



La sismicidad en la llanura Chacopampeana y su relación con el Lineamiento Transbrasilián: una revisión

Seismicity in the Chacopampean plain and its relation to the Trans-Brazilian Lineament: a review

Eduardo A. ROSSELLO^{ID}, Lucas ARIONI^{ID}

CONICET-IGEBA, Universidad de Buenos Aires, FCEN, Pabellón II, Ciudad Universitaria, (1428) Buenos Aires, Argentina.

Autor de correspondencia: <ea_rossello@yahoo.com.ar>

RESUMEN

En la región Chacopampeana se identifican dos clústers de sismos: uno somero de baja intensidad generado por la reactivación transpresional intracortical del Lineamiento Transbrasilián (LTB), y ii) otro muy profundo y de mayor intensidad dispuesto submeridionalmente en las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Formosa asociado con las expresiones más distales de la subducción de la placa de Nazca. El reciente terremoto del 31 mayo del 2022 a las 0:57:06 (UTC) con epicentro a 10 km (24.761°S - 58.211°O) se dispone sobre la traza del LTB. Esta coincidencia espacial permite sugerir su origen por la liberación de energía producida por la reactivación andina de sus antiguos fallamientos tectónicos. El LTB es una zona de sutura transcontinental de primer orden durante la consolidación del Gondwana Occidental previo a la apertura Atlántica. Limita ambientes cratónicos de Brasil, Argentina y Paraguay y, en su continuación africana, separa bloques cratónicos en Benín, Togo y Argelia. En la región Chacopampeana de Paraguay y Argentina, el LTB se dispone entre los cratones Rodinia y Rio de la Plata y se considera que debido a la convergencia Andina se reactiva de modo transpresional dextral. La extensa cubierta sedimentaria meso-cenozoica impide la expresión en superficie del LTB,

► Ref. bibliográfica: Rosello, E. A.; Arioni, L. 2024. "La sismicidad en la llanura Chacopampeana y su relación con el Lineamiento Transbrasilián: una revisión". *Acta Geológica Lilloana* 35 (2): 101-126. doi: <https://doi.org/10.30550/j.agl/1883>

► Recibido: 29 de diciembre 2023 – Aceptado: 29 de julio 2024



► URL de la revista: <http://actageologica.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

sin embargo, es posible interpretarlo en el subsuelo a partir de los escasos pozos exploratorios y estudios geofísicos disponibles (relevamientos 2D de reflexión sísmica, magnetotelúricos y gravimétricos).

Palabras clave: Sismicidad, Llanura Chacopampeana, Lineamiento Transbrasiliense, tectónica, Argentina, Paraguay.

ABSTRACT

The main seismological characteristics of the Chacopampean region allow the identification of 2 different earthquake clusters: a) a shallow one of low intensity, linked to the Transbrazilian Lineament (LTB) by its intracortical transpressional reactivation, and b) another very deep one of higher intensity, located submeridionally in the provinces of Santiago del Estero, Chaco and Formosa, linked to the most distal expressions of the subduction of the Nazca Plate. The spatial coincidence of the recent earthquake of May 31, 2022 at 0:57:06 (UTC) with hypocenter at 10 km (24.761°S and 58.211°W), with the trace of the LTB suggests its linkage by facilitating the release of energy by Andean tectonic faulting reactivation. The TL is a first-order transcontinental suture zone during the consolidation of Western Gondwana prior to the opening of the Atlantic Ocean. It is the boundary of the cratonic environments of Brazil, Argentina and Paraguay and, in its African continuation, the cratonic blocks of Benin, Togo and Algeria. In the Chacopampean region of Paraguay and Argentina, it is associated with the cratonic dextral transpressional convergence of the Rodinia and Rio de la Plata blocks, where the extensive Meso-Cenozoic sedimentary cover prevents its surface expression. However, it can be interpreted in the subsurface from the few exploration wells and geophysical surveys available (2D seismic reflection, magnetotelluric and gravimetric surveys).

Palabras clave: Seismicity, Chacopampeana plain, Trans-Brazilian Lineament, tectonics, Argentina, Paraguay.

INTRODUCCIÓN

La distribución y características de los sismos registrados en la Llanura Chacopampeana permiten interpretar estructuras del subsuelo que pueden haberlos originado debido a sus reactivaciones tectónicas. Por ello, la ocurrencia del sismo (31 de marzo del 2022 a las 00:57:06hs UTC) de magnitud (M) 3.5 sobre el límite entre Argentina y Paraguay (24.761°S, 58.211°W), cuyo epicentro fue calculado a 10 km por el USGS (2023) actualiza el interés de comprender la vinculación de estos fenómenos intracontinentales con el contexto tectónico del antepaís Andino.

La Llanura Chacopampeana es una vasta región de planicies del centro sur del continente Sudamericano que se extiende por el noroeste de Argentina y el oeste del Paraguay (Figura 1). Está caracterizada por secuencias sedimentarias neógenas que se disponen cubriendo diversos depocentros sedimentarios paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos dispuestos sobre bloques basamentales gondwánicos (Wiens, 1985; Chebli *et al.*, 1999). En el Chaco Oriental subhúmedo, su superficie está tapizada de bosques, sabinas de pastos altos y pantanos y, en el Chaco Occidental, semiárido, con árboles xerófilos, cactus y pastos resistentes (Iriondo, 1993). De este modo, la interpretación de los rasgos de su subsuelo solo puede ser realizada de modo indirecto a partir de relevamientos geofísicos relacionados con la exploración de hidrocarburos y transectas de relevamientos gravimétricos y magnetotelúricos. La expresión superficial es muy monótona con rasgos topográficos muy sutiles como las Lomadas de Otumpa (Peri y Rossello, 2010).

El presente estudio tiene el objetivo de realizar una revisión geológica regional del Lineamiento Transbrasilián (LTB) y analizar las relaciones espaciales que guardan la sismicidad con la convergencia entre las placas de Nazca y Sudamericana. Este análisis se basa en las intensidades y profundidades de los sismos registrados en los últimos años y particularmente del recientemente ocurrido en las inmediaciones del límite internacional entre Paraguay y Argentina.

MARCO REGIONAL

La llanura Chacopampeana, en sentido amplio, es parte de un gran antepaís, que recibió desde el Mioceno sedimentos provenientes del levantamiento andino y que hoy constituye mayormente el lugar de tránsito de esos sedimentos hacia la plataforma y talud continental Atlántico. Sin embargo, en la actualidad parece tener desde el punto de vista de la dinámica cortical, una tendencia negativa a probablemente neutra (Chebli *et al.* 1999; Iriondo, 1999; Rossello, 2018). Esta aparente falta de movilidad tectónica, no fue permanente en el pasado, donde dominaron desde el Paleozoico inferior, varios episodios de subsidencia, con leves y localizados levantamientos tectónicos, que dieron origen a una columna estratigráfica bastante completa para un área de supuestamente poca movilidad, y algunas discordancias angulares notables (Wiens, 1985; Ramos, 1988; Pezzi y Mozetic, 1989; França *et al.*, 1995; Chebli *et al.*, 1999).

La sucesión sedimentaria total registra a escala regional diferentes depocentros que confieren al basamento una forma de grandes y amplias cubetas separadas por altos o dorsales. La información geológica del subsuelo de la Llanura Chacopampeana disponible consiste solamente en perfiles de pozos de exploración petrolera (*e.g.* Sachayoj, Coronel Rico, Árbol Blanco, Gancedo, Las Breñas, Las Mochas, etc.) y algunas líneas

de sísmica 2D de reflexión que, por la calidad de origen, solo permiten trazar un diseño esquemático de las secuencias tectosedimentarias del Paleozoico y Mesozoico (Russo *et al.*, 1979; Pezzi y Mozetic, 1989; Chebli *et al.*, 1999). El basamento de la llanura Chacopampeana forma parte del sector Occidental del Gondwana, constituido por un collage de terrenos de diferentes épocas reunidos desde finales del Neoproterozoico hasta el Cámbrico separados por cinturones deformativos que estuvieron activos durante la evolución precámbrica del Gondwana limitando bloques cratónicos preexistentes (Cordani *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2007; Tohver *et al.*, 2010, 2012; Trindade *et al.*, 2006).

El Lineamiento Transbrasilián (LTB) es un corredor de megacizallamientos muy extenso en América del Sur que constituye una sutura de escala continental generada por el proceso de aglutinación de los cratones precursores del Gondwana Occidental (Alkmim *et al.*, 2001; Cordani *et al.*, 2016; D'Agrella-Fihlo *et al.*, 2021). Schobbenhaus *et al.* (1975) acuñaron el nombre “Lineamiento Transbrasilián” al compilar el mapa tectónico de Brasil y señalan su extensión en gran parte del continente, razón por la cual es considerado uno de los lineamientos tectónicos más largos del mundo (Cordani *et al.*, 2013a). El Lineamiento Hoggar-Kandi (LHK), definido por Black y Legeois, (1993) es su continuación en África, previamente al desmembramiento Gondwánico (Figural).

El LTB finaliza en Brasil en el noreste de la placa Sudamericana, dentro de la plataforma continental Atlántica (Figura1A). Si se restituye la posición de los continentes Sudamericano y Africano a los tiempos previos al desmembramiento Gondwánico, la localización del LTB continua en el LHK (Kröner y Cordani, 2003; Cordani *et al.*, 2003, 2013a, 2013b; Curto *et al.*, 2014) (Figura 1B). Al NO del cratón San Francisco, Santos (2017) señala la presencia de rocas eclogíticas afines a las que se encuentran al otro lado del Atlántico en la región de Hoggar, así como con los cizallamientos y rocas metamórficas de alta presión localizadas al oeste del lineamiento Kandi-Hoggar (Figura 1C). Estas analogías petrológicas asociadas con la traza del LTB indican una concordancia a ambos lados del Atlántico.

En Brasil, el LTB representa una discontinuidad de escala continental de rumbo NE-SO que se desarrolla desde el extremo NE en el estado de Ceará asociada con rocas metamórficas de alto grado (Cordani, 2009). Continúa a través de la cuenca Paranaíba, de los estados de Tocantins y Goiás, hasta el noroeste de la cuenca del Paraná en Mato Grosso do Sul. En el territorio de Paraguay se dispone entre los cratones del Río Apa y Río Tebicuary (Alvarenga *et al.*, 2000) y continúa hacia el sur en Argentina, aunque no se expone superficialmente (Santos, 2017).

Según Ramos (1988), Cordani (2009), Campanha *et al.* (2010) y Cordani *et al.* (2010, 2013a), la localización del LTB resulta claramente visible en el centro y noreste de Brasil mediante la disposición de una serie de anomalías magnéticas de baja amplitud de escala continental, rastreables a través del país en sentido NE-SO, obtenidas de satélites y reportadas por

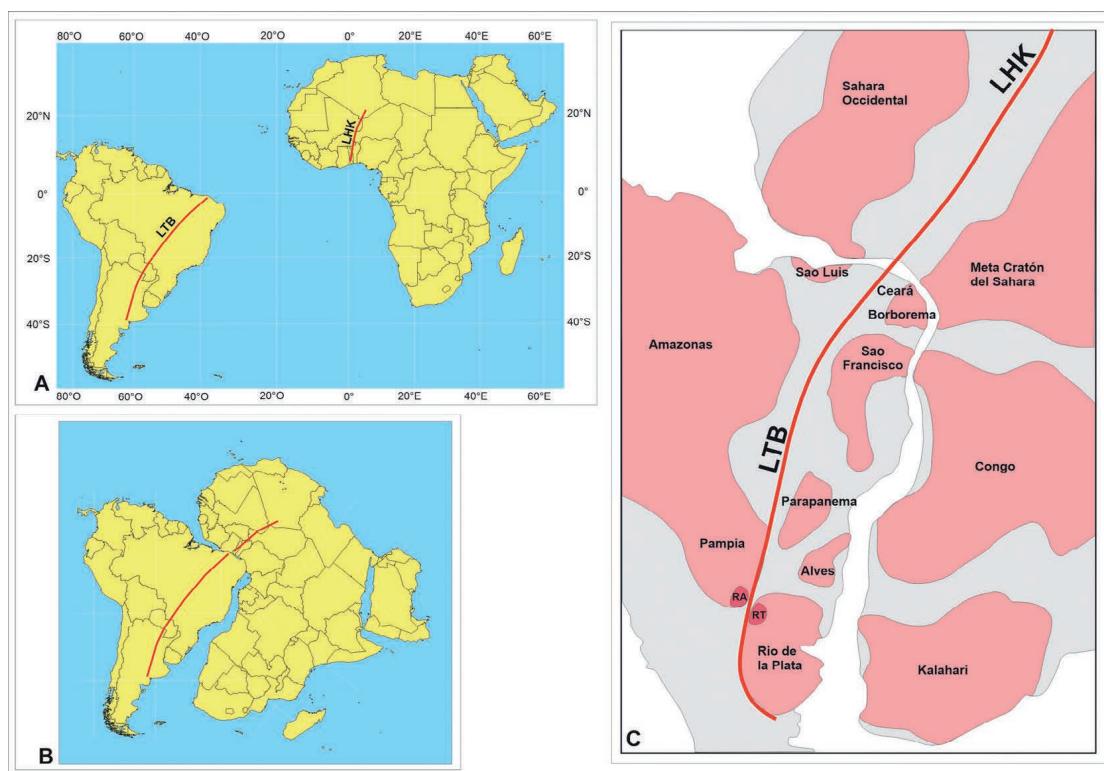


Figura 1. A: La traza del Lineamiento Transbrasiliense (LTB) en América del Sur y el Lineamiento Hoggar-Kandi (LHK) en África Occidental (modificado de Cordani *et al.*, 2016). B: Localización de los lineamientos previamente al desmembramiento Gondwánico. C: Modelo de bloques cratónicos (rosados) y cinturones móviles (grises) en Brasil, Paraguay y Argentina, donde el LTB separa a los grupos de Amazonia y Pampia (occidentales) de los bloques de Parapanema y del Río de la Plata (orientales). RA: Cratón Rio Apa. RT: Cratón Rio Tebicuary (Modificado de Cordani, 2013a y Granja *et al.*, 2018).

Fairhead y Maus (2003), alcanzando en algunos lugares de Brasil hasta 350 km de ancho (Mantovani *et al.*, 2005). También los relevamientos gravimétricos exhiben una distribución de anomalías que permiten interpretar la localización del LTB entre los bloques cratónicos Río Apa y Río Tebicuary (Godoy *et al.*, 2009).

En Paraguay, el LTB se asocia espacialmente con el cinturón Paraguay –Araguaia resultante de la colisión entre los cratones Amazonas y Parapanema (Geraldes *et al.*, 2015) dispuesto en sentido N-S, al este del cratón Río Apa (Fúlfaro, 1996; Godoy *et al.*, 2009). Al oeste del cratón Río Tebicuary, el LTB se localiza donde se aprecian lineamientos NNE-SSO con rocas siliciclásticas y carbonáticas con plegamientos asociados (Orué, 1996; Gadea-Villalba, 2021) (Figura 2).

El origen del LTB está vinculado con el cierre oceánico que existió en el Neoproterozoico entre los cratones, dominios sedimentarios y volcánicos sedimentarios, muchos de los cuales fueron transformados en cinturones móviles caracterizados por rocas con intensos grados de metamorfismo (Alkim *et al.*, 2001; Cordani, 2009; Tohver *et al.*, 2012; Ganade de Araujo *et al.*, 2014; D’Agrella-Filho y Cordani, 2017; D’Agrella-Filho *et al.*, 2021;

Schmitt *et al.*, 2021). Estos cratones y sus cinturones asociados constituyen los mayores rasgos anisotrópicos regionales de la actual corteza continental de las placas Sudamericana y Africana (Figura 2). La deformación y el metamorfismo asociado a esta reorganización cratónica ocurrió entre 550 y 500 Ma y se atribuye a los estadios finales de la Orogenia Brasiliana–Pan Africana (Trouw y De Wit, 1999). Se considera que el ensamble de los cratones de Amazonas, Río Apa, Pampia y los cratones africanos ocurrió en 528 Ma, al tiempo del cierre del Océano de Clymene (Trindade *et al.*, 2006; Tohver *et al.*, 2006, 2010; Warren, 2011).

El análisis estructural de elementos planares, lineales y fallas inversas de rumbo N-S indican un acortamiento (Alvarenga *et al.*, 2000) con transporte tectónico hacia el NO (en dirección al Cratón Amazonas). Cordani *et al.* (1984), Brito Neves *et al.* (1999) y Mantovani y Brito Neves (2005) sugieren que el LTB separa hacia el oeste las rocas supracorticales del Cratón Río Apa del fragmento cratónico de Parapanema hacia el este (Cordani, 2009). El basamento de las unidades cratónicas al sur de Brasil y la parte norte de Paraguay (Cratón Río Apa), está constituido por gneises intruídos por monzodioritas con edades Paleoproterozoicas y reactivado por deformación y metamorfismo durante el ciclo Brasiliano tardío (Cordani, 2009).

En la Llanura Chaco pampeana que se extiende desde los confines australes del Paraguay y básicamente en Argentina, el LTB pierde expresión superficial debido a la extensa cubierta meso-cenozoica (Wiens, 1985; Chebli *et al.*, 1999) (Figura 2). Sin embargo, se interpreta su existencia sobre la base de datos del subsuelo proporcionados por relevamientos geofísicos aeromagnéticos (Fairheady Maus, 2003; Curto *et al.*, 2014) y por la información producida por la exploración petrolera (Chebli *et al.*, 1999). Cuatro pozos exploratorios, ubicados en el oriente y centro de la provincia de Córdoba, alcanzaron rocas ígneas del basamento cristalino con edades de 2.3-2.0 Ga que confirmaron una afinidad con afloramientos del Cratón del Río de la Plata (CRP) en Tandilia y Uruguay y terrenos brasileños (Rapela *et al.*, 2007, 2011). En la provincia de Formosa los pozos de exploración no alcanzaron el basamento cristalino, por lo cual, no hay evidencia directa que apporte características petrotectónicas de la presencia del CRP en esta zona (Russo *et al.*, 1979). El cratón Río Tebicuary (Paraguay) es considerado como la expresión más septentrional del CRP (Figura 2) caracterizado por rocas del Proterozoico superior (Cordani *et al.*, 2001).

Pezzi y Mozetic (1989) y Chebli *et al.* (1999) documentaron la existencia de la cuenca eopaleozoica Las Breñas. Este depocentro se caracteriza por conformar un hemigraben asimétrico elongado en dirección NE-SO ubicado en el centro de las provincias de Chaco y Formosa (Figura 3). A partir de pozos exploratorios y evidencias sismoestratigráficas se puede diferenciar una sucesión de secuencias sedimentarias precámbricas, silúricas, devónicas, carboníferas y meso-cenozoicas con un espesor total de más de 5.000 m dispuestas sobre el basamento cristalino. Sobre el extremo sudoccidental se localiza el relieve muy suave (del orden de decenas de metros)

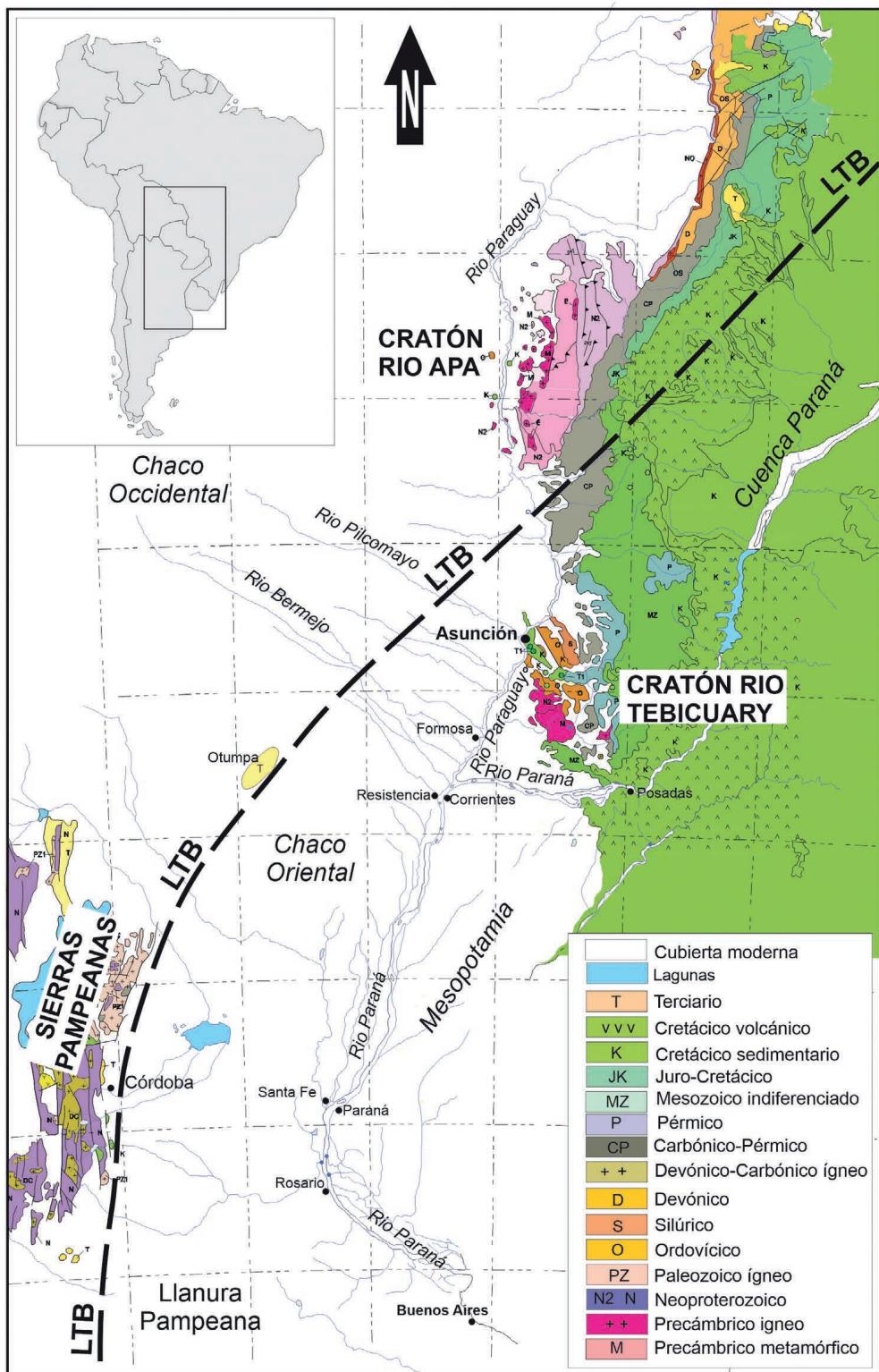


Figura 2. Mapa geológico de la región estudiada de la Llanura Chacopampeana extraído del Mapa Geológico de Sudamérica (basado en Gómez Tapia et al., 2023). Se indica la localización del Lineamiento Transbrasiliense (línea negra segmentada: LTB).

de las Lomadas de Otumpa que resultan del ascenso relativo del basamento debido a la reactivación del fallamiento controlante del hemigraben de Las Breñas con componente transcurrente dextral (Rossello y Bordarampé, 2005; Rossello *et al.*, 2007; Peri y Rossello, 2010; Peri *et al.*, 2013, 2015).

Las Lomadas de Otumpa (Figura 3A), poseen una disposición general elongada en dirección NNE y adquieren una morfología de suaves cuchillas entre las localidades de Sachayoj y Girardet ($26^{\circ} 45'$ - $28^{\circ} 00'$ Sur y $61^{\circ} 45'$ - $62^{\circ} 00'$ O). Rossello *et al.* (2007) realizaron perfiles topográficos estratégicos a través de los relieves para caracterizar su morfología, puesto que las pendientes de los faldeos son menores al grado. Las Lomadas de Otumpa están constituidas por i) una estribación oriental mayor con diseño ligeramente arqueado con su lado convexo hacia el este con alturas variables desde 195 m s.n.m. en su extremo Norte (próximo a la localidad de Sachayoj) hasta 167 m en su extremo sudoccidental (próximo a la localidad de Girardet) y ii) una estribación occidental menor con cota máxima de 160 m s.n.m. que se dispone subparalelamente al tramo septentrional de la anterior separada por una depresión (Rossello y Bordarampé, 2005). Estos rasgos topográficos se aprecian muy bien en modelos topográficos digitales 3D con vista basculada hacia el Norte donde se reconoce la disposición y morfología de las Lomadas de Otumpa en toda su extensión (Figura 3B).

Se considera que el origen de estos rasgos topográficos en medio de las planicies del Chaco está relacionado con la reactivación transpresional de antiguos fallamientos normales (Falla Las Breñas). Estas controlaron de modo sintectónico la sedimentación paleozoica que rellenó el Hemigraben Las Breñas y produjeron el ascenso del Alto Pampeano hacia el occidente. La interpretación de líneas sísmicas 2D que lo atraviesan permite identificar estos rasgos cuyo mayor fallamiento occidental coincide con la traza del LTB (Figura 3C).

Relevamientos magnetotelúricos de largo período obtenidos sobre un perfil O-E ($29^{\circ} 30'$ S) que cruzan la sierra de Ambargasta-Sumampa y la Llanura Chacopampeana (Figura 4) exhiben información coincidente con el LTB (Peri *et al.*, 2015). De este modo, se identifica una discontinuidad (500-2000 Ohm) en la corteza media-inferior de 20 km de ancho que separa dos bloques resistentes: i) el Cratón del Río de La Plata (6.000-20.000 Ohm) hacia el este, y ii) el Terreno Pampia (5.000-20.000 Ohm) hacia el oeste. Favetto *et al.* (2008) consideran que la faja más conductora que expresa el perfil representa el límite tectónico entre ambos cratones asociado con el LTB. Además, mediante la detección de un elevado contraste eléctrico entre la corteza y el manto superior fueron identificadas diferentes profundidades del Moho (40 km al oeste y 35 km al este). Este último, muestra una estructura más resistiva debajo del Cratón del Río de La Plata que pudo haberse originado por delaminación estacionaria por la presencia de litósfera hidratada (Favetto *et al.*, 2008).

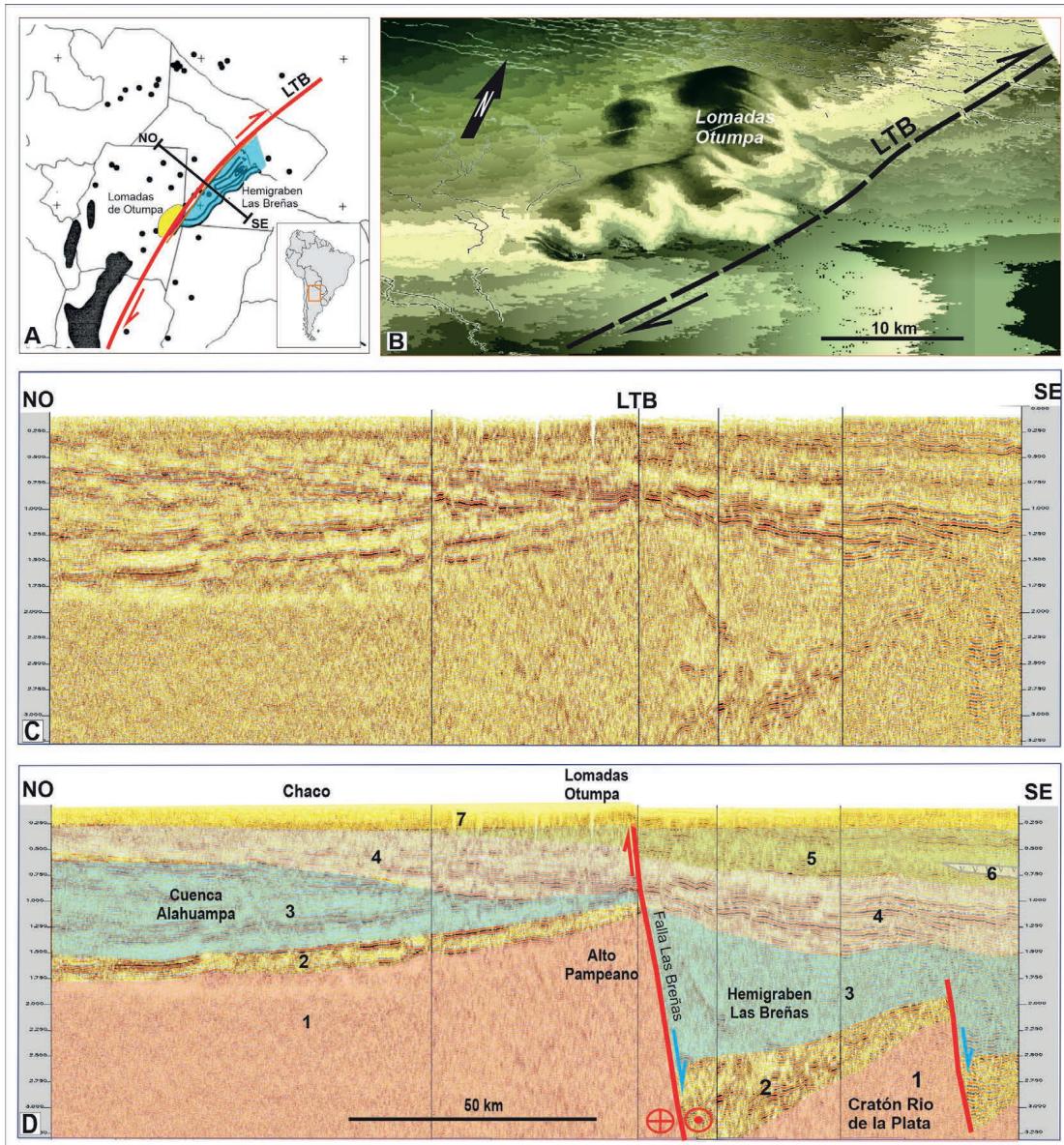


Figura 3. A: Localización del hemigraben paleozoico de Las Breñas (área rosada) las Lomadas de Otumpa(área amarilla) y de las transectas de C y D. Los puntos indican la localización de sondeos exploratorios.B: Modelo digital topográfico de las Lomadas de Otumpa. C: Sección sísmicaregional integrada de varios relevamientos 2D a través de los rasgos anteriores. D: Interpretación de la anterior donde la Falla Las Breñas que coincide con la traza del LTB separa los depocentros de la Cuenca Alahuampa y el Hemi-graben Las Breñas.1: basamento cristalino. 2: secuencias del Precámbrico sedimentario?.3: secuencias silúrico-devónicas. 4: secuencias del Paleozoico superior. 5: secuencias meso-cenozoicas. 6: filones capa basálticos asociados con el volcanismo cretácico de la Formación Serra Geral (modificado de Rossello *et al.*, 2007).

Los perfiles magnetotelúricos y gravimétricos en la provincia de Córdoba (Figura 4) revelaron también la presencia de discontinuidades corticales que son interpretadas como el límite occidental del CRP y que podrían corresponder al LTB (Booker *et al.*, 2004; Favetto *et al.*, 2008; Ramé y Miró, 2011; Orozco *et al.*, 2013, Peri *et al.*, 2013, 2015; Burd *et al.*, 2013).

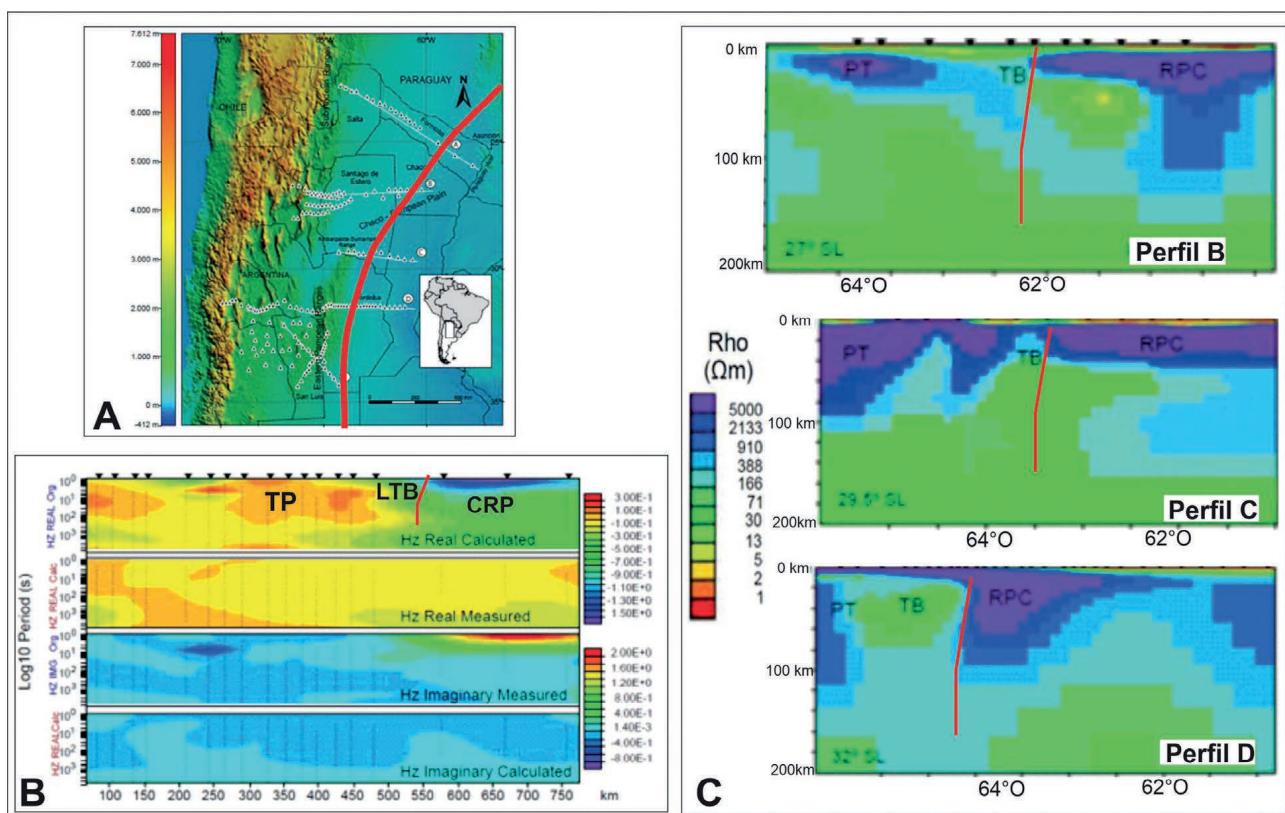


Figura 4. Perfiles magnetotelúricos. A: Localización de los perfiles MT a través del LTB (línea discontinua roja)sobre un modelo de elevación digital (DEM) de América del Sur. Los triángulos negros son los sitios de MT y las líneas blancas representan los perfiles de MT (tomada de Favetto *et al.*, 2015). B: Perfil A (tomado de Favetto *et al.*, 2015). C: Perfil B (tomado de Peri *et al.*, 2013). Perfil C (tomado de Peri *et al.*, 2015) y D (tomados de Favetto *et al.*, 2008 y Orozco *et al.*, 2013). CRP: Cratón del Río de la Plata; PT: Terreno Pampia. TB: Lineamiento Transbrasiliense.

El CRP es la unidad precámbrica más austral de América del Sur y se ubica en la mayor parte de las reconstrucciones paleogeográficas en el centro del extremo sudoccidental de Gondwana (Cordani *et al.*, 2003; Tohver *et al.*, 2006, 2010; Trindade *et al.*, 2006). Es difícil identificar los límites occidentales del CRP mediante observaciones directas porque en su mayor parte está cubierto por una secuencia potente de sedimentos modernos. Sin embargo, los relevamientos geofísicos y pozos exploratorios que permitieron obtener material para estudios geocronológicos indican que el borde occidental de este cráton está en contacto con el basamento cristalino del Paleozoico temprano de las Sierras Pampeanas Orientales (Booker *et al.*, 2004; Rapela *et al.*, 2007; Oyhantçabal *et al.*, 2010; Rapela *et al.*, 2011).

METODOLOGÍA Y DATOS SISMOLÓGICOS

Para la realización de este trabajo se consultaron varios trabajos disponibles sobre las características geológicas regionales de la Llanura Chacopampeana. Con la finalidad de aportar sobre el marco tectónico relacionado con el Li-

neamiento Transbrasilián se utilizaron, además de la cartografía geológica regional disponible, varias transectas magnetotelúricas realizadas a través del LTB en la región Chacopampeana (Groom *et al.*, 1993; Booker *et al.*, 2004; Favetto *et al.*, 2008, 2015; Ramé y Miró, 2011; Orozco *et al.*, 2013, Peri *et al.*, 2013 y 2015, Burd *et al.*, 2013). También, la región de las Lomadas de Otumpa y del hemigraben de Las Breñas proporcionan información clave del LTB en medio del Chaco (Rossello y Bordarampé, 2005; Rossello *et al.*, 2007; Peri y Rossello, 2010; Peri *et al.*, 2013, 2015).

Se consultó la información disponible de los sismos registrados a partir de diferentes fuentes, particularmente, de la American Geophysical Union (AGU, 2018), Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES, 2019), Sismicidade Brasileira (SISBRA, 2019) y United States Geological Survey (USGS, 2023). De este modo, se compendieron unos 6.368 sismos con magnitudes superiores a 3M del margen occidental de la Placa Sudamericana, particularmente de la región andina y subandina comprendida entre las latitudes 23° y 34° Sur. Para evitar la inclusión de todos los sismos involucrados en el presente análisis debido al enorme espacio que involucraría, se recomienda consultarlos directamente desde las correspondientes páginas disponibles en Internet (por ejemplo, del USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>). También, se utilizó el catálogo confeccionado por Fugarazzo *et al.* (2021), que incluye prácticamente todos los sismos registrados instrumentalmente en Paraguay desde principios de los años 1990. Este compendio incluye 45 eventos sísmicos con buena precisión obtenidos por el Laboratorio de Sismología de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción (FaCEN-UNA) e instituciones de monitoreo sísmico regional.

Paraguay dispone a partir de 1980 de una estación sismográfica de la red de ITAIPU integrada actualmente por seis estaciones remotas, tres de las cuales se localizan en el territorio brasileño y tres en la región paraguaya (Fugarazzo *et al.*, 2021). Las primeras mediciones refinadas de sismos paraguayos fueron llevadas a cabo por Assumpção y Suárez (1988), con el objeto de analizar la naturaleza del mecanismo focal del sismo ocurrido el 8 de abril de 1982 en el bajo Chaco. Assumpção (1992) determina el mecanismo focal para otro evento chaqueño acaecido el 12 de abril de 1985. Luego, Vélosio *et al.* (1994) realizan una primera evaluación de la sismicidad del Paraguay. También, Velázquez *et al.* (2009) realizan un recuento de las actividades que hacen al desarrollo de la sismología en Paraguay y el último inventario fue elaborado por Caballero (2018).

RESULTADOS

La revisión de los sismos registrados y disponibles a partir de diferentes fuentes en la región de la llanura Chacopampeana pudo determinar distribuciones muy particulares de dos clústers con características sismogénicas

muy diferentes basados en el análisis de las características y localizaciones de los sismos y el contexto geotectónico de la región (Figura 5).

Clúster de sismos profundos

Están relacionados con las fases activas de la tectónica Andina (Cobbold *et al.*, 2007; Tassara y Echaurren, 2012). Exhiben mayores magnitudes y con epicentros profundos localizados sobre el margen occidental de la cuenca Chaco-Pampeana dispuestos a lo largo de un sector submeridiano (Tassara *et al.*, 2006). De acuerdo con el ángulo de subducción de la Placa de Nazca de unos 30° (Cahill e Isacks, 1992; Ramos y Folguera, 2009) y la distancia de unos 500 km donde ocurren los sismos con respecto a la ubicación de la fosa de Chile se estima que la profundidad de sus epicentros es del orden de 500 a 700 km (Figura 5). Esta localización es coincidente con los confines profundos del frente oriental (*fronts lab*) de la Placa de Nazca, donde los tramos más antiguos de la Placa de Nazca pierden identidad mecánica al asimilarse con la fluidez de la astenosfera (Richardson *et al.*, 2013).

Clúster de sismos someros

Estos sismos son de bajas magnitudes y profundidades focales someras de tipo intraplaca en coincidencia geográfica con la traza del LTB (Figura 3).

En la zona que bordea el sector sudoriental del cráton del Río Apa y el noroccidental del Río Tebicuary, se localizaron los sismos registrados coincidentemente con la traza propuesta del LTB. La mayor cantidad de sismos históricos en el Paraguay (Figura 5) ocurren especialmente en el Chaco, particularmente en proximidades del río Pilcomayo y en la zona oriental de Alto Paraguay, los que ya fueron mencionados por Rengger en 1835 (Tomasini y Braunstein, 2010). Más recientemente, los mayores sismos percibidos por la población se registraron en 1982 y 1989, donde el primero con una intensidad de Mb 5.2 tal vez sea el de mayor relevancia por el efecto que tuvo en la ciudad capital y alrededores (Fugarazzo *et al.*, 2021). Berrocal y Fernandes (1996) destacan los sismos de mayor relevancia en relación a la sismología del Paraguay y proponen posibles fuentes sismogénicas en función de sus profundidades. Barros *et al.* (2001) realizan un historial de los sismos ocurridos en Paraguay con datos del Observatorio Sismológico de la Universidad de Brasilia (OSB) en complemento con algunos pocos registros del catálogo del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

La continuación austral, en territorio argentino, se localiza coincidiendo con la traza de la falla extensional en el subsuelo que se interpreta limitando por el oeste el relleno sedimentario del Hemigraben Las Breñas (Rossello *et al.*, 2007). Los estudios magnetotelúricos asociados con relevamientos gravimétricos (Figura 4) revelaron la presencia de discontinuidades corticales en la porción occidental de la Placa Sudamericana interpretadas como el límite entre el CRP y el Terreno Pampia (PT) (Favetto *et al.*, 2008,

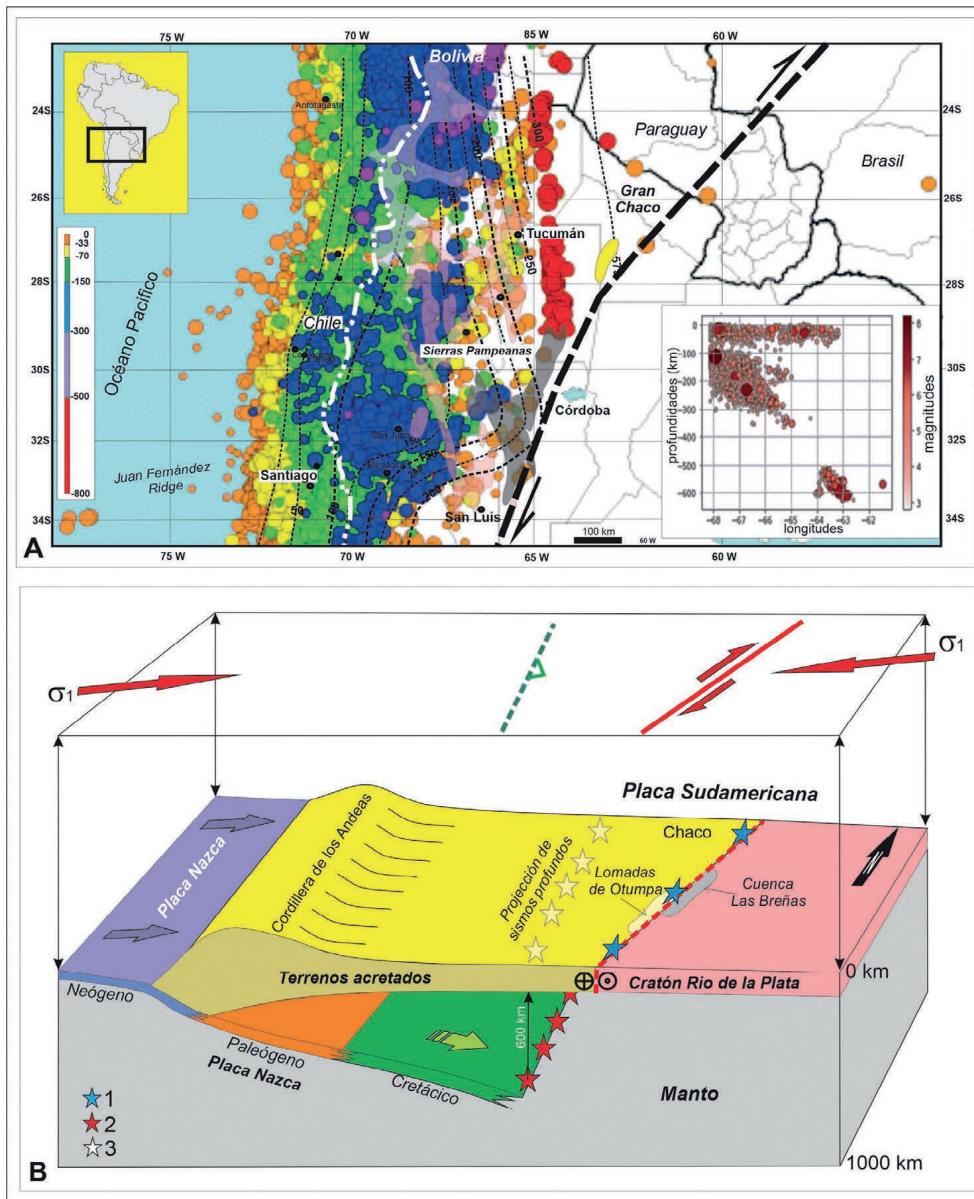


Figura 5. A: Mapa con la ubicación de la totalidad de los 6.368 sismos analizados (AGU, 2018; INPRES, 2019; SISBRA, 2019) con magnitudes superiores a 3M y discriminados por la profundidad de sus hipocentros (datos del USGS). La línea de guiones indica la posición estimada del LTB. Las líneas punteadas finas la profundidad del tope de la placa de Nazca. Inserto: transecta donde se disponen según su profundidad los sismos entre las latitudes 18° y 35°. **B:** Modelo interpretativo de los dos clústeres de sismos registrados en la región Chacopampeana. Estrellas azules: sismos someros de intraplaca, Estrellas rojas: sismos profundos del frente de la Placa de Nazca. Estrellas blancas: proyección a la superficie de sismos profundos.

2015; Ramé y Miró, 2011; Orozco *et al.*, 2013; Peri *et al.*, 2013, 2015; Burd *et al.*, 2013).

El Lineamiento Transbrasiliense puede continuarse a lo largo del borde oriental de las Sierras Pampeanas y más al sur sobre el borde occidental de las Sierras Australes (Figura 1). Así, coincide con el contacto tectónico entre el Cráter del Río de la Plata y el Terreno Pampia (Kröner

y Cordani, 2003; Feng *et al.*, 2004; Rapela *et al.*, 2007; Favetto *et al.*, 2008, 2015; Ramos *et al.*, 2010; Perarnau *et al.*, 2012; Martino *et al.*, 2016). El extremo austral del Cratón del Río de la Plata (CRP) permaneció como margen pasivo hasta el Pérmico, cuando terrenos continentales patagónicos convergieron durante la orogenia Gondwánica (Trouw y de Wit, 1999; Ramos, 1988).

Se considera que los sismos someros se vinculan con la dinámica de reactivaciones Andinas de mega fallamientos entre bloques cratónicos Gondwánicos equivalentes a los que determinan los bloques de las Sierras Pampeanas (Costa *et al.*, 2001, 2018; Gilbert *et al.*, 2010; Ammiratia *et al.*, 2018). A partir de la relación angular que ofrece la dirección de convergencia por la subducción de la placa de Nazca estimada en torno a Az 75° (Herrera *et al.*, 2021; Saylor *et al.*, 2023) con respecto al rumbo submeridional del LTB se determina una componente de rumbo dextral regional (Figura 5). Esta cinemática es consistente con la determinada por Assumpção *et al.* (2016, 2019) para el evento del 8 de abril de 1982.

Assumpção y Sacek (2013) determinan que el sismo del 8 de abril de 1982 fue de Mb 5.2 (Mb 4.9), con epicentro a 12 km en el Chaco 24.80 S y 58.10 O, fue uno de los de mayor relevancia por su intensidad registrado en las proximidades de Asunción con incidencia social, debido a que efectivamente fue sentido en la ciudad y su área metropolitana. El interés de este sismo se basa en que Assumpção y Suárez (1988) pudieron identificar un mecanismo focal a partir de los sismogramas de la red canadiense (Kulhánek, 1990) y el USGS (2023). De este modo, se determinaron dos ejes nodales con incertidumbres menores a 20%, uno tensional de dirección 351/01 y otro compresional con dirección 81/03. Luego, Assumpção *et al.* (2016, 2019), complementaron el análisis determinando el campo de esfuerzos responsable a partir de la solución del mecanismo focal (Figura 6).

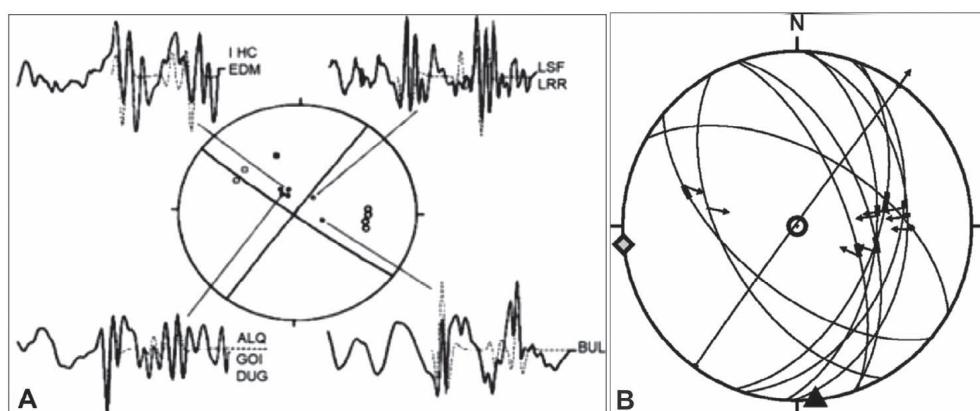


Figura 6. A: Sismograma y mecanismo focal del sismo del 8 de abril 1982 Mb 5.2 en la región del Chaco donde se aprecia que los planos nodales del evento señalan un sismo de naturaleza transcurrente (Assumpção y Suárez, 1988). B: Las principales orientaciones del campo de esfuerzos σ_1 (rombo gris), σ_2 (triángulo sólido) y σ_3 (círculo abierto), las flechas indican el movimiento de deslizamiento observado en el plano de falla (tomado de Assumpção *et al.*, 2016).

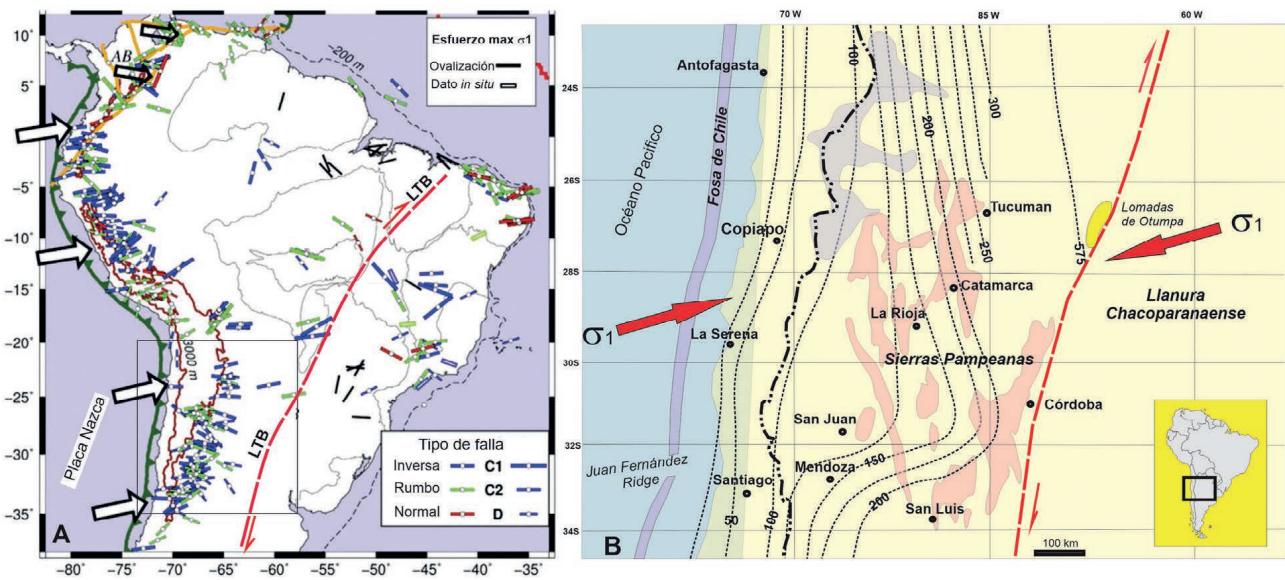


Figura 7. A: Datos del mecanismo focal para intraplaca de Sudamérica. Las barras azules y verdes indican la dirección compresional del campo de esfuerzo producido por la subducción de la Placa Nazca. Las barras rojas indican fallas normales. Las barras abiertas son mediciones *in situ* y de ovalizaciones de pozos. Las flechas grandes y pequeñas muestran la dirección de convergencia de las placas de Nazca y del Caribe, respectivamente, en relación con América del Sur (simplificado de Assumpção *et al.*, 2016.). B: Esquema de la relación de la convergencia de la placa de Nazca con la cinemática transcurrente dextral del LTB.

La dirección compresional 81/03 obtenida del mecanismo focal, es consistente con la orientación del esfuerzo principal máximo horizontal (σ_1) del campo de esfuerzos Andino. Como este sismo se localizó en las proximidades de la traza estimada del LTB proporciona una evidencia del posible origen desencadenante del evento. Además, este evento aporta un dato complementario del funcionamiento transcurrente dextral del LTB (Figura 7).

DISCUSIÓN

Los mecanismos focales de los terremotos intraplaca son las herramientas más comúnmente utilizadas para inferir la orientación del campo de esfuerzos regionales (Richardson *et al.*, 1979; Bergman y Solomon, 1984). Sin embargo, es necesario un gran número de eventos para establecer el campo de tensiones regional, no sólo porque se requiere promediar las fuentes locales, sino también porque los eventos de intraplaca tienden a nuclearse en zonas preexistentes de debilidad y fallas reactivadas (Sykes, 1978; Bergman y Solomon, 1980), en cuyo caso las tensiones liberadas por el terremoto (es decir, los ejes P y T de la solución del plano de falla) pueden no coincidir con las tensiones litosféricas regionales (McKenzie, 1969).

Los sismos registrados en el Paraguay se localizan en la región sudooriental del país y en la región occidental, que coincide con la cuenca del Chaco en proximidades del río Pilcomayo. Fugarazzo *et al.* (2021) conside-

ran que los sismos en Paraguay son prominentemente del tipo intraplaca, por encontrarse alejados de los bordes de las placas tectónicas y establecen determinísticamente que Paraguay es un país sísmico con características muy propias con eventos moderados débiles, microsísmicos o de percepción instrumental (Gadea *et al.*, 2018).

Assumpção *et al.* (2016) realizaron una recopilación de los mecanismos focales de los terremotos en Sudamérica y los vincularon con la actividad de fallas inversas (mayoritarias) o de desplazamiento de rumbo. En el suroeste de Brasil y en las cuencas Chacopampeana-Pantanal, el σ_1 tiende a orientarse aproximadamente de modo sublatitudinal (Figura 7). Si bien, existen varias hipótesis que intentan explicar las causas de los sismos de intraplaca, la de mayor aceptación es la propuesta por Sykes (1978, en França y Assumpção, 2008), basada en la existencia de una zona de debilidad mecánica cortical donde cualquier cambio del campo de esfuerzo local originaría un sismo. Otra hipótesis explica que la sismicidad intraplaca ocurre en zonas de concentración de esfuerzos regionales (Talwani, 2014). Muchas veces, la conjunción de estos factores (concentración de esfuerzos y zonas de debilidad) ocurren en una misma zona sísmica.

Las velocidades más bajas de las ondas P y S de la tomografía sísmica indican menor espesor de la litosfera, lo cual concentra esfuerzos en la corteza superior (Tassara y Echaurren, 2012). Así también, en la misma región se han reconocido anomalías gravimétricas isostáticas positivas, lo cual puede señalar una contribución de esfuerzos flexurales (semejante a la parte central de Brasil) para explicar esta zona sísmica (Assumpção *et al.*, 2019). Con respecto al origen de estos sismos someros se considera que se han producido por la acumulación de esfuerzos a lo largo de fallamientos corticales en tramos de mayor fricción y liberación súbita de energía (Assumpção *et al.*, 2004).

Assumpção *et al.* (2004, 2013, 2016, 2019) reconocieron por medio de tomografías sísmicas zonas en el entorno intraplaca, donde la concentración de hipocentros aumenta en zonas donde la litósfera presenta menor espesor y los módulos de las velocidades de las ondas P son menores. Según esta interpretación, el calor de la astenosfera aumenta la temperatura en la parte mantélica de la litosfera haciéndola más dúctil. Esto genera una concentración de esfuerzos en la corteza superior, más rígida, que genera zonas de propensión sísmica. Por su parte, Teixeira *et al.* (2009) consideran a estos sismos de intraplaca como reflejo de las tensiones compresivas y extensivas de los bordes de las placas y normalmente ocurren en profundidades someras, hasta 30/40 km con magnitudes bajas a moderadas.

En Brasil, especialmente en el centro y suroeste de su territorio, la distribución de sismos de intensidad baja a moderada ocurre a lo largo de algunos trechos del LTB. Assumpção y Sacek (2013) explican esta concentración de sismos en la presencia de deformaciones tectónicas coincidentes con altos gravimétricos y por adelgazamiento de la corteza terrestre que implica zonas de mayor debilidad como los factores determinantes de la

sismicidad. Además, cada manifestación de zonas sísmicas del tipo intraplaca guarda estrecha relación con las características de la tectónica local, aunque es muy variable de sitio en sitio (Assumpção *et al.*, 2019). Rocha *et al.* (2016) atribuyen una coincidencia de bajas velocidades de ondas P con bajos espesores de la corteza, y un total de espesor elástico efectivo de la corteza, como variables mecánicas que interactúan para generar sismicidad. Por ello, consideran relevante realizar estudios geofísicos adicionales con el fin de discriminar la sismogenética de los clusters y su relación con el comportamiento mecánico de la corteza, especialmente a aquellos que coinciden geográficamente con el LTB.

CONCLUSIÓN

A partir del análisis de la intensidad y profundidad de los hipocentros de los sismos registrados en la Llanura Chacoparanaense se reconocen dos clústeres con diferentes características: **i)** sismos someros (orden de 10 km), de intraplaca de baja intensidad (orden 3 - 4 Mb) y vinculados con reactivaciones transcurrentes de fallamientos precursores del LTB y **ii)** sismos muy profundos (orden de 600 km), de gran intensidad (orden 7 - 8 Mb), asociados con los confines de la subducción de la placa de Nazca. A partir de los antecedentes conocidos, los efectos de la sismicidad en la región Chacopampeana sobre la actividad humana no generan peligrosidad o perjuicios económicos significativos.

El Lineamiento Transbrasiliiano constituye una discontinuidad estructural de primera magnitud de la corteza continental que se pone de manifiesto a través de la placa Sudamericana. En Paraguay se dispone entre los bloques cratónicos Río Apa y Río Tebicuary. Su continuación austral en la región de la llanura Chacopampeana está inferida únicamente en el subsuelo a partir de información geofísica relacionada con exploración de hidrocarburos y relevamientos magnetotelúricos. Si bien se desconoce su traza exacta, resulta coincidente con el fallamiento que limita por el oeste al relleno sedimentario paleozoico del Hemigraben Las Breñas en el Chaco. Más al sur, se ubica la posición del LTB a lo largo del frente oriental de relieves de las Sierras de Córdoba. Su culminación austral se localiza sobre el occidente de las Sierras Australes de Buenos Aires limitando el Cratón del Río de la Plata.

La relación angular que exhibe la traza del LTB con respecto al campo de esfuerzos responsable de la convergencia Andina ENE-SOS de la placa de Nazca determina una componente transpresional con rumbo dextral, particularmente en el segmento localizado en la llanura Chacopampeana.

AGRADECIMIENTOS

Se desea dejar constancia de nuestro agradecimiento a los numerosos colegas que con sus comentarios y sugerencias contribuyeron con la realización de este trabajo. El tratamiento editorial, particularmente de un revisor anónimo, contribuyó enormemente con la claridad del texto y figuras al corregir y recomendar numerosas y oportunas modificaciones.

REFERENCIAS

- AGU(AmericanGeophysicalUnion). 2018. Advanced Earth and Space Science: Fall Meeting. Washington D.C. 10-14 December. <https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Home/0>
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Fonseca, M.A. 2001. Assembling West Gondwana in the Neoproterozoic: clues from the São Francisco craton region, Brazil. *Geology* 29(4): 319-322.
- Alvarenga,C., Veloso, C., Gorayeb, P., Matos, F. 2000. Paraguay and Araguaia belts. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (eds.), *Tectonic evolution of South America*. 31st International Geological Congress (Rio de Janeiro) 183-193.
- Ammiratia, J-B., Venerdinia, A., Alcacer, J.M., Alvarado, P. Miranda, S., Gilbert, H. 2018. New insights on regional tectonics and basement composition beneath the eastern Sierras Pampeanas (Argentine back-arc region) from seismological and gravity data. *Tectonophysics* 740-741: 42-52.
- Assumpção, M. 1992. The regional intraplate stress field in South America. *Journal of Geophysical Research* 97(B8):11889-11903.
- Assumpção, M., Suárez, G. 1988. Source mechanisms of moderate size earthquakes and stress orientation in mid-plate South America. *Geophysical Journal* 92:253-267.
- Assumpção, M., Schimmel, M., Escalante, C., Barbosa, J., Rocha, M., Barros, L. 2004. Intraplate seismicity in SE Brazil: Stress concentration in thin spots. *Geophysics Journal International* 159: 390-399.
- Assumpção, M., Sacek,V. 2013. Intra-plate seismicity and flexural stresses in central Brazil. *Geophysical Research Letters* 40(3): 487-491.
- Assumpção, M., Feng, M., Tassara, A., Juliá, J. 2013. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography. *Tectonophysics* 609: 82-96.
- Assumpção, M., Dias, F.L., Zevallos, I., Naliboff, J.B. 2016. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences* 71: 278-295.
- Assumpção, M., Gadea, M., Caballero, M., Portner, D., Rodríguez, E., Rocha, M. 2019. The seismic zone of Southern Paraguay with a revised catalogue: Another example of intra- plate activity in a lithospheric thin spot?. In: Bianchi, M.B., Assumpção, M.S., Chaves, C.A.M. (eds.),

- 3rd Brazilian Seismology Symposium. Vinhedo - SP / Brazil. Reports P. 73, 120 pp.
- Barros, L., Marza, V., Chimpliganond, C., Caixeta, D. 2001. Paraguay Seismicity During 2000. 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Conference Proceedings of the Salvador - BA / Brazil. 1312-1315.
- Bergman, E.A., Solomon, S.C. 1980. Oceanic intraplate earthquakes, implications for local and regional intraplate stress. *Journal of Geophysical Research* 85: 5389-5410.
- Bergman, E.A., Solomon, S.C. 1984. Source mechanisms of earthquakes near mid-ocean ridges from body waveform inversion and implications for the early evolution of oceanic lithosphere. *Journal Geophysical Research* 89: 11415-11441.
- Berrocal, J., Fernandes, C. 1996. Seismicity in Paraguay and neighboring regions. In: Comin-Chiaromonti, P., Gomes, C.B (eds.), *Alkaline magmatism in Central Eastern Paraguay – relationships with coeval magmatism in Brazil*. EDUSP, São Paulo, 57-66.
- Black, R., Liegeois, J. 1993. Cratons, mobile belts, alkaline rocks and continental lithospheric mantle: the Pan-African testimony. *Journal of the Geological Society* 150(1):89-98.
- Booker, J., Favetto, A., Pomposiello, C. 2004. Low electrical resistivity associated with plunging of the Nazca flat slab beneath Argentina. *Nature* 429: 399-403.
- Brito Neves, B., Da Costa, M., Fuck, R. 1999. From Rodinia to Western Gondwana: An approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes* 22(3): 155-166.
- Burd, A., Booker, J., Mackie, R., Pomposiello, C., Favetto, A. 2013. Electrical conductivity of the Pampean shallow subduction region of Argentina near 33°S: Evidence for a slab window. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14(8): 3192-3209.
- Caballero, M. 2018. *Sismicidad del Paraguay*. San Lorenzo: FACEN-UNA. Trabajo de Grado. 29 pp.
- Cahill, T., Isacks, B.L. 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research* 97 (B12): 17.503-17.529.
- Campanha, G., Warren, L., Boggiani, P., Grohmann, C., Arias, A. 2010. Structural analysis of the Itapucumí Group in the Vallemí Region, Northern Paraguay: Evidence of a New Brasiliano/Pan-African Mobile Belt. *Journal of South American Earth Sciences* 30(1):1-11.
- Chebli, G.A., Mozetic, M.E., Rossello, E.A., Buhler, M. 1999. Cuencas sedimentarias de la llanura Chacopampeana. En: Caminos, R. (ed.), *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR (Buenos Aires, Argentina), Anales 29 (20): 627-644.
- Cobbold, P.R., Rossello, E.A., Roperch, P., Arriagada, C., Gómez, L.A., Lima, C. 2007. Distribution, timing, and causes of Andean deformation across South America. In: Ries, A.C., Butler, R.W.H., Graham,

- R.H. (eds.), *Deformation of the continental crust: The legacy of Mike Coward*. Geological Society of London, Special Publications, 272: 321-343.
- Cordani, U.G., Brito-Neves, B.B., D'Agrella-Filho, M.S. 2001. From Rodinia to Gondwana: a review of the available evidence from South America. *Gondwana Research* 4: 600-602.
- Cordani, U.G., D'Agrella-Filho, M.S., Brito-Neves, B.B., Trindade, R.I.F. 2003. Tearing up Rodinia: the Neoproterozoic palaeogeography of South American cratonic fragments. *Terra Nova* 15(5): 350-359.
- Cordani, U., Brito Neves, B., Fuck, R., Porto, R., Thomaz Filho, A., Bezer-rada Cunha, A. 1984. Estudo preliminar de integração do Pré Cambriano com eventos tectónicos das bacias sedimentares brasileiras. Rio de Janeiro: PETROBRAS. *Ciência Técnica Petróleo: Exploração de Petróleo* 15:1-70.
- Cordani, U. 2009. From Rodinia to Gondwana: Tectonic significance of the Transbrasiliiano Lineament. *Boletim de Resumos Expandidos do Simpósio 45 anos de Geocronologia do Brasil*. São Paulo, Brasil: Instituto de Geociencias, 32-40.
- Cordani, U., Teixeira, W., Colombo, C., Tassinari, G., Coutinho, J., Amarillo, S. 2010. The Rio Apa Craton in Mato Grosso do Sul (Brazil) and Northern Paraguay: Geo-chronological evolution, correlations and tectonic implications for Rodinia and Gondwana. *American Journal of Science* 310(9): 981-1023.
- Cordani, U.G., Pimentel, M., Ganade de Araújo, C., Fuck, R. 2013a. The significance of the Transbrasiliiano-Kandi corridor for the amalgamation of Western Gondwana. *Brazilian Journal of Geology* 43(3): 583-597.
- Cordani, U.G., Pimentel, M.M., Ganade de Araújo, C.E., Basei, M.A.S., Fuck, R.A., Girardi, V.A.V. 2013b. Was there an Ediacaran Clymene Ocean in central south America? *American Journal of Sciences* 313: 517-539.
- Cordani, U.G., Ramos, V.A., Fraga, L.M., Cegarra, M., Delgado, I., de Souza Gomes, F.E.M., Schobbenhaus,C. 2016. Tectonic map of South America: explanatory notes, scale 1:5.000.000. (2ed.). Paris, France: Commission for the Geological Map of the World. 16 pp.
- Costa, C., Murillo, V., Sagripanti, G., Gardini, C. 2001. Quaternary intraplate deformation in the south- eastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of Seismology* 5: 399-409.
- Costa, C., Owen, L.A., Ricci, W.R., Johnson, W.J., Halperin, A.D. 2018. Holocene activity and seismogenic capability of intraplate thrusts: Insights from the Pampean Ranges, Argentina. *Tectonophysics* 737: 57-70
- Curto, J., Vidotti, R., Fuck, R., Blakely, R., Alvarenga, C., Dantas, E. 2014. The tectonic evolution of the Transbrasiliiano Lineament in Northern Paraná Basin, Brazil, as Inferred from Aeromagnetic Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 119(3): 1544-1562.
- D'Agrella-Filho, M.S., Cordani, U.G. 2017. The Paleomagnetic record of the São Francisco-Congo Craton. In: Heilbron, M., Cordani, U.G., Alk-

- mim, F.F. (eds.), *Sao Francisco Craton, Eastern Brazil*. Regional Geology Reviews. Ch. 16: 305-320. Springer.
- D'Agrella-Filho, M.S., Antonio, P.Y.J., Trindade, R.I.F., Teixeira, W., Bispo-Santos, F. (2021). The Precambrian drift history and paleogeography of Amazonia. In: Pesonen, L.J., Salminen, J., Elming, S.A., Evans, D.A.D., Veikkolainen, T. (eds.), *Ancient supercontinents and the paleogeography of Earth*, 6: 207-247. Elsevier Pub.
- Fairhead, J., Maus, S. 2003. CHAMP Satellite and Terrestrial Magnetic data help define the tectonic model for South America and resolve the lingering problem of the Pre-Break-Up fit of the South American Ocean. *The Leading Edge* 22(8): 779-783.
- Favetto, A., Pomposiello, C., Lopez de Luchi, M., Booker, J. 2008. 2D magnetotelluric interpretation of the crust electrical resistivity across the Pampean terrane - Río de la Plata suture, in central Argentina. *Tectonophysics* 459: 54-65.
- Favetto, A., Rocha, V., Pomposiello, C., García, R., Barcelona, H. 2015. A new limit for the NW Río de la Plata Craton Border at about 24°S (Argentina) detected by Magnetotellurics. *Geologica Acta* 13 (3): 243-254. DOI: 10.1344/Geologica Acta2015.13.3. 6
- Feng, M., Assumpção, M., Van Der Lee, S. 2004. Group velocity tomography and lithospheric S-velocity structure of the South American continent. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 147(4): 315-331.
- França, A.B., Milani, E.J., Schneider, R.L., López-Paulsen, O., López, M. J., Suárez-Soruco, R., de Santa-Ana, H., Weins, F., Ferreiro, O., Rossello, E.A., Bianucci, H.A., Aramayo-Flores, R.F., Vistalli, M.C., Fernández-Seveso, F.A., Fuenzalida, R.P., Muñoz, N. 1995. Phanerozoic correlation in Southern South America. In: Tankard, A.J., Suárez-Soruco, R. & Welsink, H.J. (eds.), *Petroleum basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists (Tulsa, USA), Memoir N° 62, 129-161.
- França, G., Assumpção, M. 2008. Reflexos no Brasil de terremotos distantes. *Ciência Hoje* 42(249): 21-25.
- Fugarazzo, R., Gadea, M., Caballero, A., Assumpção, M., Figueres, V. 2021. Las zonas sísmicas en Paraguay. *Reportes científicos de la FACEN* 12(1):10-20. <http://doi.org/10.18004/rcfacen2021120110-20>
- Fúlfaro, V.J. 1996. Geology of Eastern Paraguay. In: Comin-Chiaromonti, P., Gomes, C.B. (eds.), *Alkaline magmatism in central-eastern Paraguay relationships with coeval magmatism in Brazil*. EDUSP/FAPESP, 17-30. São Paulo.
- Gadea-Villalba, M.A. 2021. El Lineamiento Transbrasiliense en Paraguay. *Bol. Mus. Nac. Hist. Nat. Parag.* 25 (1): 50-62.
- Gadea, M., Fugarazzo, R., Caballero, M., Figueres, V. 2018. Zonas sísmicas en Paraguay. *II Jornadas Científicas sobre Geología del Paraguay y Ciencias afines* (San Lorenzo, Paraguay), Actas 28-29.
- Ganade de Araujo, C.E.G., Rubatto, D., Hermann, J., Cordani, U.G., Caby, R., Basei, M.A.S. 2014. Ediacaran 2.500 km-long synchronous deep-

- continental subduction in the West Gondwana orogen. *Nature Communications* 5 (5198): 1-8.
- Geraldes, M., Dias, A., Costa, A. 2015. An overview of the Amazonian Craton evolution: Insights for paleocontinental reconstruction. *International Journal of Geosciences* 6(9): 1060-1076.
- Gilbert, H.J., Richardson, T.J., Anderson, M.L., Alvarado, P.M., Martino, R.D., Beck, S.L., Zandt, G., Gans, C. 2010. Active deformation in the Sierras de Córdoba: Observations from the Eastern Sierras Pampeanas seismic array. *EOS Transactions AGU, The Meeting of the Americas 2010*, Foz do Iguazu, Abstract S22A-05.
- Godoy, A., Manzano, J., Araújo, L., Da Silva, J. 2009. Contexto geológico e estrutural do Maciço Rio Apa, sul do Cráton amazônico - MS. *Geociências* 28(4): 485-499.
- Gómez Tapias, J., Schobbenhaus, C., Montes Ramírez, N.E., Alcárcel Gutiérrez, F.A., Mateus Zabala, D. 2023. Mapping the geology of South America. *Episodes* 46: 537-549. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2023/023002>
- Granja, A., Aguiar De Souza, M., Salina, A., Cubas, N., Matos, J., Dantas, E., de Oliveira, J.R. (2018). Petrology and Geochronology (U-Pb) of the Caapucú suite - Southern Paraguay: post-tectonic magmatism of the Paraguarí belt. *Journal of South American Earth Sciences* 88: 621-641.
- Groom, R.W., Kurtz, R.D., Jones, A.G., Boerner, D.E. 1993. A quantitative methodology to extract regional magnetotelluric impedances and determine the dimension of conductive structure. *Geophysical Journal International* 115(3): 1095-1118.
- Herrera, C., Cassidy, J.F., Dosso, S.E., Dettmer, J., Bloch, W., Sippl, C., Salazar, P. 2021. The crustal stress field inferred from focal mechanisms in northern Chile. *Geophysical Research Letters* 48, e2021GL092889. doi. org/10.1029/2021GL092889
- INPRES. 2019. Instituto de Prevención Sísmica. Secretaría de Obras Públicas, San Juan, Argentina. <https://www.inpres.gob.ar/desktop/>
- Iriondo, M.H. 1993. Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America). *Geomorphology* 7: 289-303.
- Iriondo, M.H. 1999. The Neogene of the Llanos-Chaco-Pampa Depression. *Episodes* 22 (3): 226-231.
- Kröner, A., Cordani, U. 2003. African, southern Indian and South American cratons were not part of the Rodinia supercontinent: evidence from field relationships and geochronology. *Tectonophysics* 375(1-4): 325-352.
- Kulhánek, O. 1990. *Anatomy of Seismograms*. Developments in Solid Earth Geophysics. 18. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. 178 pp.
- Li, Z., Bogdanova, S., Collins, A., Davidson, A., De Waele, B., Ernst, R., Fitzsimons, I., Fuck, R., Gladkochub, D., Jacobs, J., Karlström, K., Lu, S., Natapov, L., Pease, V., Pisarevsky, S., Thrane, K., Vernikovsky, V. 2007. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research* 160(1-2):179-210.

- Mantovani, M., Brito Neves, B. 2005. The Paranapanema Lithospheric Block: Its Importance for Proterozoic (Rodinia, Gondwana) Supercontinent Theories. *Gondwana Research* 8(3): 303-315.
- Mantovani, M.S.M., Quintas, M.C.L., Shukowsky, W., Brito Neves, B.B. 2005. Delimitation of the Paranapanema Proterozoic block: A geophysical contribution. *Episodes* 28 (1): 18-22. DOI: 10.18814/epiiugs/2005/v28i1/002
- Martino, R.D., Guereschi, A.B., Caro Montero, A. 2016. Reactivation, inversion and basement faulting and thrusting in the Sierras Pampeanas of Córdoba (Argentina) during Andean flat-slab deformation. *Geological Magazine* 153 (5/6): 962-991. doi:10.1017/S0016756816000339
- McKenzie, D.P. 1969. The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses. *Seismological Society of America, Bulletin* 59: 591-601.
- Orozco, L.A., Favetto, A., Pomposiello, C., Rossello, E. Booker, J. 2013. Crustal deformation of the Andean foreland at 31°30'S (Argentina) constrained by magnetotelluric survey. *Tectonophysics* 582: 126-139.
- Orué, D. 1996. *Síntesis da geología do Paraguai Oriental, com ênfase para o magmatismo alcalino associado*. Dissertação de Mestrado. São Paulo, Brasil: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 163pp.
- Oyhantçabal, P., Siegesmund, S., Wemmer, K. 2010. The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature. *International Journal of Earth Science* 100: 201-220.
- Perarnau, M., Gilbert, H., Alvarado, P., Martino, R., Anderson, M. 2012. Crustal structure of the Eastern Sierras Pampeanas of Argentina using high frequency local receiver functions. *Tectonophysics* 580: 208-17.
- Peri, V.G., Rossello, E.A. 2010. Anomalías neotectónicas del drenaje del río Salado sobre las Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco, Argentina) detectadas por procesamiento digital. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 636-648.
- Peri, V.G., Pomposiello, M.C., Favetto, A., Barcelona, H., Rossello, E. 2013. Magnetotelluric evidence of the tectonic boundary between the Río de La Plata Craton and the Pampean Terrane (Chaco-Pampean Plain, Argentina): the extension of the Transbrasilian Lineament. *Tectonophysics* 608: 685-699.
- Peri, V.G., Barcelona, H., Pomposiello, M.C., Favetto, A. 2015. Magnetotelluric characterization through the Ambargasta-Sumampa Range: The connection between the northern and southern trace of the Río de La Plata Craton e Pampean Terrane tectonic boundary. *Journal of South American Earth Sciences* 59: 1-12.
- Pezzi, E.E., Mozetic, M.E. 1989. Cuencas Sedimentarias de la Región Chacoparanaense. In: Chebli, G.A., Spalletti, L.A. (eds.), *Cuencas sedimentarias Argentinas*. Instituto Superior de Correlación Geológica, Universidad Nacional de Tucumán (Tucumán). Serie Correlación Geológica 6: 65:78

- Ramé, G.A., Miró, R.C. 2011. Modelo geofísico de contacto entre el Orógeno Pampeano y el Cratón del Río de La Plata en las provincias de Córdoba y Santiago del Estero. *Serie Correlación Geológica* 27(2): 111-123.
- Ramos, V.A. 1988. Late Proterozoic – Early Palaeozoic of South America –a collisional history. *Episodes* 11(3): 168-174.
- Ramos, V.A., Folguera, A. 2009. Andean flat-slab subduction through time. In: Murphy, J.B., Keppie, J.D., Hynes, A.J. (eds.), *Ancient Orogens and Modern Analogues*. Geological Society of London, Special Publication 327: 31–54.
- Ramos, V.A., Vujovich, G., Martino, R., Otamendi, J. (2010). Pampia: A large cratonic block missing in the Rodinia Supercontinent. *Journal of Geodynamics* 50(3-4): 243-255.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Fanning, C.M., Baldo, E.G., González-Casado, J.M., Galindo, C., Dahlquist, J. 2007. The Río de la Plata craton and the assembly of SW Gondwana. *Earth Science Reviews* 83(1-2): 49-82.
- Rapela, C.W., Fanning, C.M., Casquet, C., Pankhurst, R.J., Spalletti, L., Poiré, D., Baldo, E.G. 2011. The Río de la Plata craton and the adjoining Pan-African/Brasiliano terranes: Their origins and incorporation into south-west Gondwana. *Gondwana Research* 20: 673-690.
- Richardson, R.M., Solomon, S.C., Sleep, N.H. 1979. Tectonic stress in the plates. *Rev. Geophys. Space Phys.* 17: 981-1019
- Richardson, T., Ridgway, K.D., Gilbert, H., Martino, R.D., Enkelman, E., Anderson, M., Alvarado, P. 2013. Neogene tectonics of the Eastern Sierras Pampeanas: active intraplate deformation inboard of flat-slab subduction. *Tectonics* 32: 780-96.
- Rocha, M., Araujo De Azevedo, P., Marotta, G., Shimmel, M., Fuck, R. 2016. Causes of intraplate seismicity in central Brazil from travel time seismic tomography. *Tectonophysics* 680:1-7.
- Rosello, E.A., Bordarampé, C.P. 2005. Las Lomadas de Otumpa: nuevas evidencias cartográficas de deformación neotectónica en el Gran Chaco (Santiago del Estero, Argentina). *XVº Congreso Geológico Argentino* (La Plata, Argentina). Actas.
- Rosello, E.A., Bordarampé, C.P., Peri, V.G. 2007. The Otumpa faulting: an intracontinental megastructure controlling the Neogene morphology of the Gran Chaco plain (Argentina). Lateinamerika-Kolloquium, 20th Colloquium on Latin American Earth Sciences (Kiel, Alemania), Memorias.
- Rosello, E.A. 2018. Modificaciones neotectónicas de la red de drenaje de la región central pampeana (Argentina): consecuencias en el relleno de la Cuenca del Salado. *Revista de la Sociedad de Geología de España* 31(1): 105-116.
- Russo, A., Ferrelo, R., Chebli, G.A. 1979. Llanura Chaco Pampeana. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias. Volumen I. Córdoba.

- Santos, C.H.O. 2017. *Expressão estructural do Lineamiento Transbrasiliano na porção sul da bacia do Parnaíba*. Dissertacão de Mestrado. Natal, Brasil: Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidad Federal do Rio Grande do Norte. 77 pp.
- Saylor, J.E., Sundell, K.E., Pérez, N.D., Hensley, J.B., McCain, P., Runyon, B., Alvarez, P., Cárdenas, J., Usnayo, W.P., Valer, C.S. 2023. Basin formation, magmatism, and exhumation document southward migrating flat-slab subduction in the central Andes. *Earth and Planetary Science Letters* 606: 118050. doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118050
- Schobbenhaus, C., Gonçalves, J., Santos, J., Bastos, M., Leão Neto, R., Muniz De Matos, G., Vidotti, R., Barreto, M.A., Alvez, J. 1975. *Carta Geológica do Brasil ao milionésimo: Folha de Goiás SE 22*. Mapa y texto. Brasilia, Brasil: Sistema de Informações Geográficas, CPRM. 114 pp.
- Schmitt, R.S., Trouw, R.A.J., Alves da Silva, E., Mendes de Jesus, J.V., da Costa, L.F.M., Passarelli, R. 2021. The role of crustal-scale shear zones in SW Gondwana consolidation – transatlantic correlation. In: Hynes, A.J., Murphy, J.B. (eds), *The consummate geoscientist: A celebration of the career of Maarten de Wit*. Geological Society, London, Special Publications, 531, <https://doi.org/10.1144/SP531-2022-278>
- SISBRA. 2019. Observatorio Sismológico da Universidade de Brasília. [Consulted: 23.xi.2019]. <http://obsis.unb.br/portalsis/>
- Sykes, L. 1978. Intraplate seismicity, reactivation of pre-existing zones of weakness, alkaline magmatism, and other tectonism postdating continental fragmentation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 16: 621-688.
- Talwani, P. 2014. Unified model for intraplate earthquakes. In: Talwani, P. (ed.), *Intraplate Earthquakes*. Cambridge University Press. 275-302, 332 pp. + 16 plts. Cambridge.
- Tassara, A., Götze, H.-J., Schmidt, S., Hackney, R. 2006. Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Journal of Geophysical Research* 111: B09404.
- Tassara, A., Echaurren, A. 2012. Anatomy of the Andean subduction zone: three-dimensional density model upgraded and compared against global-scale models. *Geophysical Journal International* 189(1): 161-168.
- Teixeira, W., Fairchild, T., Motta De Toledo, C., Taioli, F. 2009. *Decifrando a Terra*. 2^a Ed. Companhia Editora Nacional. 624 pp. São Paulo.
- Tohver, E., D'Agrella-Filho, M., Trindade, F. 2006. Paleomagnetic record of Africa and South America for the 1200–500 Ma interval, and evaluation of Rodinia and Gondwana assemblies. *Precambrian Research* 147(3-4): 193-222.
- Tohver, E., Trindade, R., Solum, G., Hall, M., Riccomini, C., Nogueira, C. 2010. Closing the Clymene Ocean and bending a Brasilian obelt: evidence for the Cambrian formation of Gondwana, south-east Amazoncraton. *Geology* 38(3): 267-270.

- Tohver, E., Cawood, P.A., Rossello, E.A., Jourdan, F. 2012. Closure of the Clymene Ocean and formation of West Gondwana in the Cambrian: evidence from the Sierras Australes of the southernmost Rio de la Plata craton, Argentina. *Gondwana Research* 21 (2-3): 193-222.
- Tomasini, A., Braunstein, J. 2010. *Rengger, Johann Rudolph, Viaje al Paraguay en los años 1818 a 1826*. Aaraux, 1835 en H.R. Sauerlaender Editorial. Traducido al castellano, prologado y anotado. Tiempo de Historia, 358 pp. Asunción.
- Trindade, R.I.F., D'Agrella-Filho, M.S., Epof, I., Brito-Neves, B.B. 2006. Paleomagnetism of the early Cambrian Itabaiana mafic dikes, NE Brazil, and implications for the final assembly of Gondwana and its proximity to Laurentia. *Earth and Planetary Science Letters* 244: 361-377.
- Trouw, R.A.J., De Wit, M.J. 1999. Relation between the Gondwanide Orogen and contemporaneous intracratonic deformation. *Journal of African Earth Sciences* 28 (1): 203-213
- USGS. 2023. *Eathquakes*. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>
- Velázquez, J.C., Gadea, M., Fugarazzo, R., Campos Cervera, A.M. 2009. Desarrollo de la Sismología en Paraguay. En: Huaco, D. (ed.), *La sismología en Sudamérica y los mecanismos de prevención y mitigación del peligro y riesgo sísmico*. CERESIS. 263 pp. Lima.
- Veloso, J., Soares, J., Velázquez, J.C. 1994. Earthquakes in Paraguay: An appraisal. *Regional Seismological Association in South America*. Brasilia.
- Warren, L. 2011. *Tectônica e sedimentação do Grupo Itapucumi (Neoproterozoico, Paraguai septentrional)*. Tese de Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 215 p.
- Wiens, F. 1985. Phanerozoic tectonics and sedimentation in the Chaco Basin of Paraguay, with comments on hydrocarbon potential. In: Tankard, A.J., Suárez Soruco, R., Welsink, H.J. (eds.), *Petroleum basins in South America*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 62: 185-205.