

# Modelo geofísico de contacto entre el Orogéno Pampeano y el Cratón del Río de La Plata en las provincias de Córdoba y Santiago del Estero.

Gustavo Alejandro RAMÉ<sup>1</sup> y Roberto César MIRÓ<sup>1</sup>

**Abstract:** *GEOPHYSICAL MODEL OF CONTACT BETWEEN THE PAMPEAN OROGEN AND THE RIO DE LA PLATA CRATON IN PROVINCES OF CORDOBA AND SANTIAGO DEL ESTERO.*- In order to better understand the model of contact between Rio de la Plata craton (CRP) and the Pampean Orogen (OP) three gravity profiles, east-west oriented, were performed at 29° 20'S, 32° 30'S and 33° 20'S, corresponding to the latitude of the localities of Sumampa (Santiago del Estero province), Sierra de las Peñas and southern end of the Sierra de Comechingones, Cordoba province. The obtained results point to a strong correlation between the new sections and the one at 31°S (profile Jesús María) made earlier. On that base a new geophysical model of contact was established between the CRP and the OP for a sector east of the Sierras de Cordoba and Santiago del Estero province, from 29° S to 33° 20'S and 62° to 65° W, in which the following geotectonic units were recognized: the CRP, as a massive block with an average density of 2.83 g/cm<sup>3</sup>; the OP, formed by a Cambrian magmatic arc (AMC) to the east, that includes a monzogranite-granodiorite association of type I and metamorphic units that form the accretionary prism (PAC) to the west of the arc, containing an association of peraluminous granites. In addition to geophysical profiles the OP have a base of exhaustive geological knowledge in the study area, contained in detailed surveys. The new profiles reached the western sector of Cordoba, in the province of San Luis, containing Ordovician metamorphic complexes (CMF). As a result it can be said that the contact between the CRP and the OP to the latitude of the Sierras Pampeanas de Córdoba have an elliptical shape located approximately 63° 30'W, under the Chaco-Pampean plain. The contact between the two units would be shaped as a tectonic sliver with subvertical arrangement along the entire thickness of the crust and have a width estimate of 20 km. Structural evidence described in the area of Sierra Norte and Sierra de Sumampa have defined important shears zones within Cambrian granites (525 Ma) that could be linked at the time of the coupling between the CRP and the OP. The current gravimetric surface pattern of the Río de la Plata craton, in the area immediately to the east of the Sierras Pampeanas of Cordoba and Santiago del Estero province, is an evidence of the dismemberment that occurred since the Upper Paleozoic tectonics and Cretaceous rifting, subsequently reactivated during the Andico tertiary compressional cycle. Seismic studies show that under the plain of Cordoba province, between 64° W and the Paraná River at 60° W, the surface of the craton has steep slopes, with blocks of north-south orientation, in similarity with the tectonic style of the Sierras Pampeanas outcropping to the west.

**Resumen:** *MODELO GEOFISICO DE CONTACTO ENTRE EL OROGENO PAMPEANO Y EL CRATON DEL RIO DE LA PLATA EN LAS PROVINCIAS DE CORDOBA Y SANTIAGO DEL ESTERO.*- Con el objeto de ampliar el modelo del contacto entre el cratón del Río de la Plata (CRP) y el Orogéno Pampeano (OP) se confeccionaron tres perfiles gravimétricos en el sentido este-oeste, a los 29°20' S, 32°30' S y 33°20'S, correspondientes a la latitud de las localidades de Sumampa (Santiago del Estero), Sierra de las Peñas y extremo sur de la sierra de Comechingones de Córdoba. Los resultados obtenidos indicarían que las nuevas secciones transversales poseen una marcada correlación con la sección de los 31°S (Perfil Jesús María) realizada anteriormente. De esta manera se estableció un modelo geofísico del contacto entre el CRP y el OP para un sector al este de las sierras de Córdoba y Santiago del Estero, entre los 29°S y los 33°20'S y los 62° y 65° O, en el que se reconocieron las siguientes unidades geotectónicas; el CRP, formado por rocas con una densidad media de 2.83 g/cm<sup>3</sup>; el OP conformado por, un arco magmático cámbrico (AMC) al este que incluye una asociación monzogranito-granodiorita de tipo I, y unidades metamórficas que forman el prisma de acreción al oeste del arco (PAC), que contienen una asociación de granitos peraluminosos. Finalmente, en los tres nuevos perfiles se alcanzó el sector al oeste de Córdoba, en la provincia de San Luis, que contiene complejos metamórficos ordovícicos (CMO). Los perfiles geofísicos poseen una base de conocimiento geológico en el sector en que atraviesan al OP contenida en diversos trabajos de detalle. Como resultado del estudio se puede afirmar que el contacto entre el CRP y el OP a la latitud de las Sierras Pampeanas de Córdoba tendría una forma elíptica ubicada aproximadamente a los 63°30'O, por debajo de la llanura chacopampeana. El contacto entre ambas unidades sería a través de una lámina tectónica con disposición subvertical que involucraría todo el espesor de la corteza y tendría un ancho estimado de 20 km. Evidencias estructurales descriptas en el ámbito de las sierras Norte, Ojo de Agua y Sumampa habrían definido importantes cizallas dentro de granitos cámbricos (525 Ma) que podrían vincularse al momento del acople entre el CRP y AMC. La impronta gravimétrica actual del cratón del Río de la Plata en el sector inmediatamente al este de las Sierras Pampeanas de Córdoba y Santiago del Estero evidencia el desmembramiento que sufriera a partir de la tectónica neopaleozoica y el rifting cretácico, reactivada posteriormente durante el ciclo terciario Ándico, en coincidencia con estudios sísmicos que muestran que bajo la llanura de Córdoba, entre los 64° O y el río Paraná, a los 60° O, la superficie del cratón presenta fuertes desniveles con bloques de orientación norte-sur, siguiendo el estilo tectónico de las Sierras Pampeanas aflorantes hacia el oeste.

**Keywords:** Rio de la Plata cratón, Pampean Orogen, Gondwana assembly, Gravimetry.

**Palabras clave:** Cratón del Río de la Plata, Orogéno Pampeano, Reconstrucción de Gondwana, Gravimetría.

<sup>1</sup>Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). E-mail: g\_rame2000@yahoo.com.ar

## Introducción

La presencia de un sustrato cratónico al este del meridiano de los 64°O en la región chaco-paranaense de Argentina fue establecida a través de la exploración sísmica realizada por YPF en las décadas del 60 y 70 (Russo *et al.*, 1979). La descripción general era de un basamento igneo-metamórfico con un relieve pronunciado, marcado por depocentros alargados en sentido NE, sobre los que se desarrollaron secuencias sedimentarias del paleozoico inferior a superior, cretácicas con participación volcánica y terciarias. Solamente cuatro pozos de exploración, realizados en el este y centro de la provincia de Córdoba, alcanzaron el basamento cristalino. De ellos se extrajeron muestras de rocas ígneas que arrojaron edades mesoproterozoicas (2,3 a 2,0 Ga), confirmando la afinidad del basamento chacoparanaense con los afloramientos del CRP en Tandilia (Rapela *et al.*, 2007). Algunas transectas geofísicas realizadas en los últimos años intentaron definir la zona de contacto en profundidad entre el cráton y la unidad morfoestructural situada inmediatamente al oeste del mismo (Ramé *et al.*, 1995; Miranda e Introcaso, 1999; Booker *et al.*, 2004; Lopez de Luchi *et al.*, 2005; Ramé y Miró, 2010), que en términos amplios corresponde a las Sierras Pampeanas. A través de modelos geológicos se desarrollaron algunas hipótesis sobre el tiempo y forma del contacto entre ambas unidades (Ramos, 1988; Ramos y Vujovich, 1993; Dalziel, 1997; Escayola y Kraemer, 2003; Rapela *et al.*, 2007; Schwartz *et al.*, 2008). El hecho de que la zona de contacto no se encuentra expuesta y que la información de subsuelo es escasa ha dado lugar a que se propongan modelos de variada incertidumbre. Con el objeto de aportar una aproximación mayor a los modelos propuestos se realizaron transectas gravimétricas en sentido este-oeste que abarcaron la porción no expuesta del basamento de la llanura chaco-paranenense y su continuación al oeste correspondiente a un sector aflorante de las Sierras Pampeanas Orientales. El tramo considerado abarca desde los 29°S hasta los 33°S, en una sección que cubre unos 400 km (N-S) por unos 300 km (E-O), o sea un área total de 120.000 km<sup>2</sup>. El área de estudio fue elegida en función de que comprendía uno de los sectores con mejor información “de campo” del Orogéno Pampeano y presentaba una mayor proximidad con el área cratónica.

## Metodología

Se relevaron en total 350 estaciones de muestreo gravimétrico y topográfico con una equidistancia media de 4km a lo largo de cuatro perfiles E-W, entre los 29°20' S y los 33° 20' S, que se extendieron en sentido O-E desde el área serrana de Santiago del Estero y Córdoba, a partir de los 65°30' O, hacia la llanura pampeana, hasta los 61°30' O (Figura 1).

Los valores de gravedad observada ( $g_{obs}$ ) fueron obtenidos utilizando un gravímetro Sodin 200T con precisión de 0,01 mGal, propiedad del SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino). Estos valores fueron referidos a la red IGSN71 (International Gravity Standardization Net 1971).

La plani-altimetría de las estaciones se determinó utilizando un equipo GPS Trimble ProXRT de doble frecuencia L1/L2, aplicando el método diferencial estático rápido (DGPS). Los valores obtenidos por el equipo móvil fueron corregidos y ajustados mediante la utilización de datos de la base permanente UCOR de la red RAMSAC proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN). El posicionamiento de las estaciones fue referido al sistema WGS84 (World Geodetic System 1984). La precisión obtenida en la altitud fue inferior a 0.6 m, asegurando un error en el cálculo de anomalías gravimétricas inferior a 0,2 mGal.

Las anomalías de Bouguer (AB) se determinaron a partir de la diferencia entre el valor de gravedad teórica en cada estación y el  $g_{obs}$  reducido al nivel medio del mar utilizando las correcciones de Aire Libre (0,3086 h), Bouguer (0,1118 h) y corrección topográfica. A partir de estos resultados se construyeron cuatro perfiles de AB denominados de norte a sur, Perfil Sumampa (29°20'S); Perfil Jesús María (31°LS) (Ramé y Miró, 2010); Perfil Las Peñas (32°30'S) y Perfil Río Cuarto (33°20'S). Mediante el software Model Vision, utilizando el método gravimétrico inverso, se construyeron cuatro modelos físicos de corteza consistentes con la geología regional teniendo en cuenta la siguiente información: a) evidencias geológicas de superficie tal como se describe en las hojas geológicas del SEGEMAR a escala 1:250.000, Villa Dolores (Bonalmi *et al.*,

1998), Jesús María, (Candiani *et al.*, 2001); Villa María, (Bonalumi *et al.*, 2004) y Villa Ojo de Agua (Miró y Sapp, 2005); b) aeromagnetometría y radimetría relevada e interpretada por el SEGEMAR (Sims *et al.*, 1997) y c) espesores sedimentarios de la llanura de Córdoba y Santa Fe obtenidos de las perforaciones de YPF, Santiago Temple, Saira, Arias y Ordoñez (Russo *et al.*, 1979).

### Interpretación geológica del modelo geofísico de corteza

En base a la interpretación de los perfiles AB y del conocimiento geológico de todas las unidades aflorantes comprendidas en los perfiles a través de las sierras de Ojo de Agua y Sumampa, Norte de Córdoba, Grande y Chica de Córdoba, de las Peñas y de Comechingones se ha propuesto un modelo de interpretación geológica basado en los parámetros geofísicos que surgen de la aplicación de valores acotados para las diferentes densidades de los tramos de corteza hasta una profundidad de aproximadamente 45 km. Otros parámetros de importancia que fueron considerados en el modelo fueron el espesor normal de corteza  $T_n = 33$  km (Woollard, 1969; Bullen, 1963), y las densidades de corteza normal que fueron:  $\sigma_{cs} = 2.7$  g/cm<sup>3</sup> (corteza superior);  $\sigma_{ci} = 2.9$  g/cm<sup>3</sup> (corteza inferior);  $\sigma_{ms} = 3.3$  g/cm<sup>3</sup> (manto superior).

Observando la carta de AB y los cuatro perfiles se pueden definir en conjunto tres sectores con características diferentes (Figuras 2, 3 y 4). Un sector oriental dominado por valores relativos de anomalías positivas de muy corta longitud de onda; un sector central caracterizado por un gran positivo de media longitud de onda al que se le superpone un gradiente general descendente de este a oeste cuya mayor expresión (aproximadamente 50 mGal en 50 km) se observa en los dos perfiles centrales (Jesús María y Las Peñas) y un sector occidental con valores de AB relativamente más bajos. Tanto en el perfil norte (Sumampa) como en el sur (Río Cuarto) se observa que el gradiente parece ser menos evidente

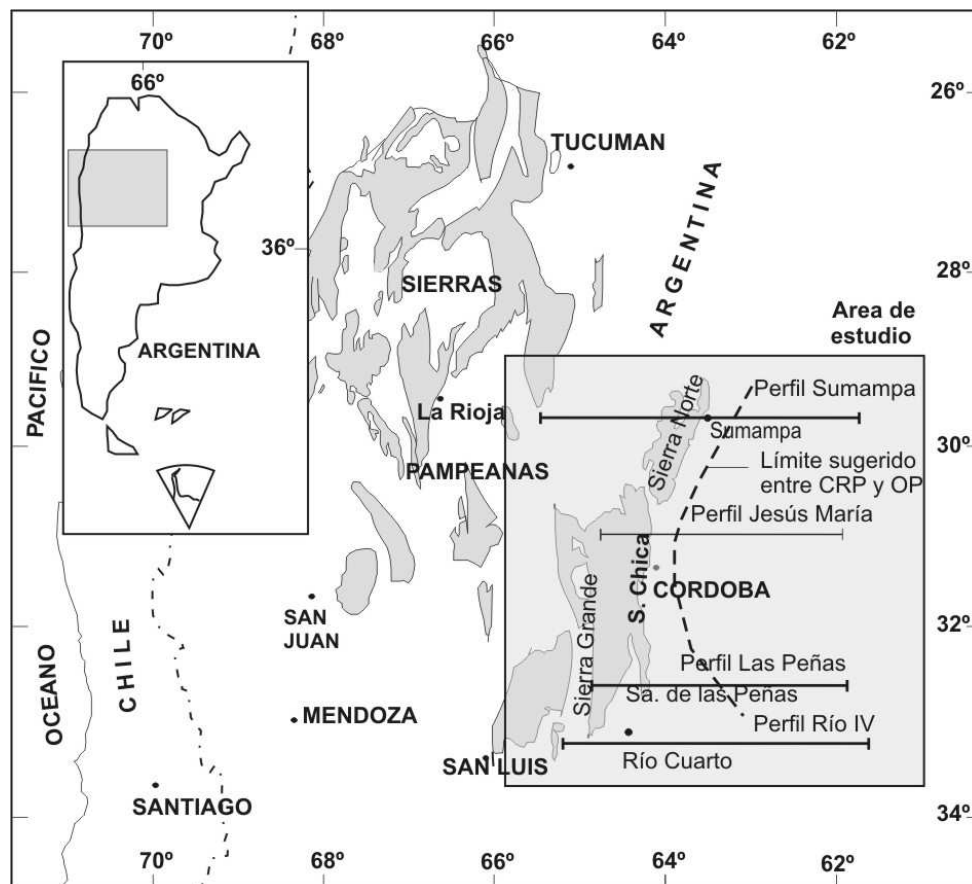


Figura 1. Ubicación del área de estudio entre los 29°30' y 33°30'S; los 61°30' y 65°30'O.

probablemente porque en esos sectores las estructuras presenten un rumbo oblicuo respecto a la orientación E-O de los perfiles. El sector oriental, dominado por valores relativos positivos con anomalías de corta longitud de onda, estaría vinculado a la respuesta gravimétrica de bloques fracturados del cratón del Río de la Plata por debajo de la llanura Pampeana. El sector central,

donde predomina el gradiente gravimétrico descendente hacia el oeste, estaría vinculado a la zona de transición entre el CRP al este y el OP al oeste, que correspondería con un cambio lateral de densidades de las rocas tanto de corteza superior como inferior, asociado a la presencia de fajas de cizalla dentro del OP. Por consiguiente existiría una fuerte correlación entre los gradientes gravimétricos y las fajas de cizalla que funcionan como límites tectónicos entre diferentes unidades estructurales. El sector occidental de los perfiles correspondería a la existencia de complejos metamórficos del paleozoico inferior.

Las unidades geotectónicas homogéneas reconocidas de este a oeste, a las que se considera como fuentes homogéneas de anomalías gravimétricas son las siguientes:

### Cratón del Río de la Plata (CRP)

En el sector oriental de los cuatro perfiles (Figuras 3 y 4), por debajo de la cubierta sedimentaria, se ubica un bloque homogéneo que consideramos correspondería al borde occidental del CRP, afectado por la tectónica cenozoica con un estilo de fracturación de alto ángulo similar al de las Sierras Pampeanas. Las densidades medias utilizadas en el modelo para definir el sector del cratón han sido, para la corteza superior (Cs) entre 2,71 y 2,74 g/cm<sup>3</sup> y para la corteza inferior (Ci) entre 2,91 y 2,94 g/cm<sup>3</sup> (hasta 33 km de profundidad). El ajuste del perfil geofísico se ha realizado considerando la existencia de fallas modernas (terciarias) que originan una superficie irregular del basamento y la cubierta sedimentaria que posee un espesor medio de 4 km (Russo *et al.*, 1979). Tal como se expresara la edad de este tramo de corteza esta referida a determinaciones recientes que establecen una probable correlación con las edades asignadas al CRP y que tienen valores que oscilan entre 2,3 y 2,0 Ga (Dalla Salda *et al.*, 2005; Rapela *et al.*, 2007).

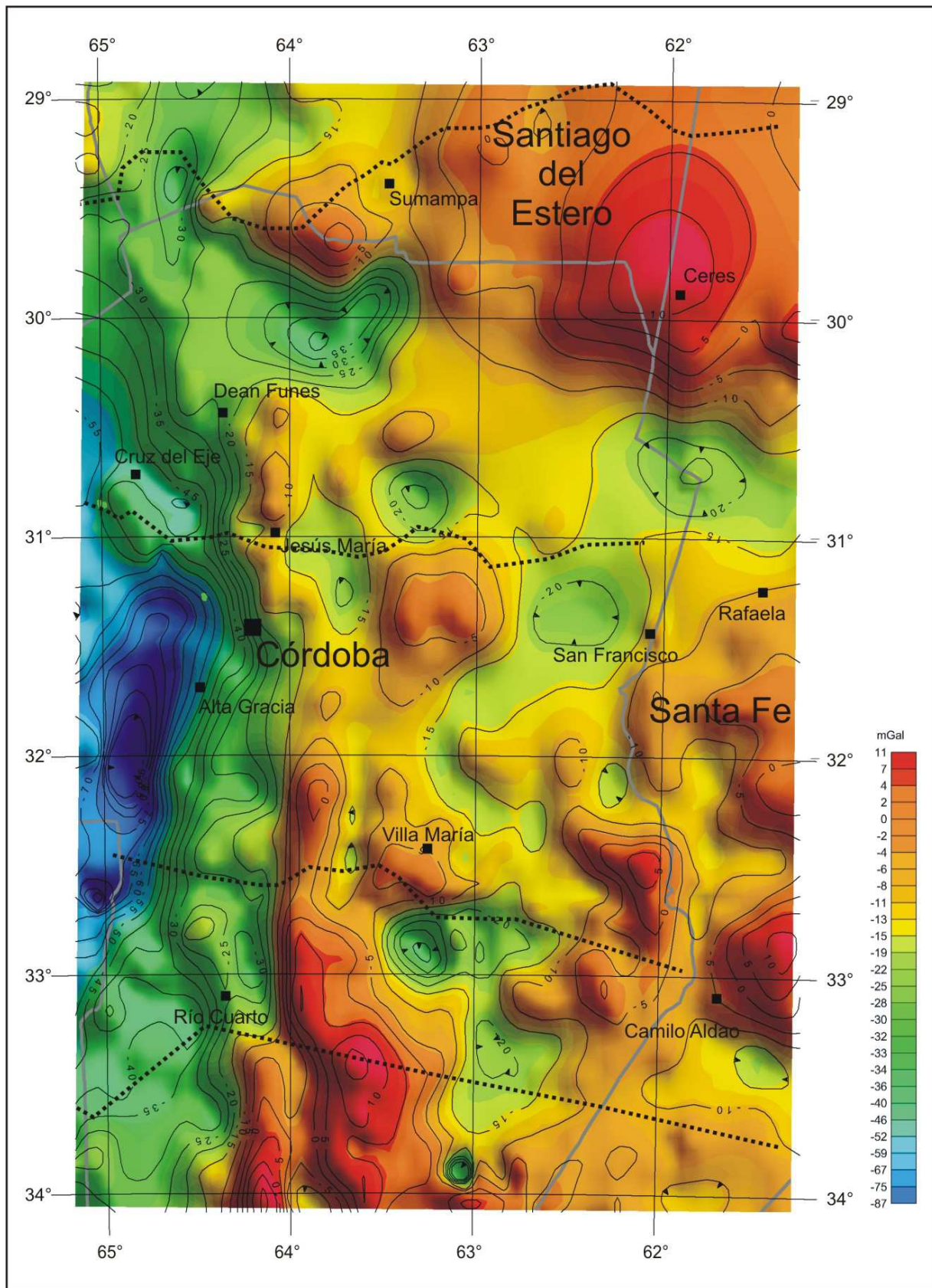
#### Lámina tectónica del cratón

En los diferentes perfiles se ha podido reconocer un límite abrupto del borde occidental del cratón que se interpreta corresponde a la presencia de una lámina tectónica originada por el acople del mismo con el Orogeno Pampeano (Figuras 3 y 4). Se trata de un límite tectónico de primer orden al que se considera por su dimensión como una “astilla” desprendida del cratón y generada por la partición del esfuerzo compresivo provocado por la convergencia oblicua del OP hacia el cratón.

No puede definirse *a priori* cuanta de esta deformación habría correspondido a un campo dúctil por lo que consideramos como más apropiado describir a esta unidad como una “lámina tectónica” en el sentido de Haq and Davis (2010) (Figura 5). Similares láminas han sido reconocidas en zonas de acople tectónico tal como mencionan Beck (1983) y Platt (1993). La interpretación del origen de la lámina surge de evidencias que sugieren que el acople entre ambas unidades no habría sido ortogonal si no que habría tenido una fuerte componente oblicua (Rapela *et al.*, 2007) lo que habría provocado la formación de una zona con una fuerte deformación transpresiva en el borde occidental del cratón donde habría sido absorbida parte de la energía de este acoplamiento. En el terreno debe interpretarse que esta línea corresponde a una secuencia de ruptura por transposición, con tramos de transcurrancia horizontal submeridianos a los que se intercalan tramos oblicuos (a 45° y 135°) de transcurrancia o fracturación vertical.

Dentro del arco magmático pampeano han sido reconocidas extensas zonas de cizalla (Miró *et al.*, 1999) que podrían ser sincrónicas con el acople mencionado. Si esta correlación fuera cierta podría asignarse a este evento una edad vinculada a la etapa de enfriamiento del batolito monzogranítico de Sierra Norte (Lira *et al.*, 1997) cuyo pico intrusivo tendría una edad entre 525 y 520 Ma (Rapela *et al.*, 1998) lo que daría para el evento de acople un rango de edad posible entre 520 y 515 Ma. Una edad similar fue interpretada por Gromet y Simpson (1999) en base a dataciones U/Pb de los diferentes componentes del OP.

Debe observarse que tanto el OP como el CRP se encuentran cubiertos por sedimentos del Cámbrico Superior, formación Simbol Huasi (Llambias *et al.*, 2003), lo que corroboraría una edad neocámbrica para la colisión entre ambas unidades.



**Figura 2.** Carta de anomalías de Bouguer (Modificado de Introcaso en Lizuáin et al., 1997); curvas de isoanomalías de Bouguer cada 5 mGal. Las líneas punteadas corresponden a los perfiles estudiados. Software utilizado para generar la grilla: Oasis Montaj. Método de grillado: Mínima curvatura.

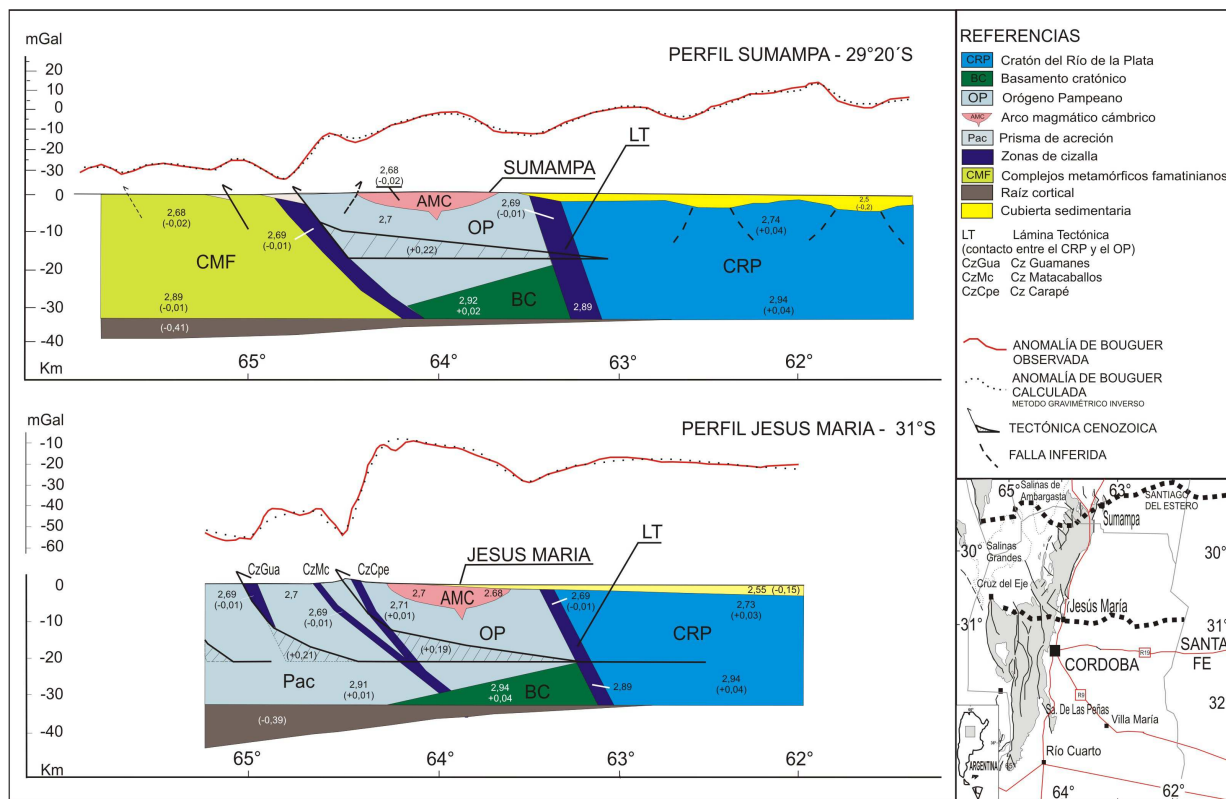


Figura 3. Modelos geofísicos de corteza. Perfiles Sumampa y Jesús María. Software utilizado para modelado gravimétrico: Model Vision de ENCOM. Método gravimétrico inverso.

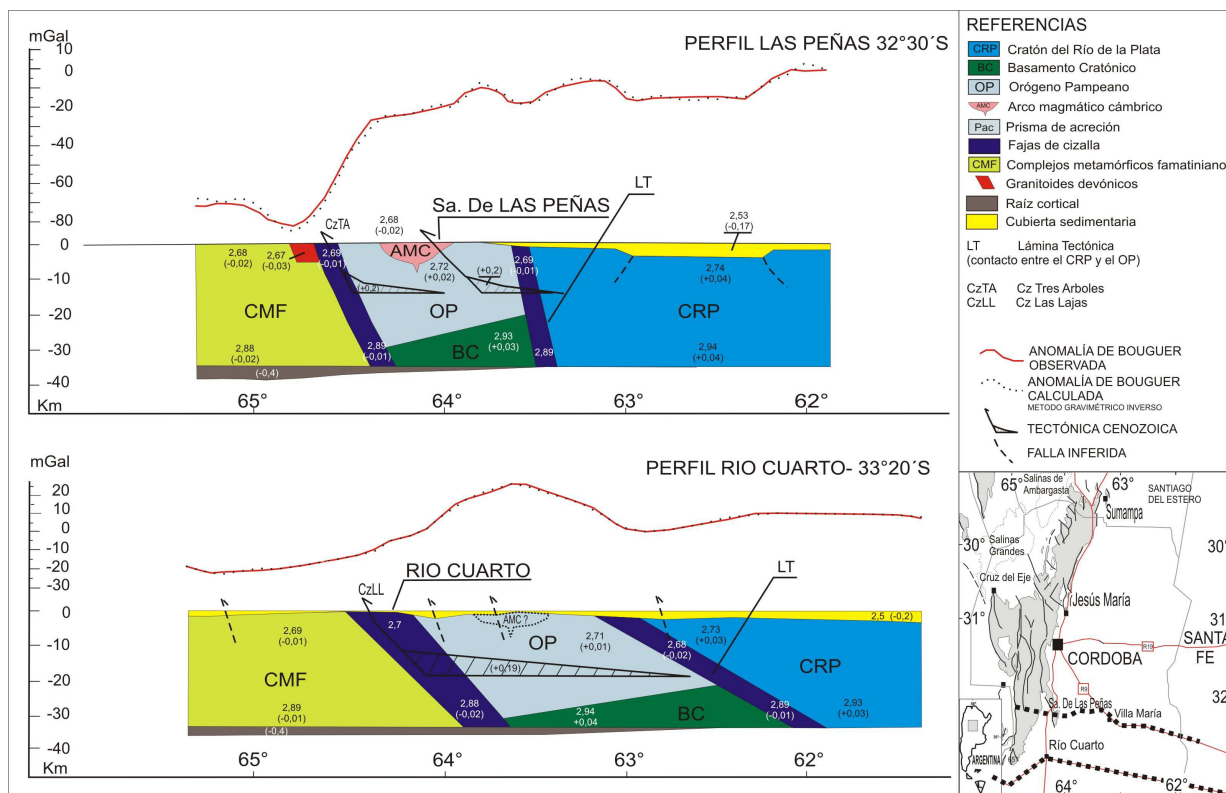
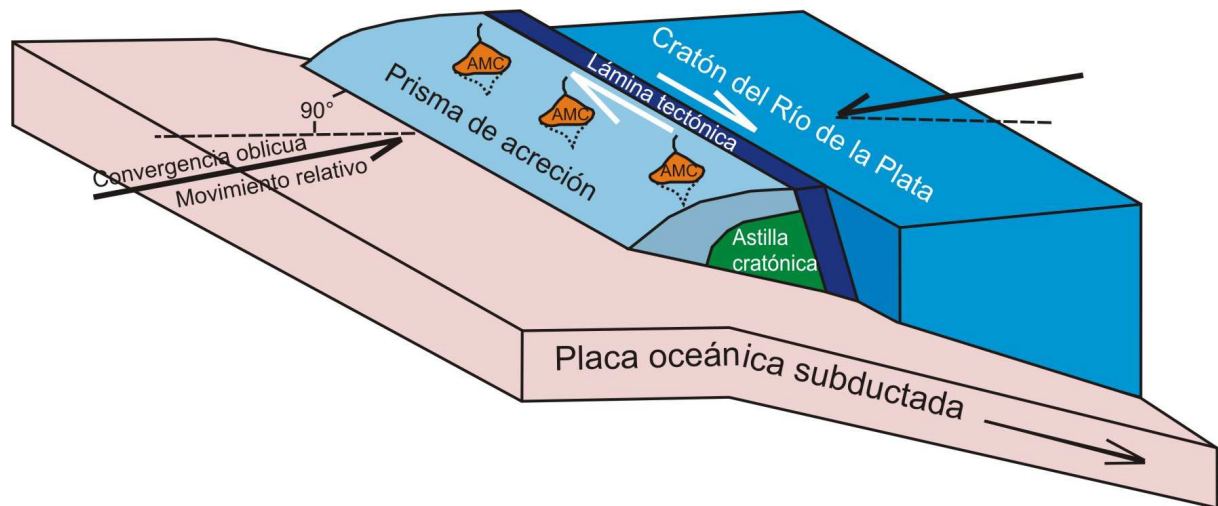


Figura 4. Modelos geofísicos de corteza. Perfiles Las Peñas y Río Cuarto. Software utilizado para modelado gravimétrico: Model Vision de ENCOM. Método gravimétrico inverso.



**Figura 5.** Esquema ilustrativo de la posición del CRP, la “lámina tectónica” en el sentido de Haq and Davis (2010), la astilla de cratón, el prisma de acreción y el arco magmático en un límite convergente no ortogonal (oblicuo).

### Orógeno Pampeano (OP)

El tramo siguiente del perfil ha sido realizado sobre unidades aflorantes del Orógeno Pampeano. Por consiguiente la interpretación geológica está basada en diversos trabajos que describen a esta unidad tectónica con amplitud (Lira *et al.*, 1997; Sims *et al.*, 1998). Además de los rasgos litológicos se cuenta con relevamientos aeromagnéticos (SEGEMAR, 1996) que dan a la interpretación del perfil una mayor continuidad lateral y en profundidad. Comprende un sector medio formado por bloques limitados por fajas de cizalla que separan niveles estructurales más profundos hacia el este y menos profundos hacia el oeste. Esta diferencias están evidenciadas por la variación lateral decreciente de las densidades en el sentido este a oeste (zona de gradiente). El OP está compuesto por dos dominios litológicos; al este por un arco magmático calcoalcalino cámbrico (AMC), formado por rocas de composición granodiorítica y monzogranítica, y al oeste por un prisma de acreción (Pac) formado por rocas metamórficas de grado medio a alto que alojan granitoides de tipo S. Ambos dominios se habrían desarrollado ambos en parte sobre un sustrato cratónico. Las densidades adoptadas para el OP fueron de 2,71 a 2,72 g/cm<sup>3</sup>; para el Pac 2,69 a 2,7 g/cm<sup>3</sup> en corteza superior y 2,89 a 2,90 g/cm<sup>3</sup> en corteza inferior y para el AMC entre 2,67 y 2,71 g/cm<sup>3</sup>. El OP es parte de un sistema orogénico de convergencia que ha sido reconocido a lo largo del margen proto-pacífico de Gondwana en una extensión de miles de kilómetros en los orógenos neoproterozoicos-eopaleozoicos de Saldania (Africa), Ross (Antártida) y Delamerian (Australia) según Munker and Crawford (2000) (Figura 6). En Argentina el orógeno está compuesto por rocas metasedimentarias cuyos protolitos se asignan a la Formación Puncoviscana de edad ediacarana (Aceñolaza y Toselli, 1981; Willner, 1990; Omarini y Sureda, 1993).

El extremo oriental del orógeno, entre los 29°S y 31° 30'S, se define como el remanente de un prisma de acreción con vergencia hacia el oeste (según norte actual) desarrollado entre el Cámbrico inferior a medio, que contiene elementos metamórficos de grado medio (anfíbolita alta), intruidos por granitos de tipo I con edades entre 525 y 520 Ma. Completando el marco geológico del orógeno hacia el oeste del arco calco-alcalino se desarrolló un arco magmático occidental formado por granitos peraluminosos de tipo S, con edades entre 520 y 510 Ma (Gromet *et al.*, 2005) que intruyen complejos metamórficos de corteza media a inferior, con una edad para el pico progrado que oscila entre 535 y 515 Ma (Rapela *et al.*, 1998).

#### Basamento cratónico

Se ha postulado que la deposición de los sedimentos del mar puncoviscano tuvo lugar a lo largo de un extensa cuenca profunda desarrollada en el margen pasivo occidental de Gondwana (Simpson *et al.*, 2003). El ajuste físico de los perfiles muestra una buena correlación con la posible

existencia de un sustrato de plataforma de margen pasivo por debajo de los sedimentos metamorizados y plegados. La unidad constituiría el sustrato cratónico del margen pasivo sobre el que se depositaron los protolitos sedimentarios que formaron el prisma de acreción. Esta plataforma puede haberse desarrollado sobre un borde de corteza continental cuya edad es incierta y solo puede imaginarse a partir de modelos de reconstrucción teórica de las placas cratónicas cercanas (Hoffman, 1991; Rapela, 2000) (Figura 6). La unidad interpretada se ubicaría por debajo del OP en la porción más profunda de la corteza (corteza inferior) (Figuras 3 y 4) limitando al este con el CRP, en contacto tectónico por cizalla o por una lámina tectónica. Tiene una forma acuñada con espesores decrecientes hacia el oeste y una asignándole una densidad media levemente superior a la densidad del prisma de acreción a la misma profundidad de 2,91 a 2,94 g/cm<sup>3</sup>.

## Inflexión al oeste del OP - Complejos metamórficos cámbricos

Un rasgo de primer orden de los perfiles geofísicos corresponde a la inflexión gravimétrica situada en la mitad occidental del OP y que marca el inicio de una zona de transición representada por los complejos metamórficos cámbricos derivados del cierre del mar Puncoviscano durante el proceso de convergencia y subducción de la Orogenia Pampeana. La inflexión del perfil define que, a) la convergencia tuvo una componente hacia el este (según N actual) y b) que la fuerte caída gravimétrica hacia un valor negativo (entre 30 y 75 mGals en un tramo inferior a 70 km), originando un gradiente promedio de aproximadamente 1 mGal/km, indicaría que se trata de una convergencia colisional. Según (Gromet y Simpson, 2000) se trataría de una colisión de tipo arco-continente, en tanto que otros autores la consideran una colisión de tipo continente-continente (Escayola y Kramer, 2003; Ramos *et al.*, 2010). Estudios geofísicos en zonas orogénicas antiguas de distintas partes del mundo han encontrado una coincidencia entre gradientes de gravedad elevados y zonas de sutura en márgenes de convergencia. Según Thomas (1983) el patrón gravimétrico es un fiel indicador de la dirección de paleosubducción. Trabajos de diferentes autores mostrarían evidencias favorables a esta interpretación tanto en modelos de colisión alóctonos como en estudios de ejemplos de Argentina (Gibb y Thomas, 1976; Black *et al.*, 1980; Thomas, 1983; Ramé *et al.*, 1995; Miranda e Introcaso, 1999; Martínez y Gimenez, 2003). Los complejos metamórficos se formaron en condiciones de alta temperatura y presión media a baja durante el Cámbrico medio (Demange *et al.*, 1993). La edad del metamorfismo, asociada a la intrusión de granitos peraluminosos, ha sido circunscripta a un periodo entre 535 y 515 Ma (Rapela *et al.*, 1998; Gromet y Simpson, 1999).

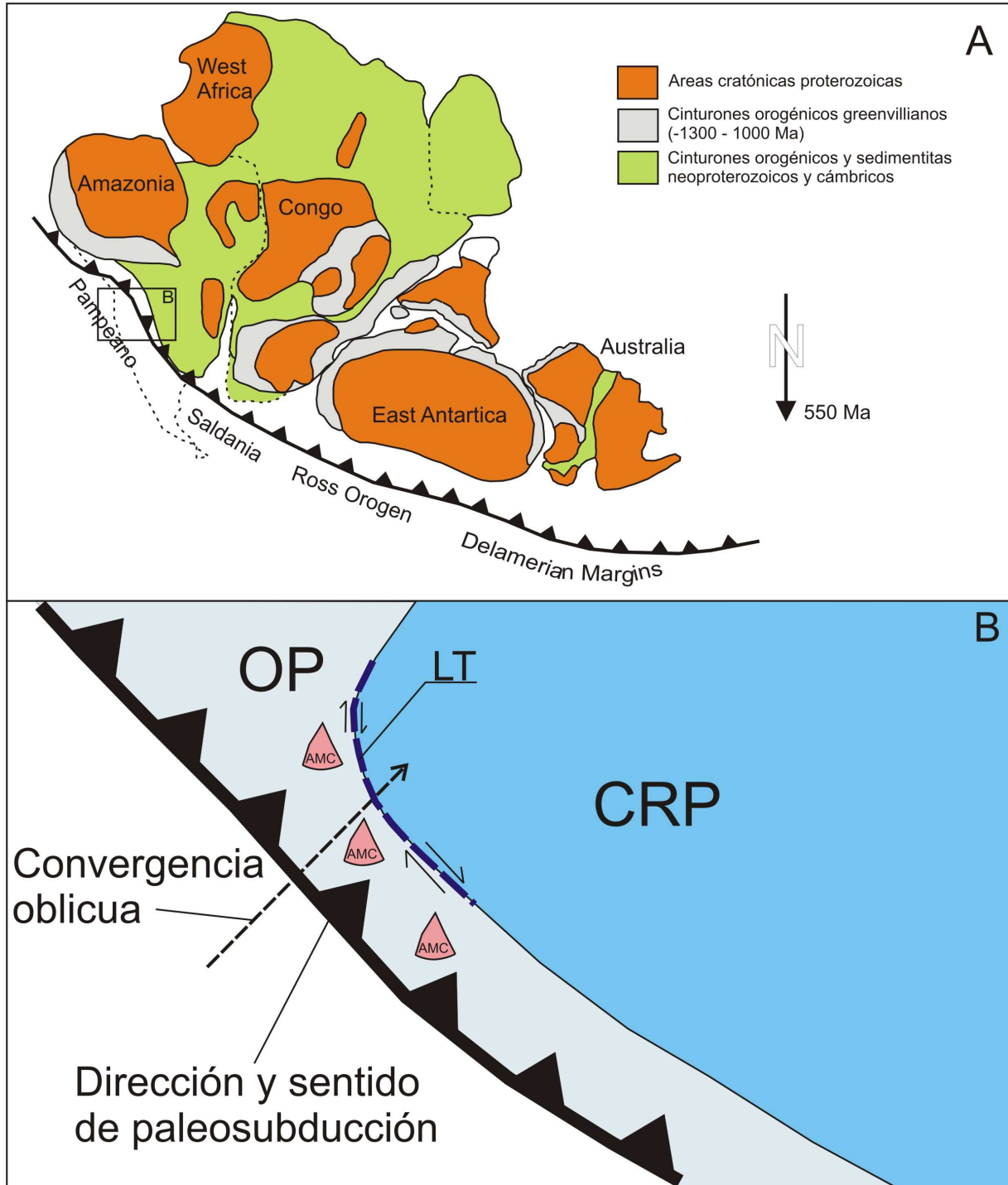
## Fajas de Cizalla

Diversas fajas de cizalla atraviesan a los complejos metamórficos del Orógeno Pampeano (Martino, 2003). Las cizallas conforman límites tectónicos, con distinto grado y magnitud, que separan a diferentes bloques dentro del OP (Figuras 3 y 4). Las cizallas muestran un diacronismo en su máxima intensidad pero poseen en general un origen común vinculado a alguna etapa de la colisión ordovícica Famatiniana. Los perfiles geofísicos muestran a las cizallas de mayor expresión y amplitud en coincidencia con la presencia de unidades metamórficas contrastadas en sus flancos, indicando que posiblemente se desarrollaron en un campo de alta deformación y compresión. Se ha asumido para las fajas de cizalla una densidad que varía entre 2,68 y 2,69 g/cm<sup>3</sup> en corteza superior y entre 2,88 y 2,89 g/cm<sup>3</sup> en corteza inferior.

Fajas Tres Árboles- Las Lajas; límite occidental del Orógeno Pampeano. Los perfiles gravimétricos han permitido reconocer una zona de cizalla situada al oeste de la sierra de Córdoba, en coincidencia con la denominada cizalla Tres Árboles (Whitmeyer y Simpson, 2003) y Las Lajas (Otamendi *et al.* 1998), en el extremo sur de la Sierra de Comechingones, las que corresponderían a un límite estructural de primer orden. Este límite se extendería desde el extremo norte de Córdoba, en la sierra de Guasapampa, continuando hacia el sur por la cizalla Los Túneles (Bonalmi *et al.*, 1998), para finalmente atravesar todo el borde occidental de la sierra de



Comechingones en Córdoba por las cizallas Tres Árboles y Las Lajas (Otamendi *et al.*, 1998), con una extensión de norte a sur que alcanzaría a más de 250 km. La litología de esta zona de deformación muestra que la misma se desarrolló a diferentes niveles de corteza y que fue esencialmente diacrónica (Martino, 2003). Posee un buzamiento variable pero siempre con definida orientación al este. En conjunto es considerado un límite tectónico que separa gneises cámbricos (Gneis Las Palmas; Bonalumi *et al.*, 1998) de grado medio a alto de migmatitas y esquistos ordovícicos, provenientes de protolitos cámbricos (Complejo Conlara; Sims *et al.*, 1998). En la zona de mayor amplitud, a los 32° S, la secuencia de milonitas y ultramilonitas posee un espesor de 16 km.



**Figura 6.** A) Esquema de reconstrucción palinspástica de Gondwana a los 550 Ma que ilustra la ininterrumpida continuidad de los orógenos, Pampeano, Saldania, Ross y, Delamerian Margins. Modificado de Schwartz *et al.*, 2006. B) Detalle esquemático del OP a la latitud de Córdoba donde se destaca la convergencia oblicua, el sentido de paleosubducción y la ubicación de la lámina tectónica (contacto entre el OP y el CRP).

## Complejos metamórficos famatinianos

Hacia el oeste de la cizalla de Tres Arboles y de su extensión hacia el norte se produce una nueva caída gravimétrica (45 mGal) que corresponde a los complejos metamórficos ordovícicos de San Luis (Figura 4). Los complejos famatinianos son la consecuencia de la amalgamación con el orógeno Pampeano de una cuña de acreción formada por sedimentos eocámbricos que se produjo por un evento deformacional, de metamorfismo y magmatismo conocido como “Ciclo orogénico Famatiniano” (Aceñolaza y Toselli, 1988) y también como Orógeno Famatiniano (Dalla Salda *et al.*, 1992; Rapela *et al.*, 1992). La edad U/Pb de zircones crecidos durante este evento han dados edades promedio de 480 Ma por lo que el pico metamórfico del dominio Famatiniano, al oeste de la cizalla de Tres Arboles, se atribuye al Ordovícico *s.l.* (Famatiniano). El evento compresional D1 fue seguido inmediatamente por un evento extensional que dio lugar a una fábrica D2 que se generó en facies de anfífolita a esquistos verdes. Esta deformación estuvo mayormente confinada al entorno de las zonas de cizalla y fue acompañada por una retrogradación metamórfica y por la intrusión de numerosos cuerpos graníticos y tonalíticos y pegmatitas turmaliníferas (von Gozen y Prozzi, 2005). Esta fase magmática corresponde a la serie granítica G2 de Rapela *et al.* (1992) cuyas edades U-Pb, obtenidas de zircones en granitos de la sierras de San Luis y de Chepes, en La Rioja, arrojaron valores de cristalización promedio de 470 Ma (Camacho and Ireland, 1997). En el dominio pampeano de Córdoba no se han observado demasiadas evidencias de este evento extensional. Podemos mencionar la presencia de zonas de cizalla extensionales menores en la faja Guamanes (Martino, 1993) y la intrusión de pegmatoides graníticos en la región de Mogigasta y Guasapampa (Bonalmi *et al.*, 1998).

### Tectónica Cenozoica y raíz cortical profunda

La separación de los orógenos Pampeano y Famatiniano, amalgamados hacia el final del Ordovícico, en bloques de basamento aislados tuvo comienzo en el Carbonífero superior, dando lugar a la formación de cuencas extensionales que alcanzaron espesores sedimentarios considerables (Azcuy y Morelli, 1970). Este proceso de fragmentación se reactivó durante el Cretácico originando nuevas cuencas de sedimentación continental.

Finalmente la tectónica Andina dio lugar a la exhumación final de los complejos metamórficos y los sedimentos carboníferos y cretácicos que los acompañan, por medio de un modelo estructural representado por grandes bloques basculados, delimitados por fallas inversas con rumbos predominantes en sentido N-S, de tipo lístrico, con planos de falla buzantes hacia el este (Jordan y Allmendinger, 1986) que conforman actualmente la provincia geológica de las Sierras Pampeanas. En los perfiles de AB los efectos de la tectónica andina han sido representados como cuñas de compensación gravimétrica lo que ha permitido un mejor ajuste de los mismos. Introcaso *et al.* (1987) definieron un engrosamiento cortical producido por la tectónica reciente que provocó un efecto negativo en el perfil de las Sierras Pampeanas (Moho gravimétrico). Este efecto negativo de larga longitud de onda es causado por la presencia de rocas de corteza inferior (densidad 2,91 a 2,94 g/cm<sup>3</sup>) en el manto superior (densidad normal de 3,3 g/cm<sup>3</sup>). Para corregir esta modificación del modelo normal se aplicó a los perfiles gravimétricos una corrección similar a la propuesta por los autores (Figuras 3 y 4). Las escamas de corteza inferior que ocupan parte de la corteza superior se correlacionan con las principales fallas lístricas de las Sierras Pampeanas de Córdoba. El despegue se encontraría entre los 15 y 20 km de profundidad es decir en la transición de corteza frágil-dúctil (Criado Roqué *et al.*, 1981; Cominquez y Ramos, 1991; Regnier *et al.*, 1994) y el rechazo máximo calculado sería de 10 km aproximadamente. El estilo estructural fue corroborado con un modelo gravimétrico por Introcaso *et al.* (1987) en una sección que atraviesa las Sierras de Córdoba a los 32°S.

### Cubierta sedimentaria

A la cubierta sedimentaria que se encuentra en la llanura chaco pampeana por encima del cratón se le asignó un espesor de 4 km según Russo *et al.* (1979), y se le fijó una densidad media entre 2,5 y 2,55 g/cm<sup>3</sup>.

## Conclusiones

Los perfiles geofísicos transversales (E-O) estudiados entre los 29°S y 33° S en el sector oriental de las Sierras Pampeanas muestran la existencia de un límite tectónico entre el Orógeno Pampeano y el borde occidental del cratón del Río de la Plata. Este límite, sepultado bajo la llanura chaco-paranaense, tendría una forma ligeramente cóncava hacia el este estando su punto de mayor aproximación al área serrana actual a los 64°O. El contacto entre ambas unidades estaría ocupado por una lámina tectónica de aproximadamente 20 km de ancho, desprendida del cratón, generada por la convergencia oblicua (no ortogonal) del OP hacia el cratón. Esta convergencia necesariamente se habría producido con posterioridad a la consolidación del arco magmático calco-alcalino o sea a partir de los 525 Ma.

El OP, desarrollado entre el Neoproterozoico superior y el Cámbrico Medio en las Sierras Pampeanas Orientales, contiene dos arcos magmáticos diferenciados, uno oriental de tipo calco-alcalino (AMC, granodioritas, monzogranitos, dacitas, riolitas y pórfidos) y otro occidental formado por granitos peraluminosos, asociados a gneises pelíticos y psamíticos. El AMC se destaca en el modelo como una continuidad del alto gravimétrico provocado por el cratón en tanto que el arco occidental está incluido en el sector de gradiente que define la transición hacia el prisma de acreción. En conjunto el OP está representado en los perfiles geofísicos por un elevado gradiente gravimétrico con marcada tendencia descendente hacia el oeste, convalidando la interpretación que este sector del OP está formado por un prisma de acreción cuya densidad es inferior a la del CRP. Considerando la regla general que establece que la dirección de paleosubducción en una zona de sutura o cierre de un orógeno es perpendicular al gradiente gravimétrico y que el sentido es hacia los valores crecientes del mismo, se puede confirmar en base a los perfiles obtenidos que la subducción habría sido hacia el este (según N actual). La tendencia de gradiente decreciente se continúa hacia el extremo occidental de los perfiles en coincidencia con la presencia de complejos metamórficos post-cámbricos desarrollados al oeste del OP, los que muestran una zona de valores gravimétricos negativos que oscilan entre -30 y -75 mGals.

Finalmente se puede observar que pese a la existencia de importantes eventos de extensión, ocurridos entre el Carbonífero y el Cretácico, seguidos por la tectónica compresional del ciclo Andico que dio lugar a la fracturación en bloques de todo el conjunto, la impronta geofísica actual de este sector de las Sierras Pampeanas está fuertemente controlada por los ciclos orogénicos Pampeano y Famatiniano.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración en las tareas de campo de Daniel Vargas, Federico Lince Klinger, Ana Felisa Tavitian Serrano, Javier Benítez, Franco Gaido, Clara Modenesi y Nicolás Nimis.

## Bibliografía

- Aceñolaza, F.G. y Toselli, A. 1981. Geología del Noroeste Argentino. Publicación Especial, Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán, 1287, 212 pp.
- Aceñolaza, F.G. y Toselli, A. 1988. El Sistema del Famatina, Argentina: su interpretación como orógeno de margen continental activo. 5° Congreso Geológico Chileno, 1, 55-67.
- Azcuy, C.L. y Morelli, J. 1970. *The Paganzo Basin. Tectonic and sedimentary characteristics of the Gondwana sequences in Northwestern Argentina*. Sec. Gondw. Symp. Proc. And Papers. I.U.G.S. Marshalltown, S. Africa, 241-247.
- Beck, M.E., 1983. On the mechanism of tectonic transport in zones of oblique subduction. *Tectonophysics*, 93 (1-2), 1-11.
- Black, R., Bayer, R. y Lesquer, A. 1980. *Evidence for late Precambrian plate tectonics in West Africa*. *Nature*, vol. 284: 192.
- Booker, J. R., Favetto, A. y Pomposiello, M.C. 2004. *Low electrical resistivity associated with plunging of the Nazca flat slab beneath Argentina*. *Nature*, vol. 429:399-403. USA.
- Bonalumi, A.; Martino, R.; Sfragulla, J.; Baldo, E., Zarco, J., Carignano, C., Tauber, A., Kraemer, P., Escayola, M., Cabanillas, A., Juri, E. y Torres, B. 1998. Hoja geológica 3166-IV, 1:250.000, Villa Dolores. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR. Boletín 250.
- Bonalumi, A.; Martino, R.; Sfragulla, J.; Carignano, C., and Tauber, A., 2004, Hoja geológica 3363-I, 1:250.000, Villa María: Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR. Boletín 347.

- Bullen, K. 1963. *An introduction to the theory of seismology*. Cambridge University Press, 381 p., Cambridge.
- Camacho, A., Ireland, T.R., 1997. *U–Pb geochronology: Final Report. Geoscientific mapping of the Sierras Pampeanas, Argentine–Australian Cooperative Project*. Australian Geological Survey Organization, unpublished report, SEGEMAR.
- Candiani, J. C., Stuart-Smith, P., Carignano, C. y Miró, R. 2001. Hoja geológica 3163-I, 1:250.000, Jesús María: Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR. Boletín 314.
- Cominguez, A.H. y Ramos, V.A. 1991. La estructura profunda entre Precordillera y sierras Pampeanas de la Argentina: Evidencias de la sísmica de reflexión profunda. *Revista geológica de Chile* 18(1): 3-14.
- Criado Roque, P., Momburu, C. y Ramos, V.A. 1981. Estructura e interpretación tectónica. En: Yrigoyen Ed., *Geología y Recursos naturales de la provincia de San Luis*. En: Yrigoyen (Ed.) 8º Congreso Geológico Argentino. Relatorio: 155-192. Buenos Aires.
- Dalla Salda L., Cingolani, C. y Varela, R., 1992. El Orógeno colisional Paleozoico en Argentina. *Serie de Correlación Geológica*, 9: 165-178.
- Dalla Salda, L., De Barrio, R.E., Echeveste, H.J. y Fernandez, R.R. 2005. El basamento de las Sierras de Tandilia. En: R.E. de Barrio, R.O. Etcheverry, M.F. Caballé y E. Llambías (Editores), *Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires*. Relatorio del 16º Congreso Geológico Argentino :31-50. La Plata.
- Dalziel, I.W.D., 1997. *Neoproterozoic–Paleozoic geography and tectonics; review, hypothesis, environmental speculation*. *Geological Society of America Bulletin* 109, 16–42.
- Demange M., Baldo E.G. and Martino R. D. 1993. *Structural Evolution of the Sierras de Córdoba (Argentina)*. Second Symposium of Andean Geodynamic. Oxford. 1: 62-69
- Escayola, M. P. y Kraemer, P. 2003. Significado Geotectónico de las suturas de Sierras Pampeanas Orientales en la faja orogénica Córdoba: Posible correlación con orógenos brasileños. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(1):69-76. Brasil.
- Gibb, R.A. and Thomas, M.D. 1976. *Gravity signature of fossil plate boundaries in the Canadian Shield*. *Nature*, 262: 199-200.
- Gromet, L. P. and Simpson, C. 1999. *Age of the Paso del Carmen pluton and implications for the duration of the Pampean Orogeny, sierras de Córdoba, Argentina*. 14º Congreso Geológico Argentino: 149-151.
- Gromet, L. P. and Simpson, C. 2000. *Cambrian orogeny in the Sierras Pampeanas, Argentina: ridge subduction or continental collision?* *Geological Society of America Abstracts with Programs*. A-505.
- Gromet, L. P.; Otamendi, J. E.; Miró, R.; Demichelis, A. H.; Schwartz, J. J., and Tibaldi, A. M., 2005. *The Pampean orogeny: ridge subduction of continental collision? Gondwana 12: Geological and Biological Heritage of Gondwana*. 183.
- Haq, S.S. and Davis, D.M., 2010. *Mechanics of fore-arc slivers. Insights from simple analog models*. *Tectonics*, 29, 15-22..
- Hoffman P. F. 1991. *Did the breakout of Laurentia Turn Gondwanaland Inside – Out?*. *Science*, 252: 1409-1412.
- Introcaso, A., Lion, A. y Ramos, V.A. 1987. La estructura profunda de las Sierras de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 42,(1-2): 177-187.
- Jordan, T.E. and Allmendinger, R.W., 1986. *The Sierras Pampeanas of Argentina; a modern analogue of the Rocky Mountain foreland deformation*. *American Journal of Science*, 286: 737-764.
- Lira, R., Millone, H. A., Kirschbaum, A. M. and Moreno, R. S. 1997. *Calc-alkaline arc granitoid activity in the Sierra Norte Ambarasta ranges, Central Argentina*. *Journal of South American Earth Sciences* v. 10:157-177.
- Lizuaín A., Leanza, H. A. y Panza, J. L., 1997. (Coordinación). *Mapa Geológico de la República Argentina*, escala 1 : 2.500.000. Instituto de Geología y Recursos Naturales. SEGEMAR. Buenos Aires .
- Llambías, E. J. Gregori, D. Basei, M. A. S. Varela, R. y Prozzi, C. 2003. Ignimbritas riolíticas neoproterozoicas en la Sierra Norte de Córdoba: evidencia de un arco magmático temprano en el ciclo Pampeano. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58: 572-582.
- Lopez De Luchi, M. G., Favetto, A., Pomposiello, C. and Booker, J. 2005. *Magnetotelluric evidences for the suture between the Río de la Plata and Pampean cratons at 31° 40' S, Córdoba province, Argentina*. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), extended abstracts: 446-449.
- Martinez, P. y Gimenez, M. 2003. Fuerte anomalía gravimétrica positiva en le Sistema de Famatina y su relación con paleosuturas. Explicaciones alternativas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58(2):176-186.
- Martino, R., 1993. La faja de deformación Guamanes; petrografía, estructura interna y significado tectónico. *Sierra Grande de Córdoba, Argentina*. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 48 (1); 21-32.
- Martino, R., 2003. Las fajas de deformación dúctil de las Sierras Pampeanas de Córdoba: una reseña general. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 58, 549-571.
- Miranda, S. e Introcaso, A., 1999. *Cartas Gravimétricas de la Provincia de Córdoba*. Interpretación de la estructura profunda de la Sierra de Córdoba. República Argentina. UNR Editora. Temas de Geociencia N° 1. 45 p. Rosario.
- Miró, R.C. y Sapp, M. 2005. Hoja Geológica 2963-III, Villa Ojo de Agua. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR. Boletín 315.
- Miró, R.; Gaido, M. F. y Candiani, J. C. 1999. Fajas de deformación del batolito Sierra Norte de Córdoba y Santiago del Estero: 15 Congreso Geológico Argentino. 152-155. Salta.
- Münker, C. and Crawford, A. J. 2000. *Cambrian arc evolution along the SE Gondwana active margin: A synthesis from Tasmania–New Zealand–Australia–Antarctica correlations*. *Tectonics* v. 19:415-432.

- Omarini R. H. y Sureda R. 1993. Evolución geodinámica y configuración paleogeográfica en los Andes centrales del proterozoico superior al Paleozoico inferior: modelos, alternativas y problemas. En 12° Congreso Geológico Argentino, Buenos Aires, Argentina, 3: 291-307.
- Otamendi, J., Fagianio, M., Nullo, F. y Patiño Douce, E. 1998. *Petrology, geochemistry and metamorphic conditions of the Achiras Complex, southern Sierras de Comechingones*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 53 (1), 27-40.
- Platt, J.P. 1993. *Mechanics of oblique convergence*. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 98 (B9), 239-256.
- Ramé, G., Kraemer, P. y Introcaso, A. 1995. Evidencia geofísica de un orógeno colisional para el basamento proterozoico de las Sierras de Córdoba, Argentina. I Congreso Latinoamericano de Geofísica Río'95, 2:1041-1044. Brasil.
- Ramé, G.A. y Miró, R.C. 2010. Estudio gravimétrico del borde occidental del Cratón Río de la Plata. 6° Congreso Uruguayo de Geología. Actas en CD, trabajo 071: 6pp. Lavalleja, Uruguay.
- Ramos, V.A. 1988. *Late Proterozoic-Early Paleozoic of South America: a collisional story*. Episodes 11: 168-174.
- Ramos V. A. y Vujovich A. G. 1993. *Laurentia – Gondwana connection: a South American perspective*. GSA, *Abstracts with Programs*, Boston. Vol 1.
- Ramos, V.A., Vujovich, G., Martino, R., y Otamendi, J. 2010. *Pampia: a large cratonic block missing in the Rodinia supercontinent*. Journal of Geodynamics 50 (2010) 243–255.
- Rapela, C. W., Coira, B., Toselli, A. J., and Saavedra, J., 1992. *The Lower Paleozoic Magmatism of southwestern Gondwana and the evolution of the Famatinian orogene*. International Geology Review v. 34 (11):1081-1142.
- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J. and Galindo, E. 1998. *The Pampean orogeny of the southern proto-Andes evidence for Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba*, En: Pankhurst, R.J. y Rapela, C.W., (Eds.). *The Proto-Andean Margin of the South America: Special Publication of the Geological Society* 147, London.
- Rapela, C. W., 2000. *The Sierras Pampeanas of Argentina: Paleozoic Building of the Southern Proto-Andes*, in Cordani, U. G.; Milani, E. J.; Thomaz Filho, A., and Campos, D. A., eds., *Tectonic Evolution of South America*, Rio de Janeiro, 31st International Geological Congress, p. 381-387.
- Rapela, C. W., Pankhurst, R.J., Casquet, C., Fanning, C.M., Baldo, E.G., Gonzalez Casado, J.M. and Dahlkist, J. 2007. *The Río de la Plata craton and the assembly of SW Gondwana*. Earth Science Reviews 83(1-2):49-82.
- Regnier M., Chiu, J., Smalley, R., Isacks, B. & Araujo, M, 1994. *Crustal thickness variation in the Andean foreland, Argentina, from converted waves*. Bulletin of the Seismological Society of America, 84, (4) : 1097-1111.
- Russo, A., Ferello, R. y Chebli, G. 1979. Llanura Chaco Pampeana. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, vol. I: 139-183. Córdoba. Argentina.
- Schwartz, J. J., Gromet, L.P. and Miró, R.C. 2008. *Timing and duration of the Calc Alkaline Arc of the Pampean Orogeny: Implications for the late Neoproterozoic to Cambrian evolution of Western Gondwana*. The Journal of Geology, vol.116: 39-61. USA.
- SEGEMAR, 1996. Relevamientos aeromagnéticos del convenio AGSO. Versión digital inédita.
- Simpson, C., Law, R. D., Gromet, L. P., Miró, R.C., and Northrup, C. J. 2003. *Paleozoic deformation in the Sierras de Córdoba and Sierra de Las Minas, eastern Sierras Pampeanas, Argentina*. Journal of South American Earth Sciences v. 15:749-764.
- Sims, J. P., Skirrow, R., Stuart-Smith, P.G. and Lyons, P. 1997. *Report on Geology and Metallogeny of the Sierras de San Luis and Comechingones, mapa 1:250.000, provincias de San Luis y Córdoba. Geoscientific mapping of The Sierras Pampeanas. Argentina – Australia Cooperative Project*. Anales 28, SEGEMAR. Buenos Aires.
- Sims, J., Ireland, T. R., Camacho, A., Lyos, P., Pieters, P. E., Skirrow, R., Stuart-Smith, P. G., and Miró, R. C. 1998. *U-Pb, Th-Pb, and Ar-Ar geochronology from the Southern Sierras Pampeanas, Argentina: implications for the Paleozoic tectonic evolution of the western Gondwana margin*, in Pankhurst, R. J., and Rapela, C. W., eds., *The Proto-Andean Margin of Gondwana*, Geological Society of London Special Publication, p. 259-281.
- Thomas, M.D. 1983. *Tectonic significance of paired gravity anomalies in the southern and Central Appalachians*; in Hatcher & Williams, 1983. *Contributions to the Tectonics and Geophysics of Mountain Chains*. Geological Society of American, Memoir 158.
- Von Gosen, W. and Prozzi, C. 2005. *Deformation of an Early Paleozoic magmatic arc related to terrane collision: the Sierra de San Luis (Eastern Sierras Pampeanas, Argentina)*. Neues Jbch. für Geologie und Paläontologie Ab. 238(1): 107-160.
- Whitmeyer, S. J., and Simpson, C., 2003. *High strain-rate deformation fabrics characterize a kilometer thick Paleozoic fault zone in the Eastern Sierras Pampeanas, central Argentina*. Journal of Structural Geology v. 25:909-922.
- Willner, 1990. División tectonometamórfica del basamento del noroeste Argentino. En: Aceñolaza, F.G., Miller, H. y Toselli, A.J. (Eds.): *El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino*, pp.113-159. Serie Correlación Geológica 4, Tucumán.
- Woollard, G. 1969. *The relation of gravity anomalies to surface elevation, crustal structure and geology*. University of Wisconsin, Geophysical Polar Research Center. Report 62-9, 292 p.

**Recibido:** 22 de julio de 2011  
**Acceptado:** 1 de octubre de 2011