sumo dos veces mayor a la amplitud característica que predice el modelo lineal que se utiliza en el presente trabajo (Pelinovsky 1995).

4)- En lo que respecta al tiempo de arribo de un tsunami a las distintas áreas costeras, éste tiene una fuerte dependencia respecto del perfil de relieve submarino a lo largo del trayecto recorrido entre el foco emisor y la costa. Como se indicó más arriba, la interacción del tsunami con la plataforma y su correspondiente escalamiento, produce un retardo significativo en su avance. Para un tsunami generado en algún punto de la región de las Islas Sandwich del Sur, el tiempo de arribo a las Islas Orcadas del Sur y Georgias del Sur, es de aproximadamente 2 a 3 horas, mientras que demora alrededor de 4 horas en alcanzar las costas del extremo norte de la Península Antártica como así mismo de las Islas Shetland del Sur. Por otra parte, el tiempo de ingreso al Océano Pacífico producido a través del Mar de Hoces, es de alrededor de 4 horas, en tanto que el tiempo de irrupción en la costa Atlántica de Tierra del Fuego y de Santa Cruz, a pesar de requerir la misma distancia de recorrido, es significativamente mayor:

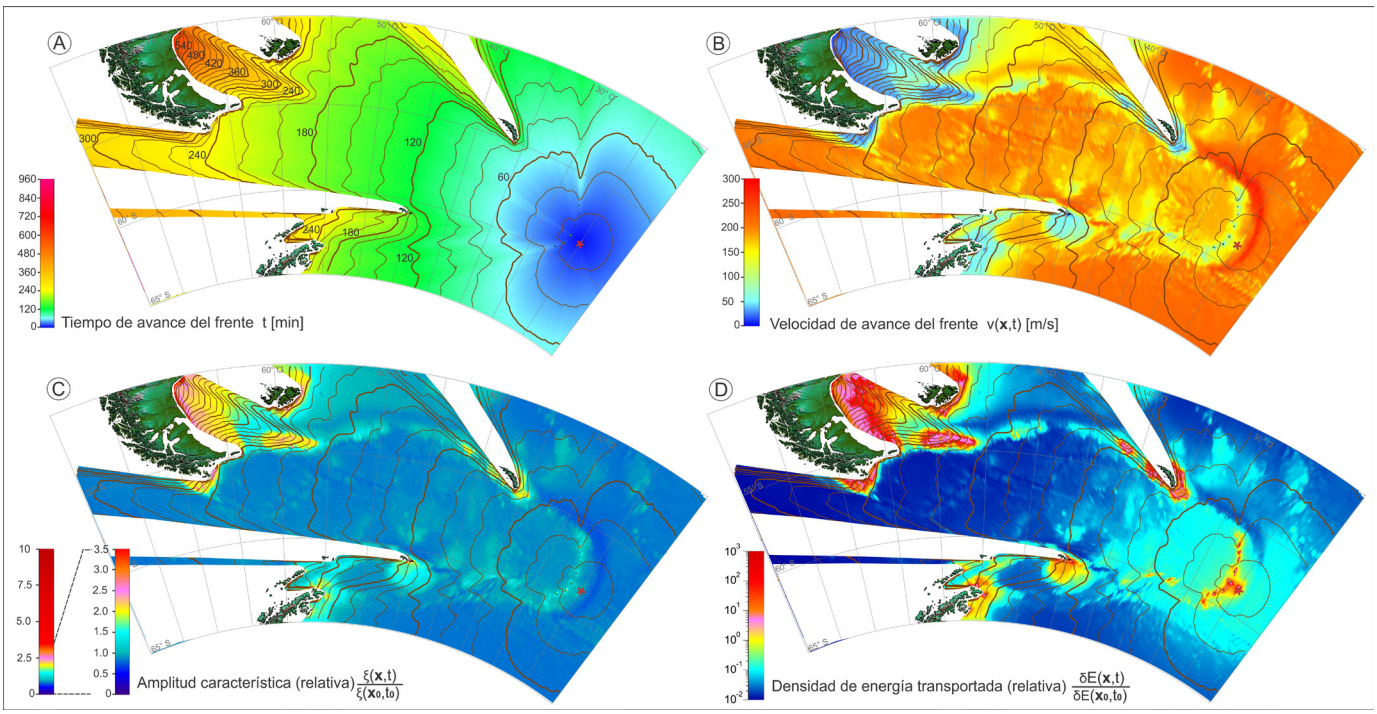

Figura 8. Simulación numérica de un tsunami con origen en el sector de las Islas Sandwich del Sur, empleando el modelo lineal hidrodinámico de onda gravitacional (Levin y Nosov 2016) para el caso de tsunamis de largo período. El modelo considera una perturbación inicial de columna de agua de forma cilíndrica y radio despreciable frente a la longitud de onda que exhiben los tsunamis típicos. Se representa: A) tiempo de avance del frente (en min), B) velocidad de avance del frente (en m/s), C) amplitud característica, relativa a la amplitud de la perturbación inicial en el foco emisor del tsunami, D) densidad de energía transportada, relativa a la densidad de energía en el foco emisor del tsunami.

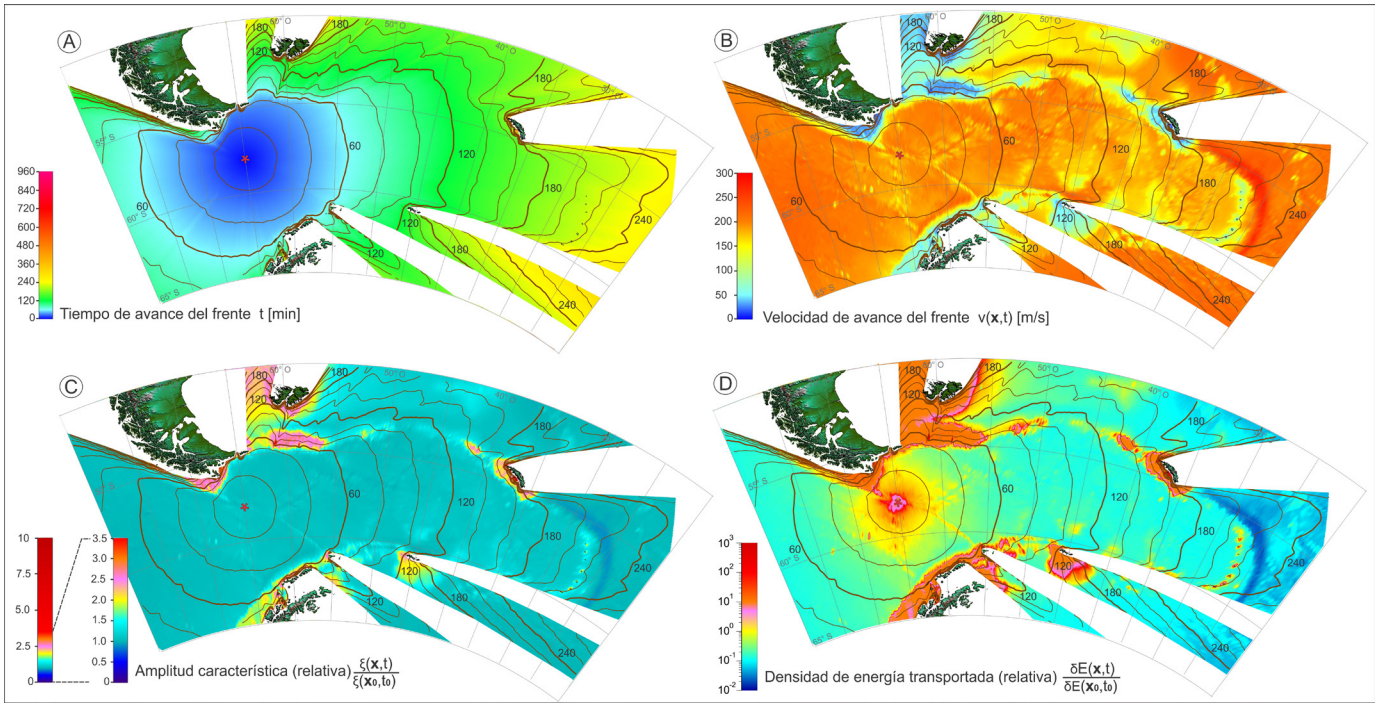

Figura 9. Idem Figura 8, pero con origen en el sector de las Islas Orcadas del Sur.

entre 5 y 10 horas (Fig. 8). Estas discrepancias son debidas al retardo que produce la presencia de la extensa Plataforma Continental Argentina. Aún en los casos en que el tsunami se originara en tramos de la Dorsal Norte del Scotia, donde la distancia a la costa Atlántica Sudamericana fuera menor que la distancia a la Península Antártica, los tiempos de arribo a la costa Atlántica Sudamericana pueden sin embargo resultar mayores que los tiempos de arribo a las costas de la Península Antártica (Fig. 11).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Resultados de la categorización del peligro sísmico basada en los indicadores estudiados

Las observaciones y análisis precedentes en base a los indicadores de peligro sísmico: distribución y frecuencia de sismos, magnitud máxima esperable, energía sísmica radiada, ambiente sismotectónico, estructuras, regímenes de deformación, reología, volcanismo y caracterización de tsunamis antárticos, permitieron establecer una valoración cualitativa del peligro sísmico para cada zona estudiada.

De este modo, las zonas sismogénicas, ordenadas de mayor a menor relevancia según el peligro sísmico potencial que implican son:

1)- Islas Sandwich del Sur – sector oriental del Mar del Scotia (Cuadro 2):

Abarca el sector del arco volcánico de las Islas Sandwich del Sur, incluyendo los puntos triples norte y sur. Comprende el único margen de subducción activo colindante con el continente antártico (Fig. 2). Representa la región de mayor energía sísmica radiada, de mayor magnitud máxima esperable y de mayor potencial tsunamigénico de la franja circumpolar en contacto con la placa Antártica. Se producen nucleamientos sísmicos precedidos por sismos de elevada magnitud ($M_w \geq 7$) en la placa Sandwich, dentro de la franja de máximo régimen compresivo, producto de la subducción de la placa Sudamericana. No obstante, la mayor concentración de la sismicidad se da en la zona de Wadati-Benioff, con la ocurrencia episódica de sismos de elevada magnitud ($M_w \geq 7$) a profundidades intermedias a profundas (> 50 km). En esta región ocurren los sismos de megathrust, conocidos por su potencial para generar tsunamis de elevada magnitud. Adicionalmente, las Islas Sandwich del Sur constituyen un arco volcánico activo, con registros de actividad volcánica Holocena (ej.: Ramos 1996, Leat et al. 2013, entre otros). La sismicidad se prolonga a la denominada zona de transcurrencia de las Sandwich del Sur, límite entre las placas Antártica y Sudamericana, donde también se han registrado eventos sísmicos de elevada magnitud ($M_w \geq 7$). Peligro sísmico y peligro tsunami: muy elevados. (Cuadro 2 y Fig. 2).

2)- Islas Orcadas del Sur – sector central de la Dorsal Sur del Scotia (Cuadro 2):

Abarca el sector norte del bloque de las Islas Orcadas del

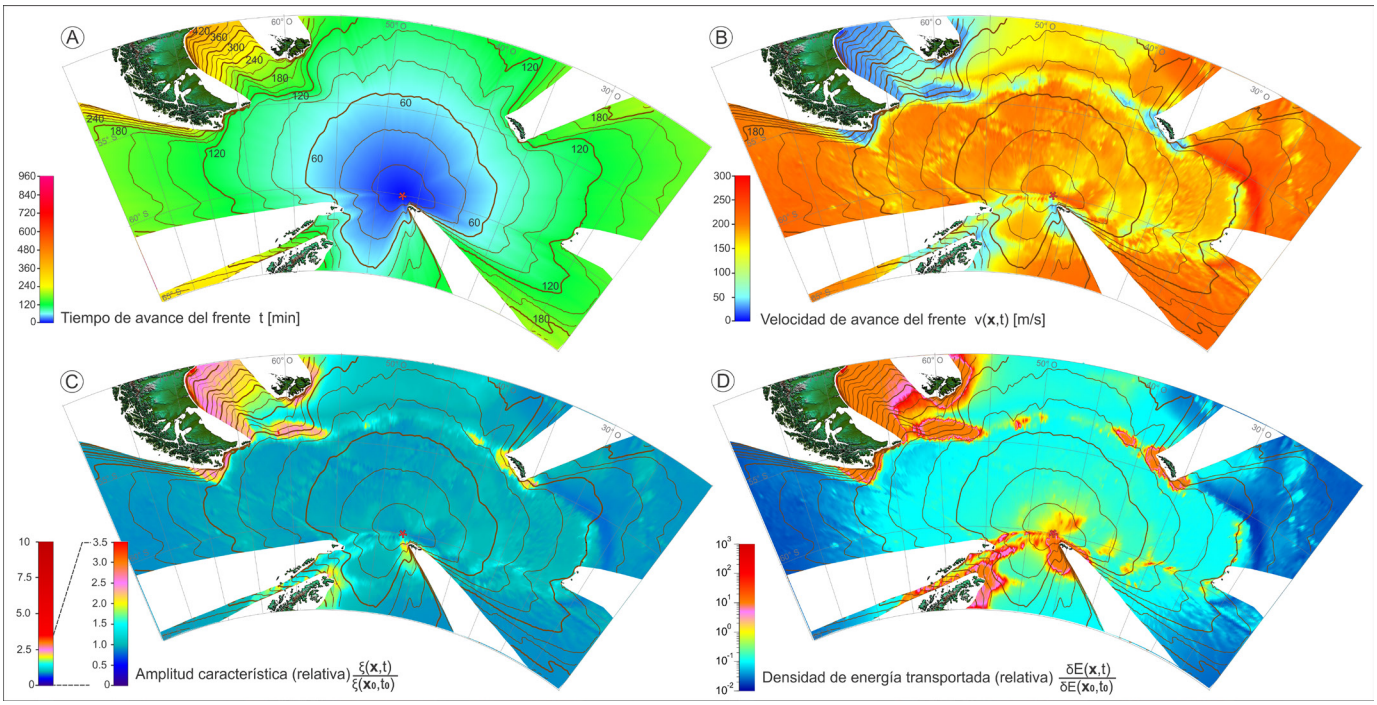

Figura 10. Idem Figura 8, pero con origen en el tramo norte de la Zona de Fractura Shackleton.

Sur, a lo largo de una franja de ~50 km de espesor que se extiende en sentido este-oeste por más de 300 km. Se sitúa inmediatamente al norte de las Islas Orcadas del Sur, donde la sismicidad ocurre por la deformación y movimiento transpresivo del sistema de fallamiento transforme que comprende el contacto entre las placas Antártica y Scotia (Fig. 2). Es la segunda zona de mayor energía sísmica radiada en la región del Arco de Scotia, comparable en orden de magnitud a la energía liberada en la región de las Islas Sandwich del Sur. Está caracterizada por la formación episódica de cúmulos sísmicos liderados por sismos de elevada magnitud (M_w ≥ 7). Los nucleamientos se producen en la zona de contacto entre las placas Antártica y Scotia, a lo largo del espesor de litosfera oceánica, por lo cual resultan someros, es decir raramente superan los ~20 km de profundidad (ej.: Plasencia Linares 2008). La combinación de las altas magnitudes registradas más la presencia de la plataforma del bloque de las Islas Orcadas del Sur y el desarrollo de prismas acrecionales al pie del talud de alta pendiente, puede potenciar la peligrosidad de un evento sísmico local. Peligro sísmico y peligro tsunami: elevados (Cuadro 2 y Fig. 12).

3)- Islas Shetland del Sur y Península Antártica - sector Mar de la Flota (Cuadro 2):

Abarca la extensión total del Mar de la Flota, entre las Islas Shetland del Sur y la Península Antártica. La sismicidad se desarrolla a lo largo del rift activo del Bransfield por más de 400 km. Se manifiesta en forma difusa y a través de nucleamientos sísmicos tipo enjambres, de magnitud baja a intermedia (M_w <~ 5.5-6), generados por la dinámica extensional del rift y la actividad magmática asociada al mismo (Figs. 2 y 5). En dicha región, la litosfera oceánica se encuentra afectada por un flujo térmico anómalo proveniente de una fuente de manto parcialmente fundido, confiriendo un mayor carácter anelástico a la deformación tectónica (Biryol et al. 2018, Zambrano et al. 2022a). Representa la tercera zona de mayor energía sísmica radiada en el Arco de Scotia, aunque se encuentra muy por debajo (uno a dos órdenes de magnitud menor) al valor de energía sísmica radiada en las Islas Sandwich del Sur o en las Islas Orcadas del Sur. Si bien representa un sector de baja energía sísmica radiada y de magnitud máxima esperable moderada, el peligro de formación de un tsunami *in situ* puede verse potenciado por la presencia de: i) volcanismo activo, y ii) plataformas someras, estrechos y cañones submarinos que conforman las hombreras del rift de la cuenca marina. Peligro sísmico y peligro tsunami: moderados (Cuadro 2 y Fig. 12).

4)- Plataforma fueguina - sector norte del Mar de Hoces (Cuadro 2):

Se desarrolla en el extremo sur de la Plataforma Fueguina, en pleno Mar de Hoces, con manifestación de sismicidad difusa y enjambres sísmicos de magnitud baja a intermedia, asociados a un sistema de fallamiento transforme transpresivo (Zona de Fractura Shackleton) y un cambio transicional hacia el norte a un régimen de subducción (Fig. 2). La mag-

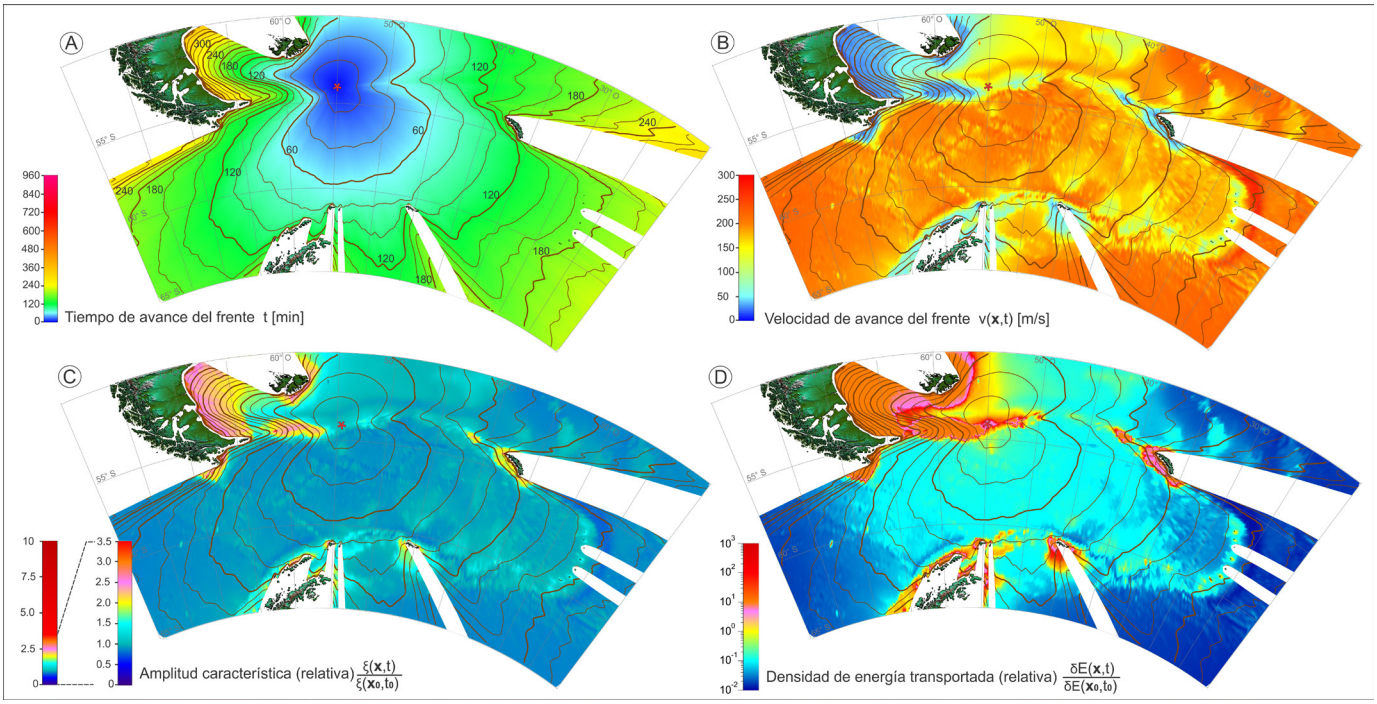

Figura 11. Idem Figura 8, pero con origen en el sector oriental del Banco Namuncurá (Dorsal Norte del Scotia).

nitud máxima esperable para este sector es elevada, similar a la magnitud máxima esperable en la zona de las Islas Shetland del Sur. La amenaza de un tsunami se ve potenciada por la presencia de la Plataforma Fueguina, altas pendientes de talud y desarrollo de cañones submarinos. Peligro sísmico: elevado; peligro tsunami: moderado (Cuadro 2 y Fig. 12).

5)- Bloque de la Isla San Pedro – sector nororiental del Mar del Scotia (Cuadro 2):

Comprende el sector suroriental del bloque de la Isla San Pedro. Se caracteriza por un régimen de deformación transpresional con desarrollo de estructuras de fallamiento inverso (Fig. 2). Si bien la energía sísmica y la magnitud máxima esperable son bajas, la escasa profundidad de su plataforma y elevadas pendientes de talud pueden potenciar el peligro de un tsunami originado *in situ*. Peligro sísmico: elevado; peligro tsunami: moderado (Cuadro 2 y Fig. 12).

6)- Banco Namuncurá – sector noroccidental del Mar del Scotia (Cuadro 2).

Abarca el margen septentrional y extremo oriental del Banco Namuncurá, caracterizado por un régimen de deformación transcurrente con componente compresional (Fig. 2). La sismicidad se manifiesta mediante nucleamientos tipo enjambre a través de estructuras de fallamiento inverso oblicuo que afectan el sector nororiental del bloque (Fig. 5). Si bien representa una región de baja emisión de energía sísmica y de baja magnitud máxima esperable, el tipo de estructuras y mecanismo de deformación le confieren un mayor potencial para generar tsunamis. Adicionalmente, la profundidad somera del banco puede potenciar el peligro de un tsunami originado *in situ*. Peligro sísmico y peligro tsunami: moderados (Cuadro 2 y Fig. 12).

7)- Dorsal Irízar – sector suroriental del Mar del Scotia (Cuadro 2).

Abarca el sector suroriental del Mar del Scotia, ámbito netamente marino, con manifestación de sismicidad difusa y enjambres sísmicos de magnitud baja a moderada (Figs. 2 y 5), relacionados con un régimen de deformación transcurrente con componente extensional (ej.: Yamin y Anselmi 2020, entre otros). Se encuentra caracterizado por la presencia de dorsales y plateau oceánicos. Si bien los valores de energía sísmica radiada y de magnitud máxima esperable que caracterizan a la Dorsal Irízar y al Rift del Bransfield son similares entre sí, existen diferencias geodinámicas y morfoestructurales que confieren a la Dorsal Irízar menor peligro sísmico y tsunamigénico en relación al *Rift* del Bransfield. La Dorsal Irízar se desarrolla al doble de profundidad (~ 3500 m) que el Rift del Bransfield, conectando al sur con la cuenca del Mar de Weddell, y al norte con la cuenca del Mar del Scotia. En contraposición, el Rift del Bransfield representa una fosa tectónica, con volcanismo activo, limitada, por un lado, por la plataforma de la Península Antártica, y por el otro, por la plataforma de las Shetland del Sur. Peligro sísmico y peligro tsunami: moderados (Cuadro 2 y Fig. 12).

Breve discusión del riesgo sísmico

La categorización del peligro sísmico obtenida para la re-

Variables/ indicadores / Zona sísmica	GEOLOGÍA / GEODINÁMICA / FISIOGRAFÍA: Ambiente tectónico	Estructuras predominantes	Régimen de deformación	Volcanismo	Corteza Reología - edad	Manto Estructuras	Relieve submarino	Tierras emergidas: In situ	Tierras emergidas: Colindantes	Tierras emergidas: Rango de distancias (km)	SISMICIDAD Período: [1970-2023]: Magnitud máxima esperable (Ley G-R) Mw	Magnitud máxima registrada Mw	Energía sísmica emitida E(%)	Nucleamientos sísmicos: Cúmulo (Ley de Omori)	Nucleamientos sísmicos: Tipo enjambre	Peligro de tsunami	Peligro Sísmico
6 Banco Namuncurá (sector noroccidental del Mar del Scotia)	Margen transforme tipo R_T	Fallas transformes Fallas inversas Bajo corrimientos	Transcurrente Transpresional	Ausente	CC CO OI	Losa oceánica subducida (Antártica) Ventana astenosférica (por subducción de dorsal Juan Fernández)	Plataforma Banco Namuncurá Taludes Cañadones submarinos Surcos y crestas Llanura abisal	No hay	IsMa IsE TF IsShS IsOS PA IsAu IsGS IsSS	[350-450] [100-650] [200-750] [750-1150] [850-1250] [950-1050] [800-1400] [950-1650] [2000-2150]	5.92	5.7	<1	No	Si		
7 Dorsal Irízar (sector suroriental del Mar del Scotia)	Margen transforme	Fallas transformes Fallas normales	Transcurrente Transtensional	Plateau oceánico Fisural MORB	CC Plateau oceánico CO Mi CO Pl-Cu (contrastes entre CO y CC)	Flujo mantélico encauzado Fracturas de desgarre Ventana astenosférica	Surcos y crestas Fisuras	No hay	IsOS IsSS IsGS IsAu PA IsShS IsMa IsE TF	[250-800] [200-800] [650-750] [850-1000] [850-1350] [800-1700] [1500-1950] [1600-2000] [1700-2100]	6.37	7.0	<1	Si	Si		
8 Zona de Fractura Shackleton (Mar de Hoces)	Margen transforme tipo R_T	Fallas transformes Fallas inversas	Transcurrente Transpresional	Ausente	CO Cr-Pa CO Mi	Ventana astenosférica Anomalía térmica	Crestas Llanura abisal	No hay	IsShS IsE TF PA IsMa IsOS IsAu IsGS IsSS	[50-650] [300-800] [250-850] [200-800] [650-950] [550-1300] [1200-1700] [1350-1850] [1500-2500]	6.38	6.6	<1	Si	Si		
9 Bancos Aurora y Davies (sector centro-norte del Mar del Scotia)	Margen transforme tipo R_T	Fallas transformes	Transcurrente Transpresional	Ausente	CC CO OI CO Mi	Flujo de manto regional	Plataforma de Islas Aurora Taludes Surcos y crestas Cañadones submarinos Llanura abisal	IsAu Asomos de crestas rocosas, escasos metros de altura	IsGS IsOS IsMa IsSS IsShS PA IsE TF	[200-900] [750-850] [400-1200] [750-1650] [800-1000] [1000-1350] [750-1450] [850-1550]	6.18	6.9	<1	No	Si		
10 Dorsal Este del Scotia (sector oriental del Mar del Scotia)	Dorsal oceánica	Fallas normales Fallas transformes Dorsal oceánica	Extensional	Fisural MORB	CO Pl-Cu	Flujo de manto ascendente	Dorsal oceánica Fisuras Surcos y crestas	No hay	IsSS IsGS IsAu IsOS IsShS PA IsMa IsE TF	[50-500] [300-700] [750-1000] [750-950] [1300-1450] [1400-1600] [1850-1950] [2000-2100] [2100-2200]	6.02	6	<1	No	Si		

TF : Tierra del Fuego
IsE : Isla de los Estados
IsMa : Islas Malvinas
IsShS : Islas Shetland del Sur
PA : Península Antártica
IsOS : Islas Orcadas del Sur
IsAu : Islas Aurora
IsGS : Islas Georgias del Sur

Cr-Pa : Cretácico-Paleoceno
Eo : Eoceno
OI : Oligoceno
Mi : Mioceno
Pl-Cu Pliceno - Cuaternario
CO : Corteza oceánica

R-R : *ridge-ridge* (dorsal-dorsal)
R-T : *ridge-trench* (dorsal-trinchera)

Impacto sobre la sismicidad: muy elevado, elevado, moderado, bajo, muy bajo
Edad de la corteza: Cretácico-Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno, Pliceno-Cuaternario
Magnitud máxima esperable: 7.5-8.0, 7.0-7.5, 6.5-7.0, 6.0-6.5, 5.5-6.0
Magnitud máxima registrada: > 7.5, 7.0-7.5, 6.5-7.0, 6.0-6.5, 5.5-6.0
Energía emitida (%): 80-100, 60-80, 40-60, 20-40, 0-20
Peligro de tsunami: muy elevado, elevado, moderado, bajo, muy bajo
Peligro sísmico: muy elevado, elevado, moderado, bajo, muy bajo

Cuadro 2. Caracterización de las zonas sismotectónicas que integran el Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica, en base a los indicadores de peligro sísmico. Valoración cuantitativa de indicadores de peligro sísmico: 1- magnitud máxima esperable, 2- magnitud máxima registrada, 3- porcentaje de energía sísmica radiada por zona. Valoración cualitativa de otros atributos/procesos/condiciones que pueden indicar mayor o menor peligro sísmico, debido a la falta de datos estadísticos: 4- ambiente geotectónico, 5- estructuras geológicas predominantes, 6- regímenes de deformación, 7- actividad volcánica, 8- reología y edad de la corteza, 9- tierras emergidas, tipo de relieve y geoformas, 10- tipo de relieve submarino, 11- formación tipo de nucleamientos sísmicos, 12- peligro de tsunami (tiempos de arribo, amplitud, velocidad y densidad de energía radiada). En la última columna se muestra la valoración del peligro sísmico correspondiente, como resultado de la combinación de dichos indicadores.

Variables/ indicadores / Zona sísmica	GEOLOGÍA / GEODINÁMICA / FISIOGRAFÍA										SISMICIDAD Período: [1970-2023]						
	Ambiente tectónico	Estructuras predominantes	Regímen de deformación	Volcanismo	Corteza Reología - edad	Manto Estructuras	Relieve submarino	Tierras emergidas			Magnitud máxima esperable (Ley G-R)	Magnitud máxima registrada	Energía sísmica emitida	Nucleamientos sísmicos		Peligro de tsunami	Peligro Sísmico
								In situ (Relieve)	Colindantes	Rango de distancias (km)	Mw	Mw	E(%)	Cúmulo (Ley de Omori)	Tipo enjambre		
1 **Islas Sandwich del Sur (sector oriental del Mar del Scotia)**	Subducción CO-CO	Trinchera Complejo de subducción Fallas normales Megathrust Fallas inversas Fallas transformes Fallas de desgarre	Compresional Extensional Transcurrente	Retroarco Arco de islas volcánicas Conos volcánicos Calderas Activo - Holoceno	CO Cr-Pa CO Eo CO Ol CO Mi	Losa oceánica subducida (Sudamericana) Cuña astenosférica Fracturas de desgarre Flujo mantélico de retorno, de acople, encauzado	Fosa oceánica Edificios volcánicos y Montes submarinos Calderas Domos Plataformas volcánicas Surcos y crestas Llanura abisal	**IsSS** Montañas, valles, filos, glaciares de valle, glaciares de descarga, plataformas de hielo, bahías, fiordos	IsGS IsOS IsAu PA IsShS IsMa IsE y TF	[400-850] [800-1200] [750-1200] [1400-1800] [1500-2100] [1900-2250] [2150-2550]	7.33	8.1	75	Sí	Sí		
2 **Islas Orcadas del Sur (sector centro-sur del Mar del Scotia)**	Margen transforme tipo R_R	Fallas transformes Fallas inversas	Transcurrente Transpresional Transtensional	Plateau oceánico	CC Plateau oceánico (contrastes entre CO y CC)	Ventana astenosférica Losa oceánica Weddell Flujo mantélico de retorno	Plataforma del bloque Orcadas del Sur Taludes Prismas acrecionales Cañadones submarinos Llanura abisal	**IsOS** Montañas, valles, filos, glaciares de valle, glaciares de descarga, plataformas de hielo, bahías, fiordos	PA IsShS IsAu IsGS IsSS IsMa IsE y TF	[200-800] [200-1000] [800-1100] [750-1250] [650-1500] [1050-1500] [950-1600]	7.02	7.8	21	Sí	Sí		
3 **Islas Shetland del Sur y Península Antártica (Mar de la Flota)**	Cuenca/rift de retroarco	Fallas normales Rift extensional	Extensional Transtensional	Fisural Central poligenético Conos volcánicos Calderas Activo -Holoceno	CC CO Pl-Cu	Anomalía térmica Pluma mantélica ? Flujo de manto ascendente Losa oceánica subducida (Phoenix)	Plataformas continentales Plataformas insulares Cañones submarinos Edificios volcánicos y Montes submarinos Surcos y crestas Graben	**IsShS y PA** Montañas, valles, filos, glaciares de valle, glaciares de descarga, plataformas de hielo, bahías, fiordos	PA IsOS IsE y TF IsMa IsAu IsGS IsSS	[100-200] [450-900] [850-950] [1000-1200] [1100-1600] [1250-1750] [1400-2000]	6.39	6.9	1.2	Sí	Sí		
4 **Plataforma Fueguina (sector norte del Mar de Hoces)**	Margen transforme tipo R_T	Fallas transformes	Transcurrente Transpresional	Ausente	CC CO Ol CO Mi	Losa oceánica subducida (Antártica) Ventana astenosférica (por subducción de dorsal Juan Fernández)	Plataforma Fueguina Taludes Cañadones submarinos Surcos y crestas Llanura abisal	**TF - IsE - otros archipiélagos** Montañas, valles, filos, glaciares de valle, glaciares de descarga, plataformas de hielo, bahías, fiordos	IsMa IsShS PA IsOS IsAu IsGS IsSS	[400-700] [750-950] [800-1000] [1200-1300] [1500-1650] [1750-1850] [2200-2600]	7.22	6.1	<1	No	Sí		
5 **Bloque de la Isla San Pedro (sector nororiental del Mar del Scotia)**	Margen transforme tipo R_T	Fallas transformes Fallas inversas Bajo corrimientos	Transcurrente Transpresional	Ausente	CC CO Cr-Pa CO Mi (contrastes entre CO y CC)	Flujo mantélico de retorno	Plataforma del bloque Isla San Pedro Taludes Llanura abisal	**IsGS** Montañas, valles, filos, glaciares de valle, glaciares de descarga, plataformas de hielo, bahías, fiordos	IsSS IsAu IsOS IsShS PA IsMa IsE TF	[300-1150] [150-550] [750-1150] [1150-1900] [1400-1550] [1200-1650] [1550-2000] [1650-2100]	6.15	6.6	<1	No	Sí		

TF : Tierra del Fuego
IsE : Isla de los Estados
IsMa : Islas Malvinas
IsShS : Islas Shetland del Sur
PA : Península Antártica
IsOS : Islas Orcadas del Sur
IsAu : Islas Aurora
IsGS : Islas Georgias del Sur
IsSS : Islas Sandwich del Sur
IsSS : Islas Sandwich del Sur

Cr-Pa : Crétacico-Paleoceno
Eo : Eoceno
Ol : Oligoceno
Mi : Mioceno
Pl-Cu Plioceno - Cuaternario
CO : Corteza oceánica
CC : Corteza continental
PO : Plateau oceánico

R-R : *ridge-ridge* (dorsal-dorsal)
R-T : *ridge-trench* (dorsal-trinchera)
MORB : *Mid ocean ridge basalts* Basaltos de dorsal centro-oceánica

Impacto sobre la sismicidad
muy elevado
elevado
moderado
bajo
muy bajo

Edad de la corteza
Cretácico-Paleoceno
Eoceno
Oligoceno
Mioceno
Plioceno-Cuaternario

Magnitud máxima esperable
7.5-8.0
7.0-7.5
6.5-7.0
6.0-6.5
5.5-6.0

Magnitud máxima registrada
> 7.5
7.0-7.5
6.5-7.0
6.0-6.5
5.5-6.0

Energía emitida (%)
80-100
60-80
40-60
20-40
0-20

Peligro de tsunami
muy elevado
elevado
moderado
bajo
muy bajo

Peligro sísmico
muy elevado
elevado
moderado
bajo
muy bajo

Cuadro 2. Continuacion

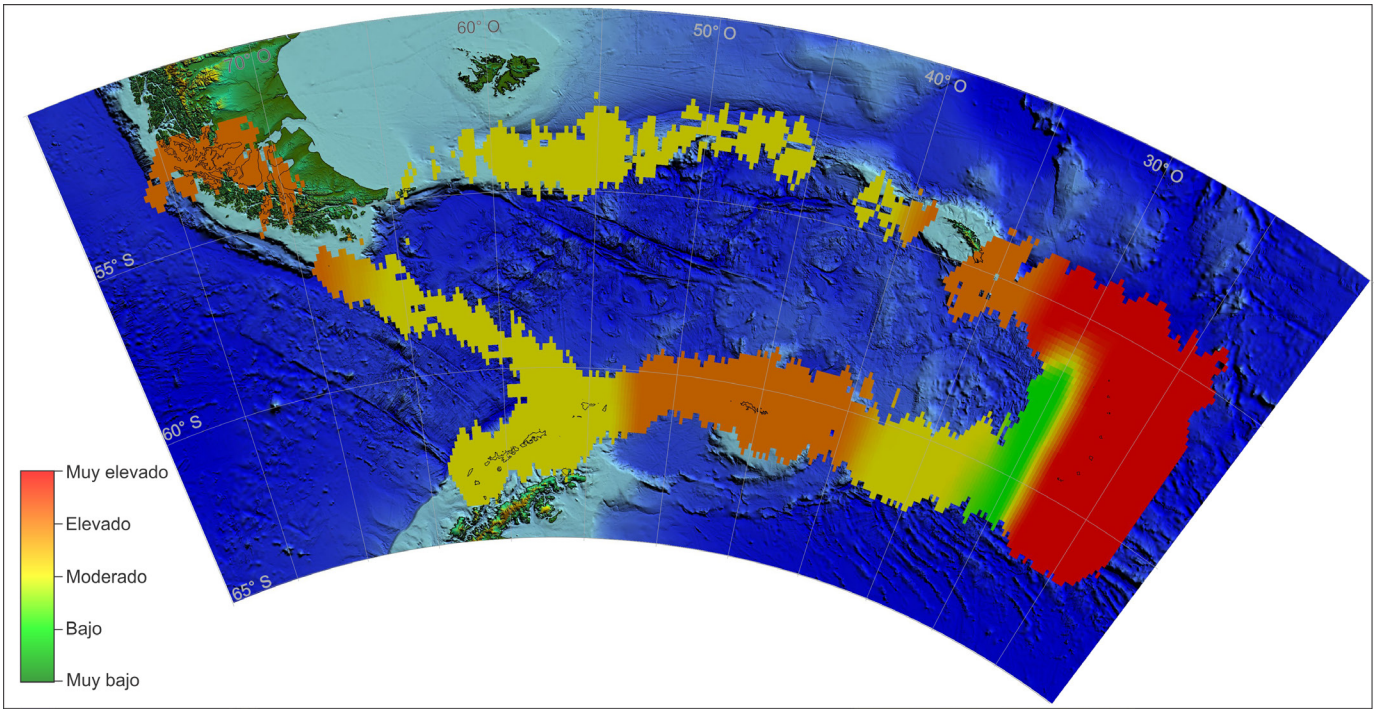

Figura 12. Mapa de peligro sísmico de la región de estudio, acorde a la valoración asignada en este trabajo, obtenida del resultado de la combinación de indicadores de peligro sísmico, los cuales se resumen en el Cuadro 2.

gión del Arco de Scotia, muestra consistencia con los ambientes sismotectónicos que se evalúan (Cuadro 2): convergencia en el sector de las Islas Sandwich del Sur, transcurrencia en el sector de las Islas Orcadas del Sur y divergencia en el sector de las Islas Shetland del Sur.

Sin embargo, a la hora de evaluar la vulnerabilidad de asentamientos humanos (vidas humanas) y de infraestructuras edilicias (bases antárticas permanentes y temporarias, refugios y laboratorios científicos antárticos) frente a la generación de sacudidas sísmicas o a remociones en masa del terreno o al avance de tsunamis producto de un evento sismotectónico, la localidad que reviste mayor riesgo sísmico son las Islas Orcadas del Sur. En dicho archipiélago se ubica la base argentina permanente Orcadas, a 4 msnm, inmersa en zona de elevado peligro sísmico y elevado peligro de tsunami (Cuadro 2).

La región de las Islas Shetland del Sur representa la segunda zona de riesgo sísmico, en orden decreciente de vulnerabilidad, albergando en su archipiélago siete bases antárticas permanentes, seis de las cuales se encuentran situadas entre 10 y 45 msnm. Debido a que la expectativa de peligro sísmico, considerada en términos de la energía sísmica radiada, resulta dos órdenes de magnitud inferior que la expectativa de peligro sísmico en las Islas Orcadas del Sur, también resulta menor su riesgo sísmico en lo que respecta a la producción de temblores y remociones en masa, de acuerdo con la energía potencial sísmica necesaria para producirlos (riesgo sísmico moderado). No obstante, el riesgo sísmico podría verse incrementado por la ocurrencia local de tsunamis volcánicos y de tsunamis por deslizamiento.

La región de las Islas Sandwich del Sur no alberga asentamientos humanos permanentes, por lo cual, aunque representa la zona de mayor peligro sísmico y tsunamigénico, usualmente no implica riesgo sísmico local.

Las regiones central y septentrional del Mar del Scotia y región del Mar de Hoces, ámbitos exclusivamente marinos, con manifestación de sismicidad difusa e infrecuente y enjambres sísmicos de magnitud baja a intermedia, representan zonas de moderado a bajo peligro sísmico y por lo tanto de bajo riesgo sísmico. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que la distribución geográfica de las tierras emergidas colindantes y la extensa Plataforma Continental Argentina son factores que pueden potenciar la amenaza de un tsunami de origen tectónico producido en dicho sector.

CONCLUSIONES

Sobre la base del análisis de indicadores de peligro sísmico se estableció una categorización del peligro sísmico en la región del Arco de Scotia y extremo norte de la Península Antártica, basada en la capacidad que reviste una determina-

da localidad sismotectónica para generar fenómenos con impacto negativo en el sitio del evento sísmico o en localidades aledañas, tales como sacudidas del terreno, remociones en masa e incursión de tsunamis. El estudio fue complementado con la estimación de indicadores dinámicos que caracterizan la evolución temporal y espacial del fenómeno tsunami en el ámbito marino antártico y subantártico propiamente dicho, basado en la teoría de propagación lineal de las ondas gravitacionales en medios fluidos.

Se reconocen al menos tres ámbitos principales con el mayor peligro sísmico, caracterizados por regímenes tectónicos distintos: convergencia en la zona de las Islas Sandwich del Sur, transcurrencia en la zona de las Islas Orcadas del Sur y divergencia en la zona de las Islas Shetland del Sur. Otros ámbitos de peligro sísmico elevado, se reconocen en el Mar de Hoces (sector de la Plataforma Fueguina) y Mar del Scotia nororiental (sector del bloque de la Isla San Pedro).

En cuanto a la vulnerabilidad de los asentamientos humanos frente a la generación de sacudidas sísmicas, remociones en masa del terreno o avance de tsunamis, producto de un evento sísmico local, la localidad que reviste mayor riesgo sísmico son las Islas Orcadas del Sur, donde se ubica la base argentina permanente Orcadas, inmersa en una zona de alto peligro sísmico y de alto potencial tsunamigénico.

En orden decreciente de vulnerabilidad, la región de las Islas Shetland del Sur, en el Mar de la Flota, representa la segunda zona de riesgo sísmico, albergando en su archipiélago numerosas bases antárticas permanentes. Si bien la energía sísmica radiada en dicho ámbito resulta dos órdenes de magnitud menor que la energía sísmica radiada en la región de las Islas Orcadas del Sur, la actividad volcánica y la configuración fisiográfica del fondo marino pueden favorecer la formación de tsunamis volcánicos y por deslizamiento, aumentando el riesgo sísmico de la región.

Las Islas Sandwich del Sur no albergan asentamientos humanos permanentes, por lo tanto, aunque representan el ámbito con mayor peligro sísmico de la región, usualmente no implican riesgo sísmico local. Las regiones central y septentrional del Mar del Scotia y región del Mar de Hoces, ámbitos exclusivamente marinos, revisten bajo peligro y riesgo sísmico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Dr. Mario Giménez (Editor asociado de la RAGA) y al Dr. Ricardo Astini (Editor General de la RAGA), por sus recomendaciones para la adecuada presentación del manuscrito. Asimismo, se agradece a los árbitros anónimos las correcciones y comentarios valiosos que resultaron en una mejora del trabajo original.

Se agradece al Programa Antártico Argentino, al Programa Nacional de Investigaciones en la Antártida (Programma Nazionale di Ricerche in Antartide, PNRA) de la República Italiana y a la Fundación Nacional de Ciencias (National Science Foundation, NSF) de los Estados Unidos.

Se agradece al Lic. Claudio Matko por la disponibilidad del software BMG Global Mapper(R) para elaborar los mapas del presente trabajo. AMG es miembro de la carrera del Investigador científico de CONICET. PICT 2019-02754 (FONCyT-ANPCyT) and UBACyT-20020190100247BA (UBA)

REFERENCIAS

Alvarez, W. 1982. Geological evidence for the geographical pattern of mantle return flow and the driving mechanism of plate tectonics. Journal of Geophysical Research 87: 6697-6710.

Barker, P.F. 2001. Scotia Sea regional tectonic evolution: implications for mantle flow and paleocirculation. Earth Science Reviews 55: 1-39.

Bartolini, S., Geyer, A., Martí, J., Pedrazzi, D., y Aguirre-Díaz, G. 2014. Volcanic hazard on Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica). Journal of Volcanology and Geothermal Research 285: 150-168.

Beniest, A., y Schellart, W. P. 2020. A geological map of the Scotia Sea area constrained by bathymetry, geological data, geophysical data and seismic tomography models from the deep mantle. Earth-Science Reviews 210: 103391.

Biryol, C.B., Lee, S.J., Lees, J.M. y Shore, M.J., 2018. Lithospheric structure of an incipient rift basin: results from receiver function analysis of Bransfield Strait, NW Antarctic Peninsula. Polar Science 16: 47–58.

Bormann, P., y Saul, J. 2008. The new IASPEI standard broadband magnitude mB. Seismological Research Letters 79: 698–705.

Brunt, K.M., Okal, E.A. y MacAyeal, D.R. 2011. Antarctic ice-shelf calving triggered by the Honshu (Japan) earthquake and tsunami, March 2011. Journal of Glaciology 57(205):785–878.

Buffoni, C. 2016. Determinación de la estructura cortical en el sector argentino de la Isla Grande de Tierra del Fuego. Tesis doctoral, Universidad de La Plata. La Plata.

Buffoni, C., Sabbione, N.C., Connon, G. y Hormaechea, J.L. 2009. Localización de hipocentros y determinación de su magnitud en Tierra del Fuego y zonas aledañas. Geoacta 34: 75–85.

Bujalesky, G. G. 2012. Tsunami overtopping fan and erosive scarps at Atlantic coast of Tierra del Fuego. Journal of Coastal Research, 28(2): 442-456.

Caminos, R.L., Panza, J.L.A., Pezzutti, N.E., Rastelli, D.C. y Etcheverría, M.P. 1999. Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Anales 29 (3): 4-96, Buenos Aires, 1999. Repositorio Institucional SEGEMAR (SEGEMAR). Servicio Geológico Minero Argentino. Argentina.

Cesca, S., Sugan, M., Rudzinski, Ł., Vajedian, S., Niemz, P., Plank, S.,

Petresen, G., Deng, Z., Rivalta, E. Vuan, A., Plasencia Linares, M.P., Heimann, S. y Dahm, T. 2022. Massive earthquake swarm driven by magmatic intrusion at the Bransfield Strait, Antarctica. Communications Earth & Environment 3(1): 89.

Civile, D., Lodolo, E., Vuan, A., y Loreto, M.F. 2012. Tectonics of the Scotia–Antarctica plate boundary constrained from seismic and seismological data. Tectonophysics 550–553: 17–34

COPLA 2017. El margen continental argentino: entre los 35°S y los 55°S en el conexto del artículo 76 de la Convención de la Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. - la edición bilingüe. – Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto, 2017. Archivo Digital: online. ISBN 978-987-1767-33-5.

IOC-UNESCO 2019. Intergovernmental Oceanographic Commission. Glosario de tsunamis, cuarta edición, 2019. Colección Técnica de la COI, 85. París, UNESCO, 2019 (IOC/2008/TS/85rev.4). http://ioc.unesco.org; tsunami.ioc@unesco.org

Della Vedova, B., Pellis, G., Accaino, F., Petronio, L., Romanelli, M., Rinaldi, C., Febrer, J., Tassone, A., Mazzarini, F., Bozzo, E., Caneva, G., Zhang, J., y Gruppo TENAP. 1997. Preliminary results on the cristal thickness of the northern Antarctic Peninsula (TENAP Project). Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida Atti del 16° Convegno Nazionale, Roma.

Dragani, W. C., D'Onofrio, E. E., Grismeyer, W., Fiore, M. M., Violante, R. A., y Rovere, E. I. 2009. Vulnerability of the Atlantic Patagonian coast to tsunamis generated by submarine earthquakes located in the Scotia Arc region. Some numerical experiments. Natural hazards 49: 437-458.

Febrer J.M., Plasencia M.P. y Sabbione N.C. 2001. Local and regional seismicity from Ushuaia Broadband station observations (Tierra del Fuego). Terra Antartica 8: 35-40.

Febrer, J.M. and Zakrajsek, A.F. 2005. Aftershocks localization, GPS-derived displacements and crust static stress changes related to the 4 August 2003 M 7.5 earthquake, East from the Antarctic station Orcadas. Abstracts IASPEI 33rd General Assembly, Santiago, Chile, 2-8 October 2005.

GEOFON Global Seismic monitor: https://geofon.gfz-potsdam.de.

Govers, R., Broerse, T., y Herman, M. 2022. Tectonic Context of the August 2021 South Sandwich Islands Earthquake Sequence: Plate Boundary Geometry and Kinematics at Active STEPs. Authorea Preprints.

Gutenberg, B. y Richter, C.F. 1954. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton University Press., Princeton, United States of America, 310pp.

Hubbard, J., 2021. Mixed earthquake signals in the South Sandwich Islands, Temblor. http://doi.org/10.32858/temblor.2021

IASPEI, 2005. Summary of Magnitude Working Group recommendations on standard procedures for determining earthquake magnitudes from digital data. available online at http://www.iaspei.org/commissions/CSOI.html.

IRIS Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS Earthquake browser): https://ds.iris.edu.

Kaminuma, K. 2001. A possibility of earthquake swarms around ORCA SeaMount in the Bransfield strait, the antarctic. In: Kim, Y. (Ed.), Proceedings of the Joint International Seminar: Recent Interests on Antarctic Earth Sciences of Korea and Japan, pp. 23–34.

Kanamori, H. 1977. The energy release in great earthquakes. Journal of Geophysical Research 82: 2981–2987.

Karney, C. F. 2013. Algorithms for geodesics. Journal of Geodesy 87: 43-55.

Karney, C.F. 2022. GeographicLib, Version 2.3 (2022-05-06), https://geogrphiclib.sourceforge.io/C++/2.3.

Karney, C.F. 2024. Geodesics on an arbitrary ellipsoid of revolution. Journal of Geodesy 98(1): 4.

Klepeis, K.A. y Lawver, L.A. 1996. Tectonics of the Antarctic-Scotia plate boundary near Elephant and Clarence Islands, West Antarctica. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No.B9: 20211-20231.

Kowalik, Z., Knight, W., Logan, T. y Whitmore, P. 2007. The Tsunami of 26 December, 2004: Numerical Modeling and Energy Considerations. Pure and Applied Geophysics 164 (2007): 379–393.

Leat, P. T., Day, S. J., Tate, A. J., Martin, T. J., Owen, M. J., y Tappin, D. R. 2013. Volcanic evolution of the South Sandwich volcanic arc, South Atlantic, from multibeam bathymetry. Journal of Volcanology and Geothermal Research 265: 60-77.

Levin, B. W., y Nosov, M. 2016. Physics of tsunamis (Vol. 327). Springer International Publishing Switzerland.

Liang, Q., Li, T., Howat, I., Xiao, W., Hui, F., Chen, Z., Zheng, L. y Cheng, X. 2023. Ice tongue calving in Antarctica triggered by the Hunga Tonga volcanic tsunami, January 2022. Science Bulletin 68(5): 456-459.

Moreno-Vacas, A., y Almendros, J. 2021. On the origin of recent seismic unrest episodes at Deception Island volcano, Antarctica. Journal of Volcanology and Geothermal Research 419: 107376.

Müller, C., Bayer, B., Eckstaller, A. y Miller, H. 2008. Mantle flow in the South Sandwich subduction environment from sorce-side shear wave splitting. Geophysical Research Letters 35: L03301.

Okal, E. A. y Hartnady, C. J. 2009. The South Sandwich Islands Earthquake of 27 June 1929: Seismological Study and Inference on Tsunami Risk for the South Atlantic. South African Journal of Geology 112: 359–370.

Olivet, J. L., Bettucci, L. S., Castro-Artola, O. A., Castro, H., Rodríguez, M., y Latorres, E. 2021. A seismic swarm at the Bransfield Rift, Antarctica. Journal of South American Earth Sciences 111: 103412.

Omori, F., 1894. On the aftershocks of earthquakes. Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo, 7: 111–200.

Pelayo, A.M. y Wiens, D.A. 1989. Seismotectonics and relative plate motions in the Scotia sea region. Journal of Geophysical Research 94(B6): 7293-7320.

Pelinovsky E. 1995. Non-linear hyperbolic equations and run-up of Huge sea waves. Applicable Analysis 57(1-2): 63-84.

Perez, I., Wörner, S., Dragani, W., Bacino, G., y Medina, R. 2020. Meteorite impacts in the ocean: the danger of tsunamis on the coast of Buenos Aires Province, Argentina. Natural Hazards, 103(2): 2339-2354.

Plasencia Linares, M.P. 2008. Lithospheric characteristics and seismic sources in the Scotia Arc through waveform inversion. Ph.D. Thesis, Trieste University, Italy.

Ramos, V.A. 1996. Geología de las islas Sandwich del Sur. En: Ramos, V.A. y Turic, M.A. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina. 13° Congreso Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Relatorio 20: 369-384.

Ramos, V.A. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. En: Caminos, R. (ed.), Geología Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y recursos minerales. Anales 29 (3): 41-96, Buenos Aires.

Robertson Maurice, S. D., Wiens, D. A., Shore, P. J., Vera, E. y Dorman, L.M. 2003. Seismicity and tectonics of the South Shetland Islands and Bransfield Strait from a regional broadband seismograph deployment. Journal of Geophysical Research 108(B10): 2461.

Roger, J., Hebert, H., Jamelot, A., Gusman, A., Power, W., y Hubbard, J. 2022. The South Sandwich circum-Antarctic tsunami of August 12, 2021: widespread propagation using oceanic ridges. EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria.

Russi M., Febrer, J.M., Costa, G., Nieto, D.Y., y Panza, G.F. 1994. Analysis of digital waveforms recorded at the seismographic station Esperanza. Terra Antartica 1: 162-166.

Russi, M., Costa, G., Febrer, J.M., Vuan, A. y Panza, G.F. 1995. Investigating the Lithospheric Structure of the Scotia Region by means of Surface Waveform Analysis. In: Ricci C.A. (ed). The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes, Terra Antartica Publication, p.1065-1069, Siena.

Russi, M., Febrer, J.M. y Plasencia Linares, M.P. 2010. The Antarctic Seismographic Argentinean-Italian Network: technical development and scientific research from 1992 to 2009. Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata 51(1): 23-41.

Seivane, H., Martín, R., Almendros, J., Wilcock, W., y Soule, D. 2022. Microseismicity around Orca submarine volcano, Bransfield Strait, Antarctica, during 2019-2020 from OBS data. Authorea Preprints.

Smalley Jr., R., Dalziel, I.W.D., Bevis, M.G., Kendrick, E., Stamps, D.S., King, E.C., Taylor, F.W., Lauría, E., Zakrajsek, A. y Parra, H. 2007. Scotia arc kinematics from GPS geodesy. Geophysical Research Letters 34: L21308.

Smalley R.(Jr), Bevis, M., Zakrajsek, A., Teferle, F.N., Dalziel, I., y Lawver, L. 2014. Near field dynamic, co-seismic and post-seismic deformations associated with the 2013, M7.8, and 2003, M7.6, South Scotia Ridge Plate Boundary earthquakes observed with GPS. XXVII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geodestas y Geofísicos (AAGG). Poster. San Juan, Argentina, 10-14 Nov. 2014.

Smellie, J.L., Kraus, S. y Williams, K. 2023. The 1821 eruption of Bridgeman Island, South Shetland Islands, Antarctica: an observed Capelinhos-style hydrovolcanic event. Antarctic Science 35(4): 283–298.

Titov, V.V., Rabinovich A.B., Mofjeld H.O., Thomson R.I., González, F.I. 2005. The Global Reach of the 26 December 2004 Sumatra Tsunami. Science, 309 (23 Sep 2005) 2045–2048

Titov, V., Sannikova, N., Arcas, D., Moore, C., y Wei, Y. 2021. South Sandwich Islands Tsunami: Observation and Modeling. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2021, pp. S42C-10).

Torres Carbonell, T.J., Dimieri, L.V., Olivero, E.B., Bohoyo, F. y Galindo-Zaldívar, J. 2014. Structure and tectonic evolution of the Fuegian Andes (southernmost South America) in the framework of the Scotia Arc development. Global and Planetary Change 123 (2014): 174-188.

Vérard, C., Flores, K. y Stampfli, G. 2012. Geodynamic reconstructions of the South America–Antarctica plate system. Journal of Geodynamics 53: 43-60.

Vuan, A., Russi, M., y Panza, G.F. 2000. Group Velocity Tomography in the Subantarctic Scotia Sea Region. Pure and Applied Geophysics 157: 1337-1357.

Vuan, A., Sugan, M., y Plasencia Linares, M.P. 2014. A reappraisal of surface wave group velocity tomography in the Subantarctic Scotia Sea and surrounding ridges. Global and Planetary Change 123: 223-238.

Weinstein, S., Natarov, A., Wang, D., Emry, E., y Walsh, D. 2021. Water-level measurements and tsunami forecasting by the NOAA/NWS Pacific Tsunami Warning Center during and after the August 12, 2021 South Sandwich Islands earthquakes. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2021, pp. S45H-2530).

Yamin, M.G., y Anselmi G. 2020. Geología de las placas Scotia y Sandwich. Revisión y mapa geológico. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas - Geología N° 8, 29 pp. Buenos Aires.

Ye, L., Lay, T., Koper, K.D., Smalley, R., Rivera, L., Bevis, M.G., Zakrajsek, A.F. y Teferle, F.N. 2014. Complementary slip distributions of the August 4, 2003 Mw 7.6 and November 17, 2013 Mw 7.8 South Scotia Ridge earthquakes. Earth and Planetary Science Letters 401: 215-226.

Zambrano, O.M., Gulisano, A.M., Poma, S. y Ruocco, M.I. 2022a. Caracterización de estructuras del manto superior en la región del extremo norte de la Península Antártica, mediante un análisis de las anomalías de velocidad sísmica. Revista de la Asociación Geológica Argentina 93(3): 397-428.

Zambrano, O.M., A. F. Zakrajsek, J.M. Lirio, 2022b. Evaluación de la peligrosidad sísmica en la región del extremo norte de la Península Antártica y mares circundantes. Informe Instituto Antártico Argentino. Dirección Nacional del Antártico. Secretaría de Malvinas, Antártida y Atlántico Sur. Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto, Argentina. 24pp.