

# Geología del área del embalse Las Maderas, provincia de Jujuy, con referencia a las acumulaciones bioclásticas fosfáticas del Tremadociano y Floiano

María DUPERRON<sup>1</sup>, Roberto A. SCASSO<sup>1</sup> y María Cristina MOYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales (IGEBA). Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires y CONICET.

<sup>2</sup>CONICET-CIUNSA. Universidad Nacional de Salta, Geología, Salta.

E-mails: maria.duperron@gmail.com, rscasso@gl.fcen.uba.ar, crismoya@unsa.uedu.ar

Editor: Diego A. Kietzmann

## RESUMEN

Se describe la geología del área del Embalse Las Maderas, Provincia de Jujuy, correspondiente a la Cordillera Oriental. La sucesión expuesta corresponde al basamento metamórfico del noroeste (Complejo Puncoviscana), y a las sedimentitas marinas del Paleozoico inferior (Grupos Mesón y Santa Victoria), aflorantes en las sierras que flanquean al embalse. Además se registra la presencia de conglomerados sinorogénicos del Cenozoico (Formación Piquete, correspondiente al Grupo Jujuy, y Formación La Troja), localizados en las depresiones intermontanas. La estructura se caracteriza por la presencia de pliegues volcados asociados a corrimientos que se desarrollan sobre las metasedimentitas de bajo grado del basamento; corresponde a un estilo estructural de piel gruesa, con pliegues de flexión de falla con vergencia oriental y occidental segmentados por fallas paralelas. Se estudiaron con especial énfasis las rocas fosfáticas contenidas en el Grupo Santa Victoria. Su origen no se asocia a un intervalo de fosfogénesis *sensu-stricto*, sino al retrabajo sedimentario de partículas fosfáticas biogénicas. Se diferenciaron estratos con alta concentración de bioclastos dominados por restos de braquiópodos linguliformes (de alto contenido fosfático) de la Formación Floresta que se clasifican como *phosbio-grainstones* y *phosbio-rudstones*, y otros de baja concentración con una proporción significativa de restos de braquiópodos rinconelliformes y trilobites además de braquiópodos linguliformes (de bajo contenido fosfático) en las Formaciones Áspero y San Bernardo, que se clasifican como *biophosbio-rudstones*.

**Palabras clave:** *Ordovícico Inferior, Noroeste Argentino, Fosfatos, Sedimentitas marinas, Braquiópodos linguliformes*

## ABSTRACT

*Geology of the area of Embalse Las Maderas, Jujuy Province, with a note on the Tremadocian-Floian bioclastic-phosphatic accumulations.*

The geology of the embalse Las Maderas area, Jujuy Province in the Cordillera Oriental (Eastern Andean Cordillera) of Argentina is described. The exposed succession corresponds to the metamorphic basement of northwestern Argentina (Puncoviscana Complex) and the marine sedimentary rocks of the lower Paleozoic (Mesón and Santa Victoria Groups), cropping out in the hills around the reservoir. Cenozoic synorogenic conglomerates of the Piquete Formation (Jujuy Group) and The La Troja Formation are located in the intermontane lowlands. The structure is characterized by overturned folds associated with thrusts developed on the low-grade metasedimentary rocks of the basement, consistent with a thick-skin structural style, with East vergent fault flexured folds cut by parallel oriented faults. Phosphatic rocks of the Santa Victoria Group were studied in detail. Their origin is associated to the sedimentary reworking of biogenic particles and it is not constrained to a phosphogenic interval *sensu stricto*. Beds with high phosphate content and high concentration of linguliform bioclasts of the Floresta Formation were classified as *phosbio-grainstones* and *phosbio-rudstones*. Other beds with lower phosphate content in the Áspero and San Bernardo Formations incorporated a significant proportion of rhynchonelliform brachiopods and trilobites together with the linguliform brachiopods, and were classified as *biophosbio-rudstones*.

**Keywords:** *Lower Ordovician, Northwestern Argentina, Phosphate, Marine sediments, Linguliform brachiopods*

## INTRODUCCIÓN

El Ordovícico de la Cordillera Oriental se destaca por presentar las sucesiones tremadocianas más completas de Sudamérica (Moya y Monteros 2011) así como por sus faunas características del Paleozoico temprano, siendo muy abundantes los estudios de trilobites, graptolitos, conodontes y braquiópodos correspondientes a latitudes intermedias a altas (Moya 2003, Benedetto 2003). Se destacan los estudios realizados en años recientes sobre bioestratigrafía (Rubinstein y Toro 2001, Tortello *et al.* 2002, Benedetto 2005, Ortega y Albanesi 2005, Zeballo *et al.* 2006, Toro y Maletz 2007), paleogeografía (Vaccari *et al.* 2006, Sánchez y Benedetto 2007) y paleoecología (Buatois y Mángano 2004, Mángano y Buatois 2004, Waisfeld *et al.* 2006) del Noroeste argentino, sintetizados en Benedetto *et al.* (2007). Con respecto a los braquiópodos linguliformes de la Cordillera Oriental, los estudios específicos sobre su sistemática son escasos, pudiendo nombrarse los de Harrington (1937, 1938) y Ulrich y Cooper (1938), y aquellos realizados recientemente por Benedetto y Muñoz (2015), Mergl *et al.* (2015) y Benedetto *et al.* (2018). Las sucesiones ordovícicas del noroeste han sido muy bien estudiadas en el área de la Quebrada de Humahuaca (Buatois y Mángano 2003, Buatois *et al.* 2003, 2006, Moya *et al.* 2003a, Zeballo *et al.* 2003, 2005a y b, Astini *et al.* 2004, Zeballo y Tortello 2005, Esteban y Tortello 2009, del Huerto Benítez 2013, Tortello *et al.* 2013, Zeballo y Albanesi 2013, Esteban *et al.* 2015, entre otros) y en diferentes localidades de la sierra de Mojotoro (Moya 1988, 1998, 2008). Sin embargo, las localidades conocidas del extremo norte de la sierra de Mojotoro no han sido estudiadas en detalle (Moya 1998; Moya *et al.* 1999, Benedetto y Carrasco 2002, Sánchez y Vaccari 2003, Salas *et al.* 2007, Salas y Vaccari 2012, Cichowolski *et al.* 2015), y aquellas correspondientes a la sierra Las Maderas han sido objeto tan solo de un bajo número de observaciones paleontológicas (Waisfeld y Vaccari 2008). Aparte de esto, las rocas del Ordovícico del noroeste han sido objeto de numerosos estudios prospectivos y sedimentológicos debido a los depósitos fosfáticos sedimentarios que contienen,

constituidos principalmente por acumulaciones de conchillas de braquiópodos linguliformes (Plan Fosforita del Servicio Nacional Geológico Minero, Moya *et al.* 2012, Leanza 1972, Barrionuevo 1976, Fernández 1983, 1984, Moya *et al.* 1994, Moya 1998, Aceñolaza *et al.* 2003, 2008, Saiz Cobbe 2007, Saiz Cobbe y Moya 2008, Chiliguay *et al.* 2008, Castro *et al.* 2009, 2011, Muñoz *et al.* 2012, Eveling *et al.* 2012). El propósito del presente trabajo es dar a conocer el resultado de estudios enfocados a la prospección de fosfatos en el extremo norte de la sierra de Mojotoro y en la sierra Las Maderas, que han permitido definir la estratigrafía y la estructura del sector y comparar las acumulaciones fosfáticas con las de otros sectores de la sierra de Mojotoro y de la Cordillera Oriental. Se han detectado y caracterizado varios niveles fosfáticos que constituyen anomalías de interés, conformados por distintos tipos de partículas fosfáticas cuyos principales rasgos también se dan a conocer por primera vez en este trabajo. El objetivo ulterior de la línea de trabajo desarrollada es analizar en detalle los procesos que llevan a la concentración sedimentaria de las partículas fosfáticas; avances preliminares en este sentido han sido compartidos en Duperron *et al.* (2014), Eveling *et al.* (2015) y Duperron (2016).

## ZONA DE TRABAJO

La zona de trabajo se ubica en la provincia de Jujuy, en proximidad al límite austral con la provincia de Salta y al sur de la ciudad de San Salvador de Jujuy (Fig. 1). Se extiende entre los paralelos 24° 24' y 24° 30' S y entre los meridianos 65° 12' y 65° 21' O. La región pertenece al sector este de la provincia geológica de Cordillera Oriental, representando el límite oriental de la misma. El río Los Sauces fluye en forma paralela al flanco occidental de la sierra de Mojotoro. En el área central los embalses La Ciénaga y Las Maderas, se sitúan en una depresión tectónica flanqueada por la sierra de Mojotoro hacia el oeste y por sierras de bajo relieve hacia el este, denominadas en este trabajo sierra Las Maderas. Hacia el norte, en una zona llana, se encuentran las ciudades de El Carmen y San Antonio. Densamente ve-

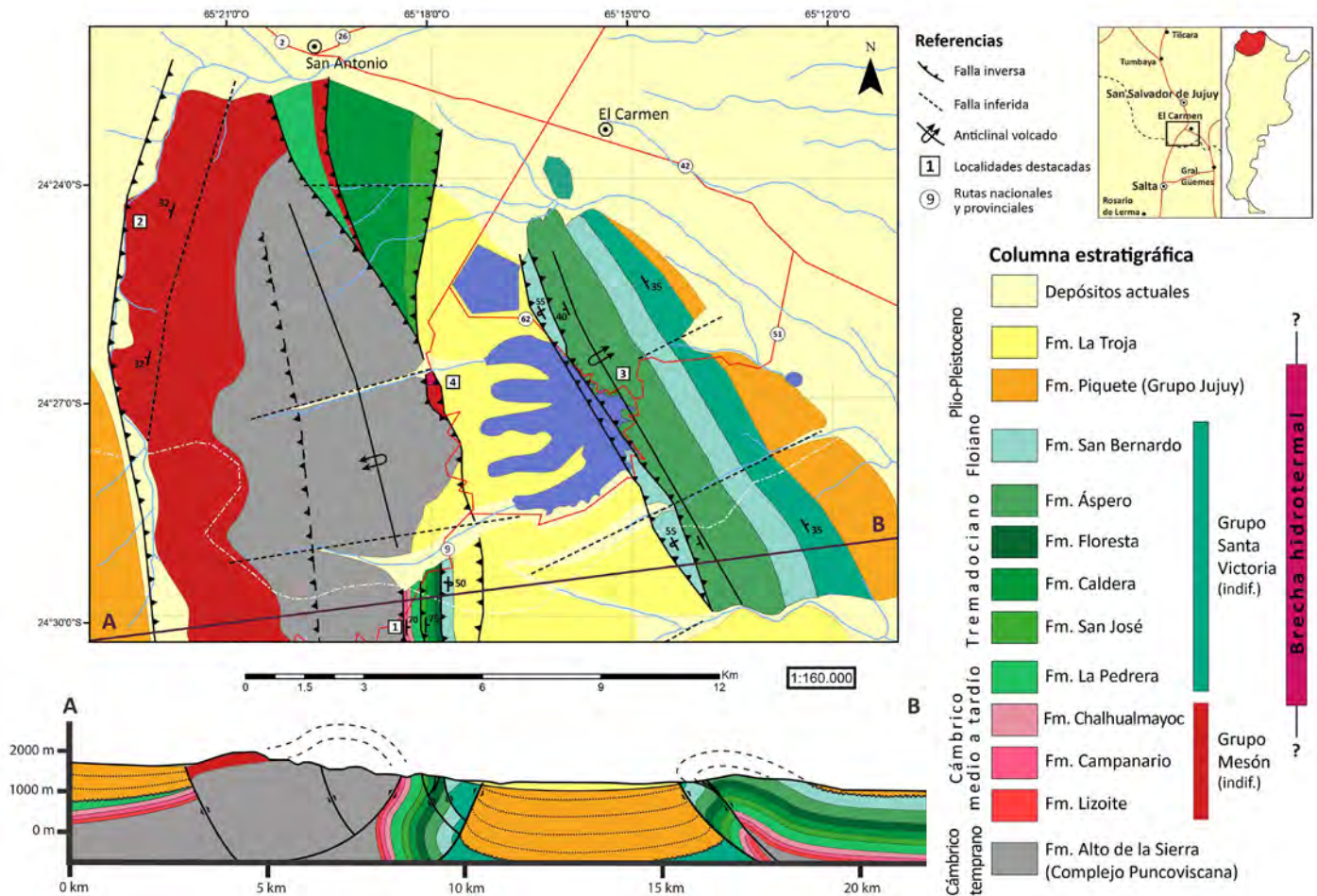
getada por la selva de Yungas, esta zona ofrece escasos afloramientos en las paredes de roca de la quebrada del río Los Sauces, en los cortes de la ruta nacional N°9 (localidad del Abra de Santa Laura), en los caminos que rodean al embalse Las Maderas y en las márgenes del mismo (Fig. 1).

## METODOLOGÍA

Se realizó el levantamiento de un mapa geológico y estructural de la zona de estudio a escala 1:160.000, reconociéndose las principales formaciones y zonas de falla. Se levantó un perfil estratigráfico en la sección del Abra de Santa Laura a lo largo de la ruta 9, sobre el flanco oriental de la sierra de Mojotoro (Fig. 1), y otro en la costa oriental del embalse Las Maderas. En estas secciones se realizaron observaciones sobre litología, tamaño de grano de las rocas, geometría de los estratos, estructuras sedimentarias y contenido fósil; además, se midieron sistemáticamente rumbo e inclinación de las capas con una brújula Brunton, y se tomaron muestras de roca para realizar cortes delgados. En el resto del área los afloramientos son escasos y se encuentran aislados entre la frondosa cubierta vegetal de la Selva de Yungas. Las observaciones geológicas realizadas en el campo se complementaron con fotointerpretación, utilizándose para este fin imágenes satelitales Landsat y NOAA y un modelo de elevación digital de la zona.

Las rocas se asignaron a las unidades formacionales del Grupo Santa Victoria definidas por Moya (1998) y Moya *et al.* (2012) en la sierra de Mojotoro, en función de su litología y escaso contenido fosilífero. De esta forma se confeccionaron las columnas sedimentarias de la sierra de Mojotoro y la sierra Las Maderas (Fig. 2). Las figuras 3 y 4 contienen fotografías de las formaciones en afloramiento.

Se realizaron descripciones petrográficas de muestras de roca estudiadas al microscopio de polarización (Fig. 5). Se utilizó la clasificación de Dott (1964) modificada por Pettijohn *et al.* (1972) para todos los cortes, excepto para los correspondientes a las concentraciones fósiles de las Formaciones Floresta, Áspero y San Bernar-



**Figura 1.** Mapa geológico y sección estructural del área del embalse Las Maderas, sector norte de la sierra de Mojotoro en Jujuy. Localidades: 1. Abra de Santa Laura, flanco oriental de la sierra de Mojotoro; 2. Río Los Sauces, flanco occidental de la sierra de Mojotoro; 3. Margen este del embalse Las Maderas, flanco occidental de la sierra Las Maderas; 4. Brecha hidrotermal.

do. Para ellos se utilizó la clasificación de Dunham (1962) modificada por Embry y Klován (1971) y posteriormente por Trappe (2001), para rocas fosfáticas.

## ESTRATIGRAFÍA

### Basamento

El basamento en la zona de estudio está conformado por las metamorfitas de bajo grado tradicionalmente asignadas a la Formación Puncoviscana (Turner 1960), que en la sierra de Mojotoro fueron divididas en las Formaciones Chachapoyas, Alto de la Sierra y Guachos (Moya 1998, Aparicio González *et al.* 2010).

*Formación Alto de la Sierra (Aparicio González *et al.* 2010) - Cámbrico inferior*

**Distribución areal, relaciones estratigráficas:** la Formación Alto de la Sierra constituye el núcleo de la sierra de Mojotoro (sector oeste del mapa geológico en Fig. 1). Fue reconocida sobre la ruta nacional n°9 hacia el oeste del Abra de Santa Laura, y en afloramientos saltuarios sobre el flanco occidental de la sierra de Mojotoro. Sobre el flanco oriental de la sierra, la Formación Alto de la Sierra se apoya en contacto tectónico sobre el Grupo Mesón (Fig. 3a). La Discordancia Tilcárca (Turner y Méndez 1975) separa a esta unidad del Grupo Mesón (Cámbrico) en el sector occidental de la sierra de Mojotoro (Moya 1998).

**Litología:** La formación está compuesta por metavacaques y metapelitas subordinadas de coloración grisácea finamente estratificadas en el sector del Abra de Santa

Laura (Fig. 3a), y a lo largo de la ruta nacional N°9 hacia el sur de esta localidad por metareniscas con intercalaciones de metapelitas crenuladas, con venillas de cuarzo.

Los metavacaques se categorizan como grauvacaques feldespáticos. La ortomatriz está conformada por cuarzo, minerales opacos y cristales orientados de clorita. La fracción clástica se compone principalmente de cuarzo monocristalino, feldespato potásico y plagioclasa, y fragmentos líticos volcánicos ácidos a básicos que representan un 20% de los clastos (Fig. 5a). **Correlación:** Aparicio González *et al.* (2010) describieron a la Formación Alto de la Sierra como metavacaques grises gruesamente estratificados, con intercalaciones de metafangolitas. En los afloramientos más occidentales estas autoras descri-

bieron venas de cuarzo que atraviesan a los metavaques, y clivaje de crenulación en las intercalaciones metapelíticas; ambos rasgos fueron observados en los afloramientos circundantes al embalse Las Maderas. Además, es destacable el importante contenido de fragmentos líticos volcánicos, ausentes en las rocas de las Formaciones Chachapoyas y Guachos; en las rocas estudiadas este litotipo alcanza el 20% de la fracción clástica. Estos hechos permiten asignar las rocas estudiadas a la Formación Alto de la Sierra.

**Grupo Mesón (Turner 1960) - Cámbrico medio a superior**

Por encima del basamento se encuentra el Grupo Mesón del Cámbrico que comprende a las Formaciones Lizoite, Campanario y Chalhualmayoc (Keidel 1943, Turner 1960) representadas por cuarcitas blanquecinas, rosas y moradas con un paquete intermedio heterolítico.

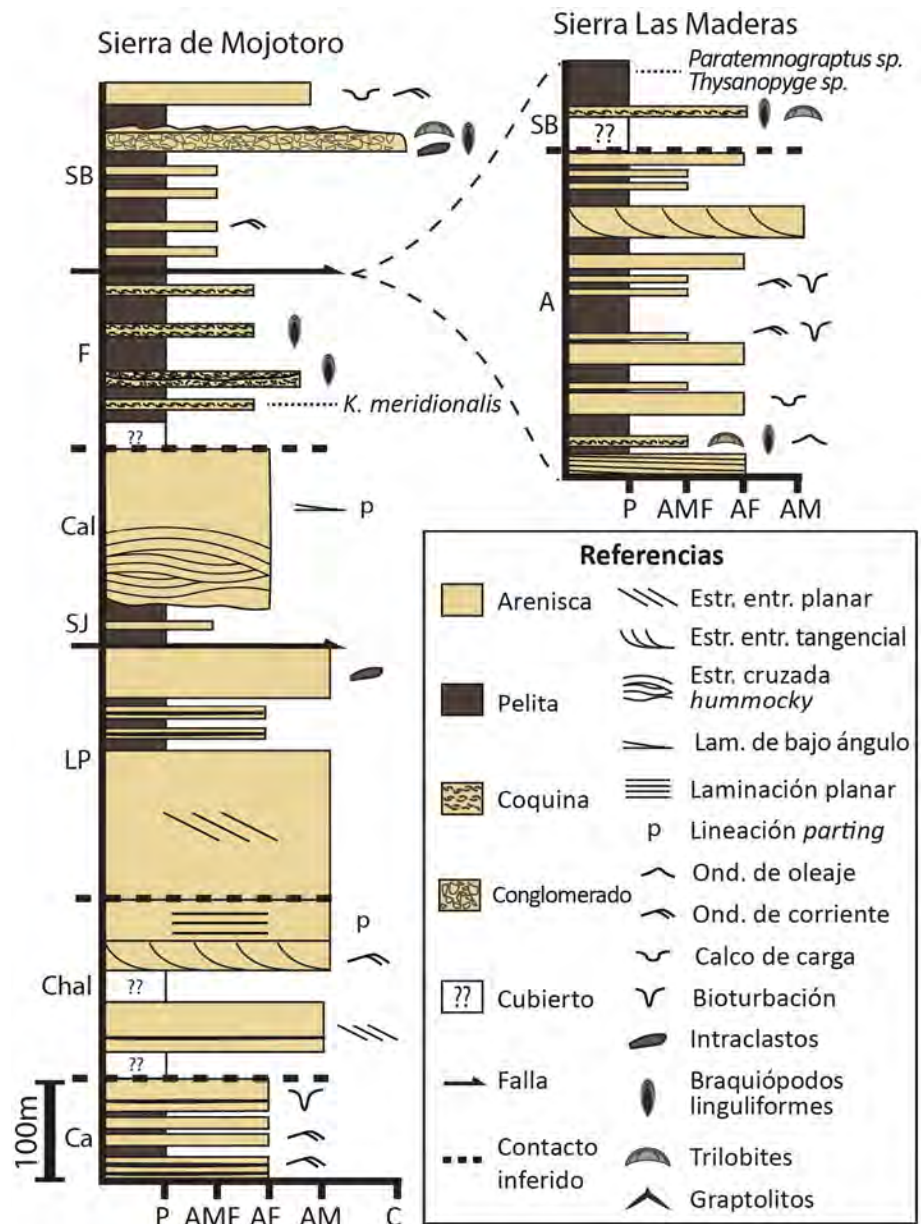
**Formación Lizoite (Turner 1960) - Cámbrico medio**

**Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:** la Formación Lizoite aflora sobre el flanco occidental de la sierra de Mojotoro. Se la reconoció en afloramiento sobre la ruta nacional N°9 al oeste del Abra de Santa Laura. Por ser un afloramiento parcial, no pudo estimarse el espesor mínimo. La unidad se apoya en discordancia angular (discordancia Tilcárca) sobre la Formación Alto de la Sierra en el sector centro-occidental de la sierra de Mojotoro (Moya 1998). No se observó el contacto con la Formación Campanario.

**Litología:** la Formación Lizoite está representada en la zona de estudio por un conglomerado basal de grano fino y matriz arenosa, cubierto por areniscas pardo-rosáceas gruesamente estratificadas.

**Formación Campanario (Turner 1960) - Cámbrico medio**

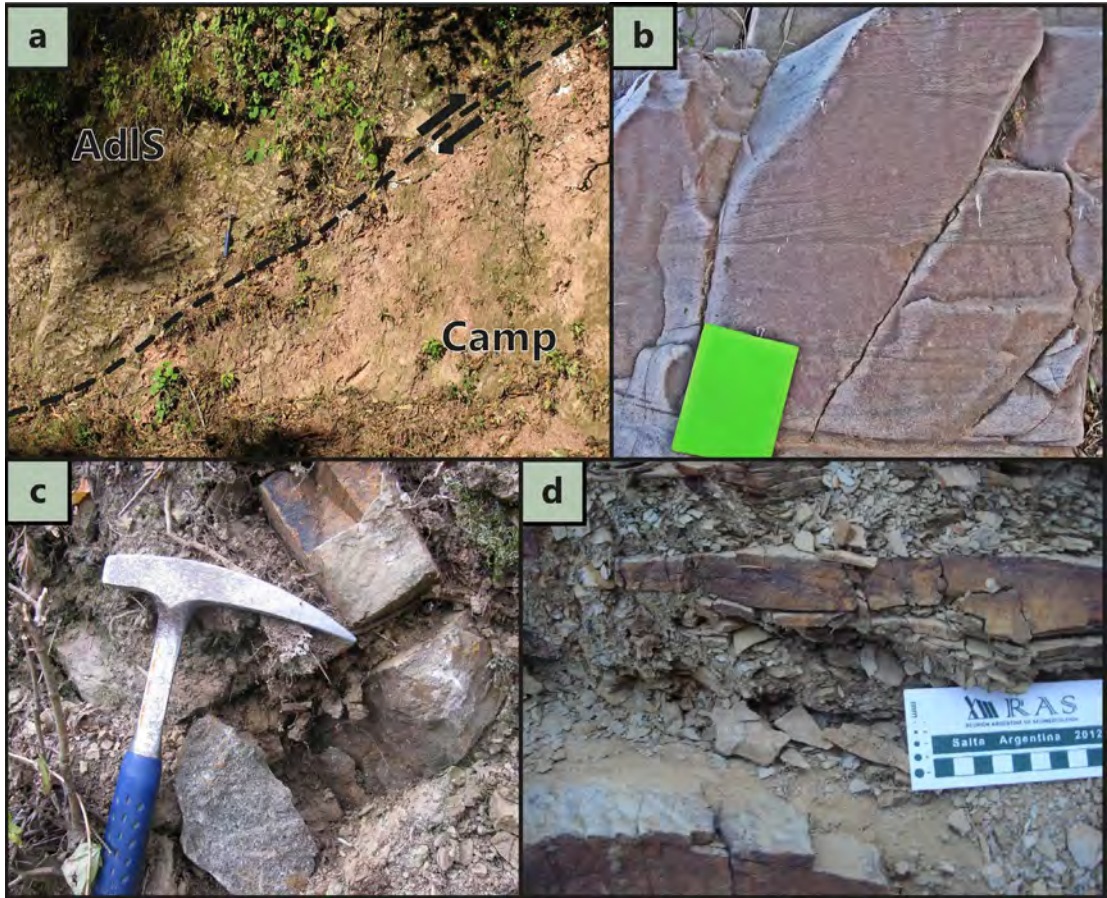
**Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:** La Formación Campanario se ubica en el flanco oriental de la sierra de Mojotoro en la sección del Abra de Santa Laura. Se encuentra en contacto tectónico con la Formación Alto de la Sierra, y el contacto con la Formación Chalhualmayoc está cubierto (Figs. 1 y 2). El espesor mínimo es de 100 m.



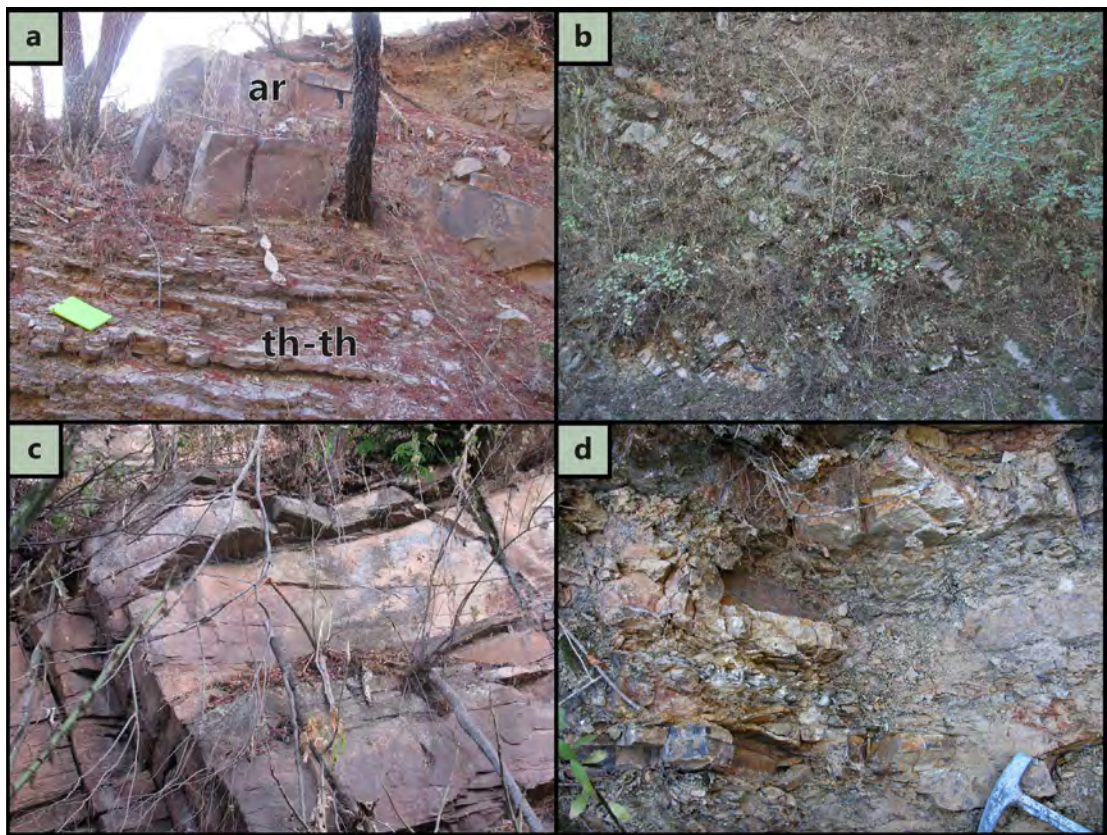
**Figura 2.** Columnas sedimentarias esquemáticas de las sierras de Mojotoro y Las Maderas, modificadas de Duperron (2016). En las sierras afloran únicamente las unidades correspondientes al Paleozoico temprano, por lo que no están representadas las Formaciones Piquete y La Troja del Cenozoico. Formaciones: Ca: - Campanario, Chal: Chalhualmayoc, LP: La Pedrera, SJ: San José, Cal: Caldera, F: Floresta, A: Áspero, SB: San Bernardo.

**Litología:** La Formación Campanario está conformada por intercalaciones de areniscas con laminación ondulítica o estratificación entrecruzada y lutitas con laminación ondulítica, de color morado (Fig. 3a). Los bancos presentan estratificación mediana a fina. Ambos tipos de litologías presentan bioturbación representada por especímenes del icnogénero *Skolithos*. La bioturbación es en general más intensa en los estratos de mayor espesor, y hacia el techo de los estratos. El sector superior de la

formación se caracteriza por la presencia de areniscas con laminación ondulítica, horizontal o masivas de mayor espesor, con escasas y delgadas intercalaciones de lutitas. En sección delgada, las arenitas que conforman la Formación Campanario se clasifican como arenitas cuarzosas y presentan selección buena a moderada con media en arena fina. La matriz está compuesta por cuarzo, óxidos de hierro y filosilicatos, y el cemento es representa-

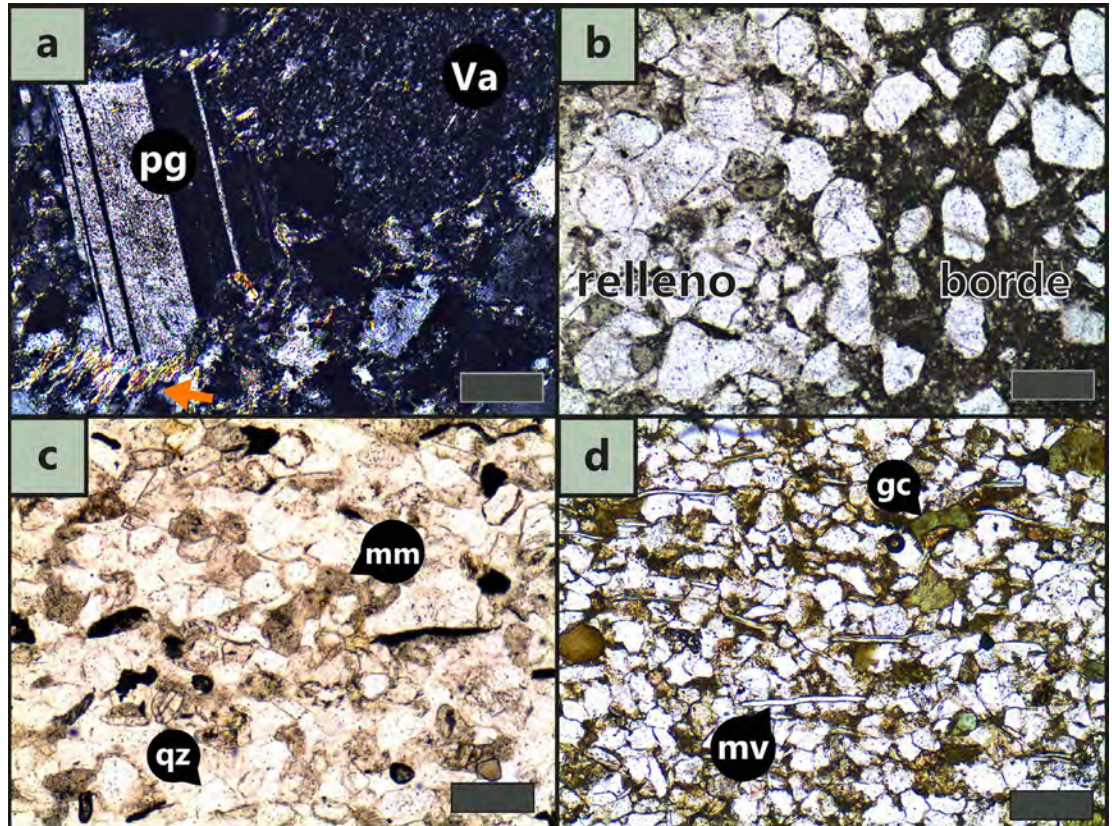


**Figura 3.** Paleozoico inferior de la sierra de Mojotoro. a) Abra de Santa Laura, Formación Alto de la Sierra (AdIS) en contacto tectónico con la Formación Campanario (Camp), Grupo Mesón; b) Cuarzitas con estratificación entrecruzada tangencial, con reversión de paleocorrientes. Grupo Mesón, río Los Sauces; c) Bancos bioclásticos fosfáticos de la Formación Floresta, Grupo Santa Victoria; d) Areniscas tectónicamente invertidas: los calcos de carga de la base de los bancos apuntan hacia arriba. Formación San Bernardo, Grupo Santa Victoria.



**Figura 4.** Afloramientos del Grupo Santa Victoria en la sierra Las Maderas. a) Formación Áspero, bancos gruesos de areniscas (ar) con delgadas intercalaciones heterolíticas del tipo "thin-thick" (th-th) (conjunto litológico 1); b) Formación Áspero, bancos tabulares de areniscas micáceas intercalados en intervalos pelíticos (conjunto litológico 2); c) Formación Áspero, areniscas rojizas con estratificación entrecruzada tangencial (conjunto litológico 3); d) Formación San Bernardo, pelitas fosilíferas con delgados bancos arenosos.

**Figura 5.** Cortes delgados de las formaciones del Paleozoico inferior. a) Formación Alto de la Sierra. Plagioclasa (pg), lítico volcánico ácido (Va); se observan cristales de clorita orientados (marcados con flechas) que crecen a partir de los márgenes del cristal de plagioclasa y perpendicularmente al esfuerzo tectónico principal; b) Formación Campanario, Grupo Mesón; arenita cuarzosa. Sección longitudinal parcial de *Skolithos*; el relleno es de cuarzo con crecimiento secundario, el borde de material pelítico presenta clastos de cuarzo orientados; c) Formación Caldera, Grupo Santa Victoria. Arenita lítica con abundantes líticos metamórficos de bajo grado (mm), cuarzo monocristalino (qz) y clastos alterados a óxidos de hierro; d) Formación Áspero, Grupo Santa Victoria. Arenita cuarzosa, con abundantes clastos intracuencales de glauconita (gc) y láminas de muscovita (mv). Escala: 200 micrones.



do por crecimiento secundario de cuarzo y pátinas de óxido de hierro. Se observó en corte delgado una estructura tubular de 2cm de largo, con bordes pelíticos y relleno de arena cuarzosa, asignada al icnogénero *Skolithos* (Fig. 5b).

**Correlación:** De acuerdo con la descripción de Moya (1998), en la sierra de Mojotoro la Formación Campanario está conformada por facies heterolíticas de areniscas y lutitas bioturbadas, con laminación paralela, ondulítica y estratificación fina a mediana. Hacia el tope de la unidad aumenta la frecuencia y espesor de los bancos de arenisca en transición a la Formación Chalhualmayoc. Por su similitud litológica se asignaron las rocas estudiadas a la Formación Campanario, correspondiendo el tramo superior a la transición a la Formación Chalhualmayoc.

#### *Formación Chalhualmayoc (Turner 1960) - Cámbrico superior*

**Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:** La Formación Chalhualmayoc está expuesta en toda la ladera occidental de la sierra de Mojotoro, y aflora también en la sección del Abra de Santa

Laura, por lo que está presente en ambos flancos de la sierra (Fig. 1). No fue posible identificar el contacto con la Formación La Pedrera que yace por encima en la sección del Abra de Santa Laura, ya que su litología es muy similar y presentan intenso fracturamiento que dificulta diferenciarlas. El espesor mínimo en la zona del Abra de Santa Laura es de 140 m.

**Litología:** La formación está representada por areniscas medias a finas de color morado, blanco rosáceo y gris rosáceo, caracterizadas por la presencia de estratificación entrecruzada y laminación ondulítica. En la sección del Abra de Santa Laura el intervalo correspondiente a la Formación Chalhualmayoc presenta varios segmentos cubiertos o con intensa fracturación que da a las rocas un aspecto masivo. Se identificaron un primer tramo con estratificación entrecruzada planar con tendencia estratocreciente e intercalaciones finas de pelitas, y un segundo tramo sin intercalaciones de pelitas conformado por areniscas con entrecruzamientos planares y tangenciales y laminación horizontal con lineación *parting*; en los afloramientos del río Los Sauces dominan los bancos are-

nosos espesos con estratificación entrecruzada recta o tangencial (Fig. 3b).

En sección delgada, las areniscas de la Formación Chalhualmayoc se clasifican como areniscas cuarzosas o sublitoareniscas, con buena selección y tamaño medio arena media a fina. La fracción clástica es conformada por cuarzo monocristalino, y en menor medida por fragmentos líticos metamórficos de bajo grado y volcánicos, y por feldespatos potásicos. El cemento está representado por crecimiento secundario de cuarzo y por óxidos de hierro.

**Correlación:** De acuerdo con Moya (1998) la Formación Chalhualmayoc está constituida por bancos gruesos de arenisca cuarzosa fina y mediana, de color rosado-morado y blanquecino. Estos comúnmente presentan estratificación entrecruzada de alto ángulo o laminación planar horizontal o de bajo ángulo. Algunos bancos incluyen intraclastos pelíticos morados o verdes, o delgados pavimentos de conglomerado fino. Sánchez y Salfity (1999) describen además la presencia de intercalaciones finas de arenisca fina o limolita micácea entre estas litologías. Por la similitud litológica con las rocas anali-

zadas, se las asignó a la Formación Chalhualmayoc.

### Grupo Santa Victoria (Turner 1960) - Cámbrico superior a Ordovícico Medio

Las rocas ordovícicas, representadas por una alternancia de areniscas y pelitas con importantes faunas de trilobites, graptolitos y trazas fósiles, fueron descritas por Harrington (1957); en la zona de la sierra de Mojotoro, el autor definió a las Formaciones San José, Caldera, Áspero, San Bernardo, Mojotoro y Santa Gertrudis. Moya (1988) ajustó los límites de estas definiciones e identificó dos unidades más, las Formaciones La Pedrera y Floresta. Posteriormente, Moya (1998) realizó una síntesis estratigráfica y una interpretación paleoambiental de las unidades del Paleozoico inferior en la sierra de Mojotoro; éste el esquema estratigráfico que se ha seguido para las unidades del Grupo Santa Victoria en el presente trabajo (Figs. 1 y 2). Quedan excluidas de este estudio las Formaciones Mojotoro y Santa Gertrudis, que no afloran en la zona de trabajo.

#### *Formación La Pedrera (Moya 1988) - Cámbrico superior (Furongiano)*

*Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:* Se identificó a la Formación La Pedrera en la sección del Abra de Santa Laura y en un afloramiento en el extremo norte de la sierra de Mojotoro. Se infiere por observación de las imágenes satelitales en el perfil del Abra de Santa Laura la presencia de una falla que atraviesa la quebrada que separa los afloramientos de la Formación La Pedrera y los de la Formación San José suprayacente, por lo que el contacto entre ellas sería tectónico (Figs. 1 y 2). El espesor local de la Formación La Pedrera es de 260 m.

*Litología:* La Formación La Pedrera está conformada por un primer paquete de areniscas grises blanquecinas con estratificación entrecruzada gruesa a mediana, interrumpidas por un intervalo de pelitas interestratificadas con areniscas finas que presentan laminación ondulítica o heterolítica *flaser*; seguido por un paquete de arenisca con estratificación poco marcada por el alto grado de fracturación, en el que se observaron intraclastos pelíticos. Las areniscas correspondientes al intervalo

de grano más fino se clasifican como subarcosas, con buena selección y media en arena muy fina. Son conformadas principalmente por cuarzo monocristalino, y en menor medida por feldespatos potásico y por fragmentos líticos volcánicos. La matriz se concentra en láminas más ricas en material fino como parches subcirculares a ovalados de contorno irregular, y está compuesta por cuarzo, illita, clorita y óxidos de hierro. El cemento corresponde a crecimiento secundario de cuarzo y pátinas de hierro.

*Correlación:* Según Moya (1998) la Formación La Pedrera está compuesta por sucesión de areniscas de color blanco amarillento y gris blanquecino con estratificación gruesa a muy gruesa, con laminación paralela o de bajo ángulo e intraclastos de pelita en el sector inferior; y bancos lenticulares con estratificación entrecruzada en el sector superior. Los bancos lenticulares son separados entre sí por delgados paquetes de arenisca fina y lutita. Finalmente, hacia el techo la Formación La Pedrera presenta bancos con estratificación cruzada *hummocky* (HCS) intercalados con lutitas. La unidad presenta un intervalo psamosefítico basal ausente en las secciones al norte de la Ciudad de Salta. Se correlacionó esta unidad con el conjunto de areniscas y lutitas estudiado por su litología y posición estratigráfica.

#### *Formación San José (Harrington 1957)- Tremadociano*

*Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:* En la zona de estudio se reconoció a la Formación San José en la sección hacia el este del Abra de Santa Laura, es decir en el flanco oriental de la sierra de Mojotoro. También se la identificó en un afloramiento en el extremo norte de esta sierra. El espesor mínimo, medido en el único afloramiento de esta formación en la sección, es de 15 m.

*Litología:* La Formación está conformada por un intervalo pelítico de poco espesor, pardo amarillento en la base y gris claro hacia el techo, con delgadas intercalaciones de arenisca (Fig. 2). El contacto con la Formación Caldera suprayacente está representado por un intervalo de intercalaciones de wacke y lutitas con bancos de arena gris clara que presentan laminación inclinada de bajo ángulo, truncadas por

un cuerpo arenoso con HCS y laminación paralela.

*Correlación:* La Formación San José está constituida por lutitas arcillosas pardo-amarillentas y lutitas limosas gris-ceniza y gris-verdoso, con intercalaciones de wackes finas, y presenta un espesor de 100 a 150 m (Moya 1998). Hacia arriba presenta intercalaciones de wacke y lutita fosilíferas con bancos de arenisca con HCS, que representan la transición a la Formación Caldera. En la zona de estudio se encontraron rocas comparables litológicamente en las que se incluye el intervalo psamo-pelítico con HCS superior. El espesor de este conjunto litológico es de 15 m, mucho menor a los espesores registrados por Moya (1998) en el tramo medio de la sierra de Mojotoro. Como se mencionó antes, el contacto con la Formación La Pedrera es tectónico; se interpreta que la falla que separa ambas formaciones deja aflorando un espesor reducido correspondiente al intervalo superior de la Formación San José (ver sección estructural en la Fig. 1).

#### *Formación Caldera (Harrington 1957) - Tremadociano*

*Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:* Se identificó a la Formación Caldera en la sección del Abra de Santa Laura, y en el extremo norte de la sierra de Mojotoro (Fig. 1); no se pudo apreciar su contacto con la Formación Floresta, que está cubierto. El espesor mínimo es de 160 m.

*Litología:* La Formación Caldera está conformada por un cuerpo arenoso compuesto por bancos mediana a gruesamente estratificados de areniscas castañas medianas a finas con estratificación entrecruzada y laminación de bajo ángulo; entre éstos se intercalan bancos finamente estratificados de pelitas. En el tramo inferior, los bancos arenosos presentan HCS y laminación horizontal con *parting*. Las rocas del tramo inferior de la Formación se clasifican como arenitas líticas, con buena selección y media en arena fina. La fracción clásica está compuesta por cuarzo monocristalino, abundantes fragmentos líticos metamórficos de bajo grado, y cantidades minoritarias de feldespatos (Fig. 5c).

*Correlación:* Según la descripción de Moya (1998), la unidad está conformada por

areniscas cuarzosas de grano medio con estratificación entrecruzada y laminación horizontal, que presentan intercalaciones finas de pelitas bioturbadas. En los tramos inferior y superior dominan secuencias de HCS dentro de las cuales se presentan en ocasiones niveles de coquina. Por su similitud litológica y posición estratigráfica se correlaciona el cuerpo arenoso estudiado con la Formación Caldera.

#### *Formación Floresta (Moya 1988) – Tremadociano*

**Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:** Se reconoció a la Formación Floresta en la sección del Abra de Santa Laura (Fig. 1). Esta unidad está en contacto tectónico con la Formación San Bernardo; la Formación Áspero que estratigráficamente se debería encontrar por encima de la Formación Floresta no aflora en la sección del Abra de Santa Laura. El espesor mínimo estimado es de 125 m.

**Litología, contenido fósil:** En la zona de estudio se reconoció un intervalo predominantemente pelítico con intercalaciones de bancos de concentraciones fósiles de composición fosfática (Fig. 3c). Se identificaron un primer tramo, en el que las intercalaciones son más abundantes y espesas, y un segundo tramo en el que son menos importantes (Fig. 2). En general la estructura interna no pudo describirse en el campo por el alto grado de meteorización que presentaban los afloramientos; en algunos bloques se observó laminación paralela o inclinada de bajo ángulo. En el primer tramo de la Formación se reconoció la presencia de una concentración con trilobites correspondientes al género *Kainella*; a excepción de este nivel, todas las coquinas están conformadas predominantemente por restos de braquiópodos inarticulados. Las acumulaciones bioclásticas se clasifican como *phosbio-grainstones* y *phosbio-rudstones* (Trappe 2001). Están conformadas principalmente por granos de cuarzo, y por conchillas fragmentadas de braquiópodos inarticulados que representan hasta el 30% de la fracción clástica en algunos casos. La matriz está conformada principalmente por sericita, y el cemento por crecimiento secundario de cuarzo, óxidos de hierro, o en algunos casos cemento fosfático asociado a bioclastos parcialmente disueltos. Las acu-

mulaciones bioclásticas fosfáticas correspondientes a esta unidad así como a las Formaciones Áspero y San Bernardo se describen con mayor detalle en el apartado denominado “Los niveles fosfáticos del Tremadociano y Floiano”.

**Edad y correlación:** La similitud litológica entre el intervalo descrito y la Formación Floresta descrita por Moya (1998) y Moya *et al.* (2012), así como la presencia de trilobites del género *Kainella*, asignables a la Biozona de *Kainella meridionalis* (Harrington y Leanza, 1957) y abundantes coquinas fosfáticas permiten identificar la sucesión como el tramo inferior de la Formación Floresta. Sánchez y Vaccari (2003) y Vaccari *et al.* (2010) citaron la presencia de trilobites del género *Kainella* en la Formación Caldera, asignándole a la misma una edad tremadociana temprana tardía. Moya (1998) y Moya *et al.* (2012) registraron la presencia de asociaciones correspondientes a las biozonas de *Parabolina (N.) frequens* (Tremadociano inferior bajo) y de *Kainella meridionalis* (Tremadociano inferior alto) en esa Formación, y describieron un intervalo de amplia distribución regional de lutitas intercaladas con areniscas con HCS portadoras de *Kainella meridionalis* correspondiente al tramo inferior de la Formación Floresta. Asignamos por lo tanto una edad tremadociana temprana tardía al intervalo inferior de la Formación Floresta. Por otro lado, Sánchez y Vaccari (2003) registraron en el Abra de Santa Laura, pocos metros por encima de un nivel con *Kainella meridionalis*, la presencia de *Asaphelus catamarcensis* Kobayashi (Cámbrico tardío - Tremadociano tardío), *Bienvillia* sp., y una nueva especie de *Parabolinella* Brogger que se encuentra en las Biozonas de *Kainella meridionalis* y *Bienvillia tetragonalis-Conophrys minutula*. Los autores asignaron esta asociación de trilobites a la Biozona de *B. tetragonalis-C. minutula*, correspondiente al Tremadociano superior bajo. Por ello, consideramos que el intervalo de la Formación Floresta expuesto en el Abra de Santa Laura se habría depositado entre el Tremadociano inferior alto y el Tremadociano superior bajo.

Llama la atención la diferencia en la composición taxonómica de las acumulaciones bioclásticas estudiadas con respecto a aquellas presentes en otras localidades.

En la sección del Abra de Santa Laura la gran mayoría de los niveles se componen casi exclusivamente de restos de braquiópodos inarticulados. En contraste, en las secciones descritas por Moya *et al.* (2012) hacia el sur del Abra de Santa Laura, las concentraciones bioclásticas de la Formación Floresta asignables a la Biozona de *Kainella meridionalis* están compuestas mayoritariamente por restos de braquiópodos articulados y trilobites; destacándose en el tercio superior del intervalo que las contiene la presencia de un nivel bioclástico comparable a los descritos en este trabajo. Durante el mismo intervalo temporal, se registran conglomerados con matriz fosilífera rica en restos de braquiópodos articulados y trilobites en la Formación Devendeus, en la localidad del Angosto La Quesera (Moya *et al.* 2003b); y acumulaciones bioclásticas en la Formación Rupasca (correspondiente al entorno de la quebrada de Humahuaca) que han sido objeto de estudios de detalle sobre las faunas de trilobites y braquiópodos inarticulados que contienen (Balseiro y Marengo 2008, Balseiro *et al.* 2011, Benedetto y Muñoz 2015), pero cuya composición taxonómica no ha sido detallada. Es decir que no hay registros conspicuos de concentraciones fosilíferas dominadas por braquiópodos inarticulados correspondientes al intervalo de depositación de la Formación Floresta.

La diferencia entre el espesor mínimo medido en el Abra de Santa Laura y el registrado por Moya (1998) se explica por la estructura de la zona; se interpreta que la falla que atraviesa a la Formación Floresta en el sector oriental de la sección apoya por encima a la Formación San Bernardo, quedando en profundidad la Formación Áspero y parte del espesor de la Formación Floresta (ver corte geológico en Fig. 1).

#### *Formación Áspero (Harrington 1957) – Tremadociano*

**Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:** La Formación Áspero aflora en la sierra Las Maderas tanto sobre el flanco occidental como sobre el oriental (Fig. 1), mientras que en la sección del Abra de Santa Laura no se registra su presencia. El contacto entre la Formación Áspero y la Formación San Bernardo está



cubierto. El espesor estimado para la Formación Áspero es de 500 m.

**Litología:** En la zona de estudio se reconocieron tres tipos de litologías principales (Fig. 2): 1) Secuencias estratodecrecientes conformadas por espesos cuerpos lenticulares a lentiformes de arenisca que gradan a intercalaciones finas de areniscas y pelitas; este intervalo se caracteriza por la presencia de trazas fósiles correspondientes a la icnofacies de *Cruziana*. La sucesión presenta una sección inferior con areniscas y pelitas finamente interestratificadas (intercalaciones *thick-thin*) de color castaño rojizo con laminación ondulítica de oleaje, que alternan con intervalos arenosos de varios metros de espesor conformados por bancos con laminación horizontal o de bajo ángulo y óndulas de oleaje en el techo o estructura masiva cuando la bioturbación es importante (Fig. 4a). La laminación horizontal dentro de los bancos arenosos potentes presenta variaciones en el espesor de las láminas, con intercalación de capas más finas. Los segmentos psamo-pelíticos pueden presentar intercalaciones de niveles de concentraciones fósiles conformadas por trilobites, braquiópodos rinconelliformes y braquiópodos linguliformes. En la sección superior las lentes de arenisca de color gris presentan estratificación entrecruzada de bajo ángulo, con mayor proporción de pelitas y niveles más delgados de areniscas con laminación ondulítica de corriente; se observan calcos de carga y trazas fósiles diversas, y desaparecen los niveles de coquinas. 2) Conjuntos de lutitas intercaladas con bancos tabulares de arenisca micácea pardo-verdosa con estratificación fina y media. Los niveles de areniscas intercalados dentro de las pelitas presentan laminación ondulítica, mientras que aquellos correspondientes a intervalos más arenosos presentan laminación horizontal o bien bioturbación pervasiva (Fig. 4b). 3) Areniscas rojizas lenticulares de estratificación mediana a gruesa con estratificación entrecruzada tabular o tangencial y laminación horizontal (Fig. 4c). Se observa en algunos bancos que la dirección de inclinación de las caras frontales es normal a la dirección de elongación de las lentes. El primer conjunto litológico corresponde al sector inferior de la Formación Áspero, mientras que el segundo y

tercero aparecen intercalados en el sector superior. Las concentraciones fósiles correspondientes al primer intervalo se clasifican como *biophosbio-rudstones* (Trappe 2001). Las areniscas pardo-verdosas del segundo conjunto litológico se clasifican como arenitas cuarzosas, con buena selección y media en arena fina a muy fina. Están compuestas por cuarzo dominante, y por cantidades accesorias de feldespatos, muscovita, y componentes intracuencales como glauconita y restos de lingúlidos (Fig. 5d). La matriz es clorítica o sericítica, y el cemento es representado por crecimiento secundario de cuarzo, óxidos de hierro y carbonato de calcio.

**Contenido fósil:** Se encontraron restos de especímenes de trilobites, braquiópodos articulados e inarticulados. Se hallaron además diversas trazas fósiles, entre las que se identificaron individuos de los icnogéneros *Cruziana*, *Rusophycus*, *Planolites* y *Palaeophycus* (Fig. 6a, b). Además se observaron trazas tubulares de hasta 3 cm de diámetro paralelas a la base del estrato que no pudieron ser identificadas (Fig. 6c).

**Correlación:** Moya (1998) describió a la Formación Áspero como un cuerpo arenoso integrado por tres tipos litológicos distintivos, asimilables a los descritos anteriormente y dispuestos en igual sucesión. La columna descrita en la sierra Las Maderas se distingue por una mayor proporción de pelitas en todas las facies estudiadas y por su mayor espesor frente al cuerpo netamente arenoso descrito por Moya (1998) y Moya *et al.* (2012) en el tramo medio de la sierra de Mojotoro. La autora registró espesores entre 120 y 200 m, con tendencia creciente en dirección noreste. La diferencia en el espesor estimado y el citado en la bibliografía podría responder a esta tendencia, o bien explicarse por repetición estratigráfica no detectada durante el mapeo.

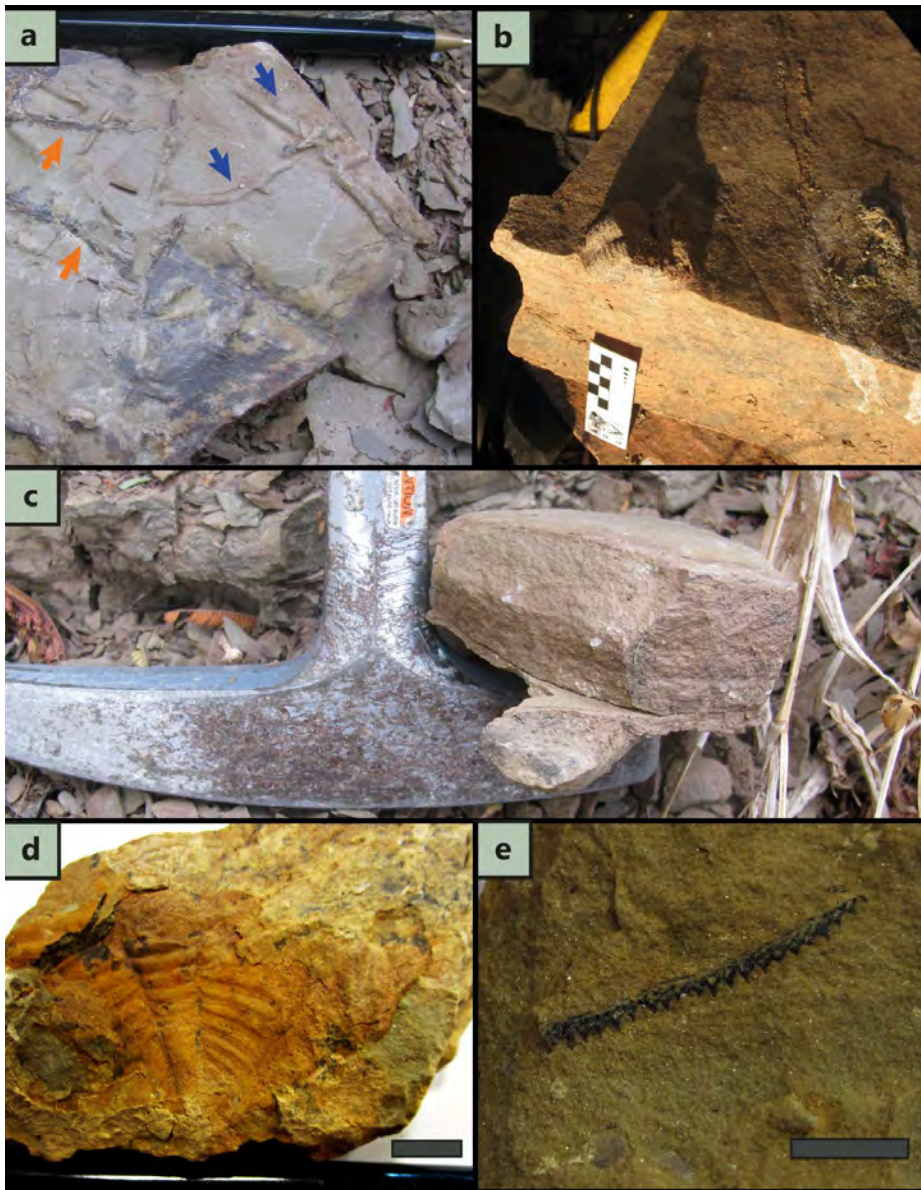
Se destaca la ausencia de afloramientos correspondientes a la Formación Áspero en la sección del Abra de Santa Laura, en la que aflora la Formación San Bernardo de edad más joven. La distancia entre estas localidades es muy corta como para justificar la desaparición de esta unidad por un acuñaamiento lateral, más aun teniendo en cuenta su importante espesor y presencia en localidades hacia el sur del

Abra de Santa Laura. Por este hecho, y en conjunto con evidencias estructurales se interpreta que en esa sección la Formación Áspero habría sido suprimida tectónicamente por una falla (Fig. 1).

**Formación San Bernardo (Harrington 1957) – Tremadociano a Floiano**

**Distribución areal, espesor, relaciones estratigráficas:** Se identificó a la Formación San Bernardo sobre el flanco occidental de la sierra Las Maderas, y en el tramo final de la sección del Abra Santa Laura, o sea en el flanco oriental de la sierra de Mojotoro (Fig. 1). El espesor mínimo en la zona de la sierra de Mojotoro es de 225 m. **Litología:** Los conjuntos de rocas asignados a la Formación San Bernardo presentan características diferentes en la sección del Abra de Santa Laura y en la del embalse Las Maderas. En la primera localidad, se reconocieron lutitas intercaladas con limolitas y areniscas muy finas de color castaño, con laminación ondulítica y heterolítica. En los bancos de arenisca con laminación ondulítica del tramo final se aprecian calcos de carga que indican que los estratos están invertidos (Fig. 3d). Hacia el tope de la sucesión se reconoció un nivel de conglomerado oligomítico, interpretado como un indicador estratigráfico. En la zona del embalse Las Maderas se reconocieron en forma aislada afloramientos con niveles de pelitas y limolitas fosilíferas (Fig. 4d), intercalados con delgados bancos arenosos con restos de trilobites, braquiópodos articulados y braquiópodos inarticulados. Las rocas de la sección del Abra de Santa Laura se clasifican como wackes cuarzosos y arenitas cuarzosas, y presentan selección moderada con media en arena muy fina. Están conformadas por cuarzo monocristalino principalmente, y en menor proporción plagioclasa y feldespato potásico, y líticos metamórficos de bajo grado. Presentan también cantidades minoritarias de muscovita. La matriz está compuesta por arcillas, illita y óxidos de hierro, y el cemento por crecimiento secundario de cuarzo y óxidos de hierro como parches y pátinas. Las areniscas fosilíferas aflorantes en área del embalse Las Maderas se clasifican como *biophosbio-rudstones* (Trappe 2001).

**Contenido fósil:** Se encontraron en la localidad de la sierra Las Maderas restos de



**Figura 6.** Fósiles encontrados en la sierra Las Maderas. a) Trazas fósiles correspondientes al icnogénero *Palaephycus* (trazas tubulares con relleno idéntico al material hospedante con paredes estriadas, flechas hacia abajo) y *Planolites* (trazas tubulares con relleno diferente al material hospedante, flechas hacia arriba), Formación Áspero; b) *Rusophycus* en la base de un banco de arenisca de la Formación Áspero; c) Trazas fósiles tubulares, paralela y subyacente a las bases de estratos arenosos, Formación Áspero; d) Pigidio de trilobite del género *Thysanopyge*, correspondiente a la Formación San Bernardo. Escala: 1 cm; e) Fragmento de graptolito asignados al género *Paratemnograptus*, correspondiente a la Formación San Bernardo. Escala: 0,5 cm.

braquiópodos articulados e inarticulados, pigidios de trilobites asignados al género *Thysanopyge* (Fig. 6d); y restos fragmentarios de graptolitos asignados tentativamente al género *Paratemnograptus* (Fig. 6e).

**Correlación:** La presencia en la sierra Las Maderas de graptolitos asignados al género *Paratemnograptus* y trilobites del género *Thysanopyge* y la similitud litológica de las rocas estudiadas con las sucesiones asignadas a la Formación San

Bernardo por Moya (1998, 2008) permiten interpretarlas como correspondientes a esa unidad, en consonancia con la asignación tentativa realizada por Waisfeld y Vaccari (2008) en la misma zona. Estos autores describieron a la nueva especie *Thysanopyge maderensis*, que representaría la única correspondiente al género *Thysanopyge* en esa localidad. Los afloramientos de la sierra de Mojotoro, si bien no son portadores de faunas diagnósticas, se correlacionan con esta formación tam-

bién por la presencia del conglomerado oligomítico descrito anteriormente, utilizado como guía estratigráfica por su similitud con los depósitos conglomerádicos descritos por Moya (1998) en la Formación San Bernardo. Se destaca el hecho de que siguiendo a Moya (1998), ambas facies corresponderían al tramo inferior de la Formación San Bernardo.

### Grupo Orán, Subgrupo Jujuy (Russo 1972)

Por encima de las rocas ordovícicas se encuentran depósitos sinorogénicos cenozoicos, conocidos en este sector del noroeste argentino como Grupo Orán (Russo 1972). Este grupo, de edad miocena a pleistocena temprana (García *et al.* 2013) es conformado por los subgrupos Metán y Jujuy; dentro del segundo, aflorante en la zona de estudio, Gebhard *et al.* (1974) definió a las Formaciones Río Guanaco y Piquete, representadas la primera por areniscas grises claras con intercalaciones de conglomerados, y la segunda por conglomerados intercalados con areniscas y limolitas pardas y rojizas. Con respecto a los conglomerados de edad pleistocena ubicados al este de la sierra de Mojotoro, se utiliza la denominación propuesta por Hain *et al.* (2011) de Formación La Troja. Si bien estos autores desconocieron la nomenclatura previa (definida en el entorno del Valle de Lerma por Gallardo *et al.* 1996), se toma en este trabajo el criterio adoptado por González Bonorino y del Valle Abascal (2012, 2013): ellos mantuvieron los nombres formacionales de Gallardo *et al.* (1996) para los depósitos pleistocenos del Valle de Lerma, pero reconocieron diferencias con los conglomerados al este de la sierra de Mojotoro, para los que utilizaron la denominación propuesta por Hain *et al.* (2011) aunque ésta abarcaba originalmente la totalidad de los depósitos mencionados.

**Formación Piquete (Gebhard *et al.* 1974) - Plioceno a Pleistoceno inferior.**

**Distribución areal, relaciones estratigráficas:** La Formación Piquete aflora en el flanco oriental de la sierra Las Maderas y en las estribaciones septentrionales de la sierra de Vaqueros, ubicada al oeste de la sierra de Mojotoro (Fig. 1). La formación se encuentra en discordancia angular con

respecto al Grupo Santa Victoria, y a la Formación La Troja suprayacente. (Fig. 7a).

**Litología:** La Formación Piquete está conformada por espesos conglomerados grises clasto-sostenidos con intercalaciones de cuerpos lentiformes a lenticulares de areniscas fangosas y limolitas de color rojo y pardo claro. Los conglomerados que no presentan aspecto masivo tienen estratificación entrecruzada de bajo ángulo, y en algunos casos estructuras de deformación sindepositacional (Fig. 7a).

**Formación La Troja (Hain et al. 2011) - Pleistoceno superior**

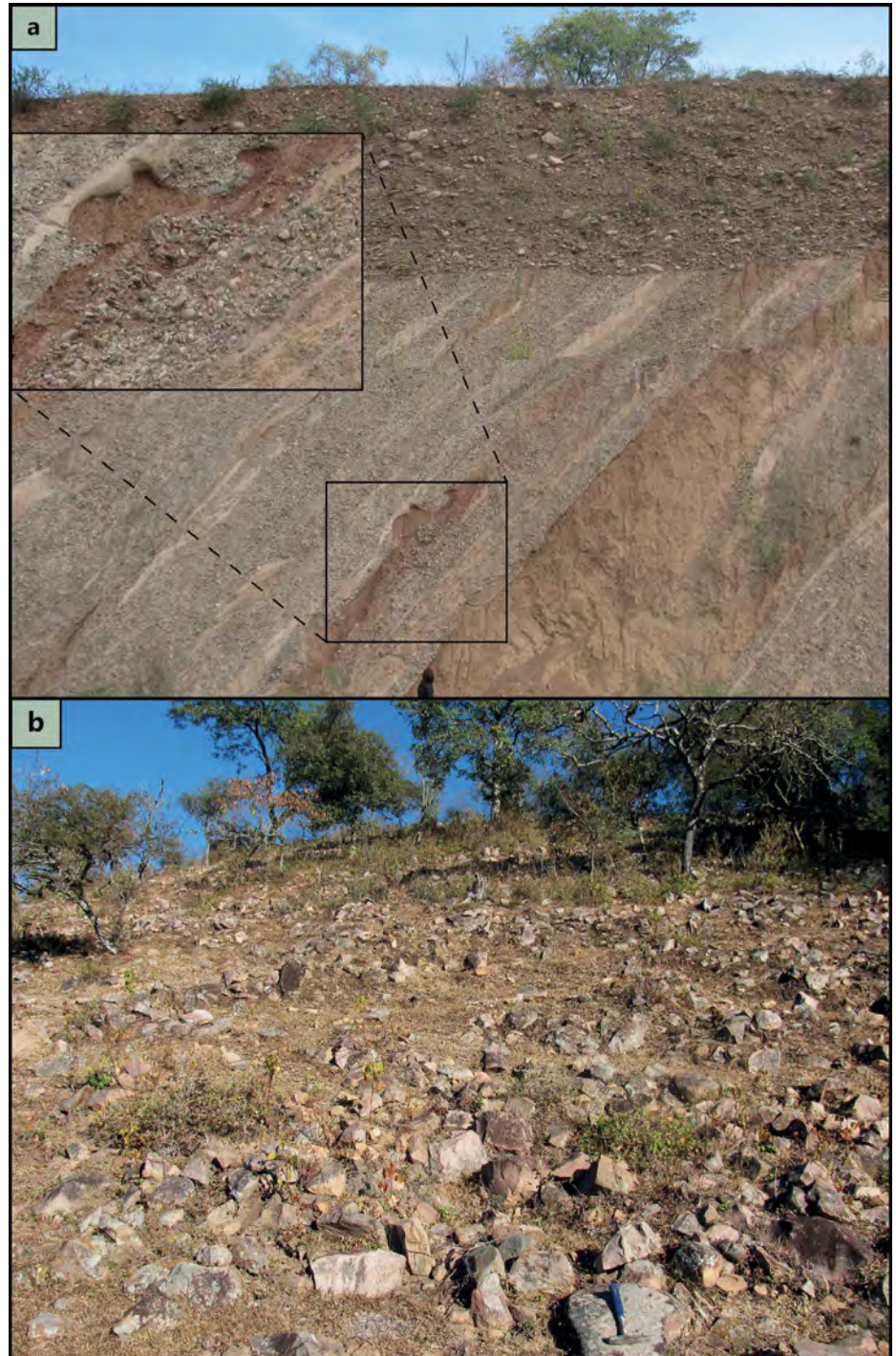
**Distribución areal:** la Formación La Troja se localiza en la depresión entre la sierra de Mojotoro y la sierra Las Maderas, y conforma los cordones de orientación E-O que dividen las bahías del embalse Las Maderas (ver sector central del corte y mapa geológico, Fig. 1).

**Litología:** la Formación La Troja está conformada por conglomerados matriz-sostenidos que contiene bloques de esquistos grisáceos correspondientes a la Formación Alto de la Sierra y cuarcitas rojizas asignadas al Grupo Mesón; se infirió la extensión de los afloramientos siguiendo la presencia de depósitos de bloques y gravas en las cumbres de los cordones de orientación E-O previamente mencionados (Fig. 7b).

## ESTRUCTURA

Las principales estructuras que se reconocen en el área de estudio son el anticlinal volcado levantado por una falla de vergencia hacia el este que da origen a la sierra de Mojotoro; la sierra Las Maderas, conformada por un anticlinal volcado hacia el oeste asociado a una falla de alto ángulo de vergencia occidental; y las fallas de orientación OSO-ENE que atraviesan ambas sierras (Fig. 1).

En la sierra de Mojotoro, sobre su flanco occidental, los estratos correspondientes al Paleozoico temprano presentan inclinaciones cercanas a 30°, mientras que en el flanco oriental son subverticales y presentan alto grado de fracturamiento. La estructura en el flanco occidental es en apariencia simple; por el contrario las franjas de afloramientos paleozoicos sobre el flanco



**Figura 7.** a) Formación Piquete, cubierta en discordancia angular por los conglomerados de la Formación La Troja. En el recuadro se muestran ampliadas estructuras de deformación sindepositacional. Se utiliza en forma ilustrativa el corte sobre la ruta Nacional 9 entre San Salvador de Jujuy y Villa Jardín de Reyes, al norte de la zona representada en el mapa geológico, dado que la relación entre estas unidades no puede observarse en él; b) Conglomerado de bloques, conformados por esquistos grisáceos (Formación Alto de la Sierra) y cuarcitas rojizas (Grupo Mesón) de procedencia local, acumulados en abanicos aluviales al pie de la falla del borde oriental de la sierra de Mojotoro.

co oriental se ven atravesadas por importantes estructuras de orientación N-S, y la edad de las unidades aflorantes varía a lo largo del mismo. El basamento, que compone el núcleo de la sierra, es levantado

por fallas inversas con vergencia oriental a lo largo del flanco este. La Formación Alto de la sierra está en contacto tectónico por encima de las unidades paleozoicas en los sectores en los que éstas afloran.

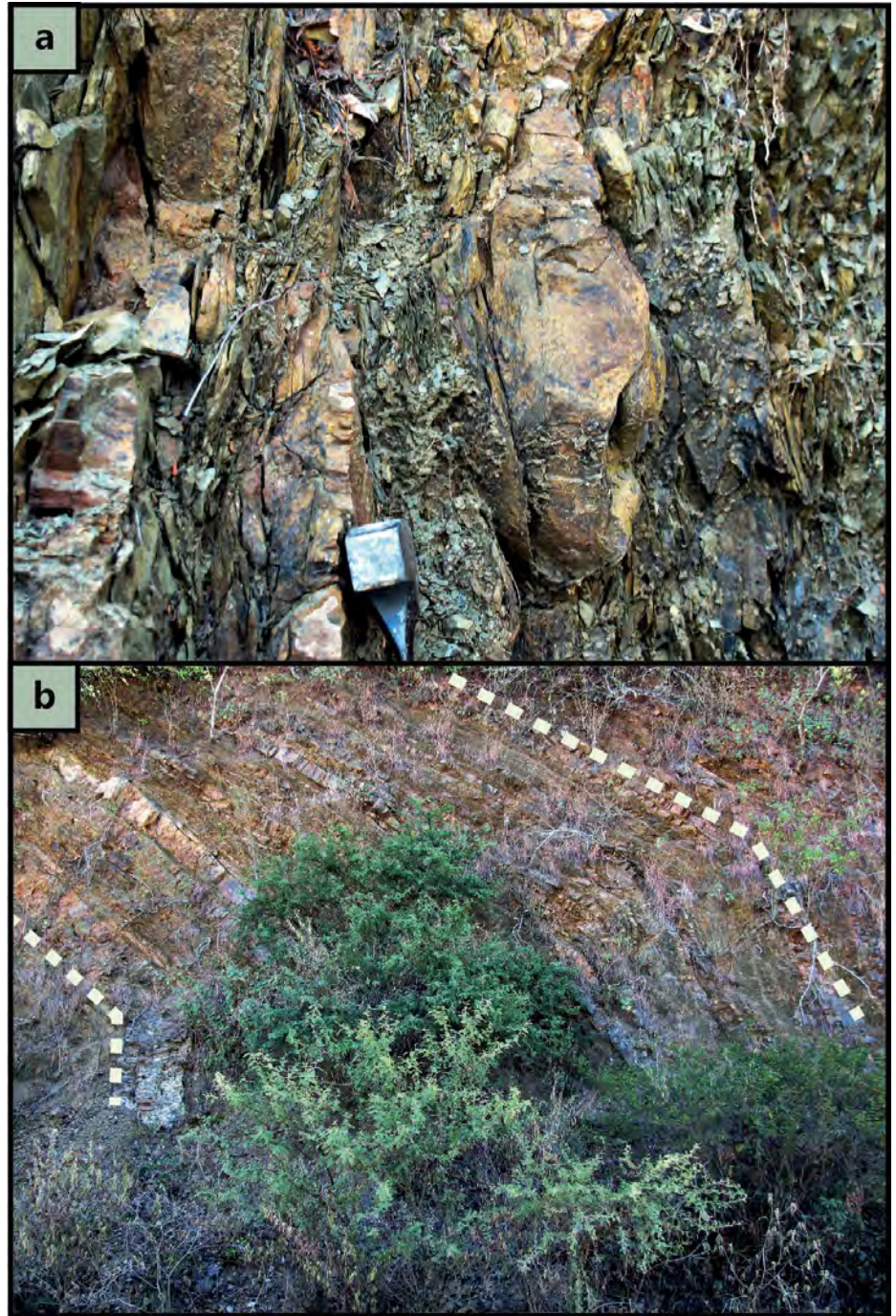
Los estratos del Paleozoico inferior del Abra de Santa Laura inclinan al este, en general con alto ángulo, y en el tramo final se encuentran invertidos (Fig. 1). Se observaron en esta localidad súbitos cambios de actitud con reversión de la dirección de inclinación, alabeamientos y omisión o espesores reducidos de ciertas unidades. La distribución de los rasgos mencionados permitió definir dos zonas de falla mayores que atraviesan a los estratos paleozoicos sobre el flanco oriental de la sierra de Mojotoro (Fig. 1). Hacia el este se encuentra enterrada la cuña orogénica terciaria asociada al levantamiento de la sierra de Mojotoro, representada por los afloramientos de la Formación La Troja, mientras que hacia el oeste los depósitos cenozoicos coetáneos con el levantamiento del Cordón de Lesser conforman la sierra de Vaqueros (García *et al.* 2013) (Fig. 1).

En el flanco occidental de la sierra Las Maderas, sobre el margen norte del lago, los estratos están volcados hacia el noreste con ángulos entre  $50$  y  $85^\circ$  (Figs. 1 y 8a). Sobre el flanco oriental los estratos toman valores cercanos a los  $30^\circ$  de inclinación hacia el noreste. Se define de esta forma un anticlinal con el limbo oriental normal y el limbo occidental volcado. Se observaron sobre los márgenes noreste y este del lago, en las sucesiones psamo-pelíticas correspondientes a la parte superior de la Formación Áspero, pliegues en caja de escala mesoscópica orientados en dirección NO-SE, con planos axiales inclinados al suroeste (Fig. 8b). En el sector sur del lago los estratos cambian de actitud en distancias muy cortas, revirtiéndose en algunos casos la dirección de inclinación por efecto de pliegues de orden menor que no alcanzan a modificar el ordenamiento estratigráfico general ni a repetir las unidades. Se observan fallas transversales en las imágenes satelitales que condicionan la disposición de los valles de orientación general ENE-OSO. La sierra de Mojotoro está atravesada por dos fallas transversales de gran envergadura que coinciden con los límites norte y sur del embalse Las Maderas, y que separan tres franjas de afloramientos de edad diferente sobre el flanco oriental: una franja central, en la que aflora la Formación Alto de la Sierra, y dos franjas hacia el norte y hacia el sur

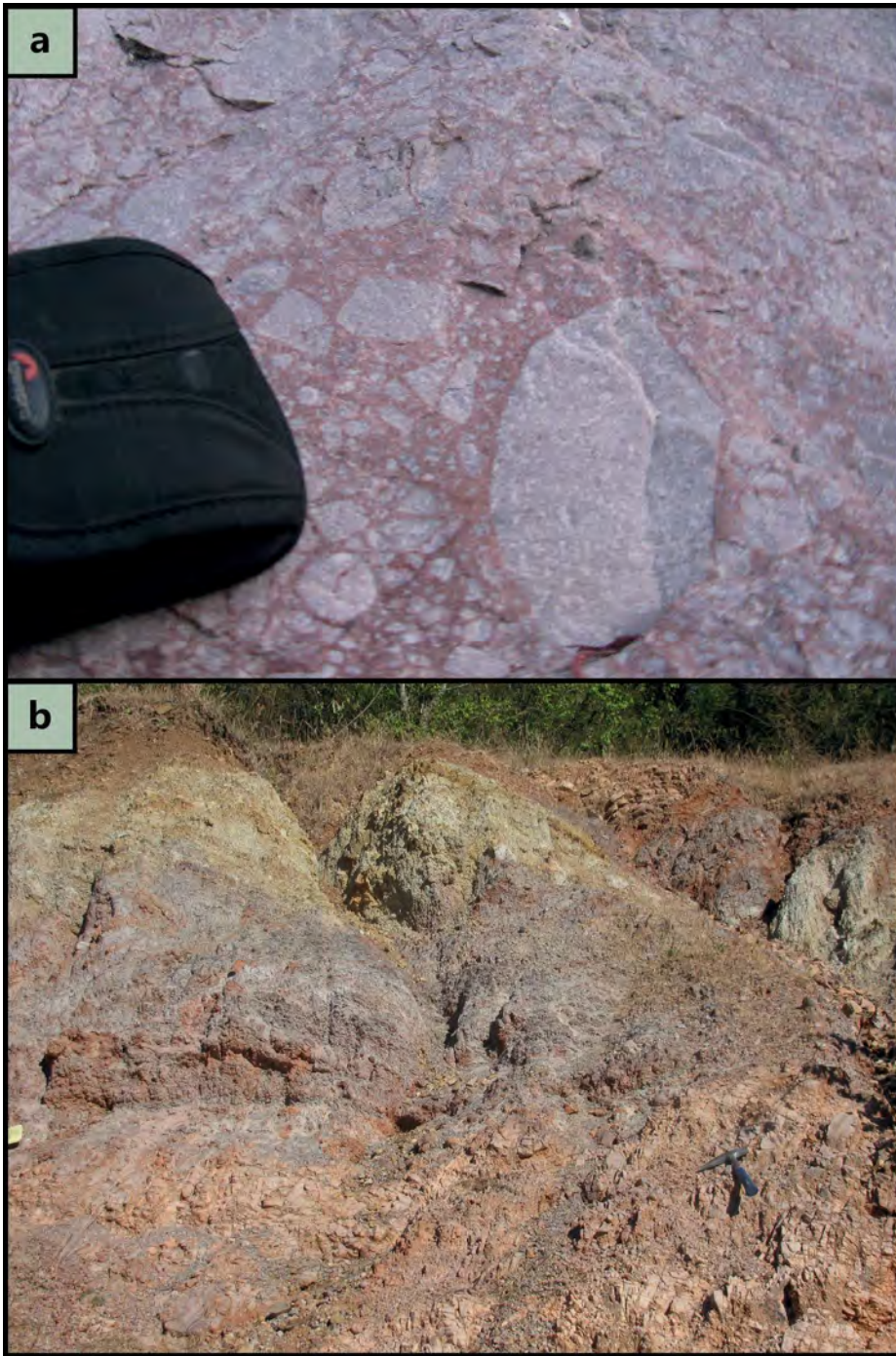
en las que afloran el Grupo Santa Victoria, el Grupo Mesón y la Formación Alto de la Sierra.

Coincidiendo con la intersección entre una de las mayores fallas transversales sobre el flanco oriental de la sierra de Mojotoro y el corrimiento principal que la levanta (ver ubicación en Fig. 1) aflo-

ra una brecha hidrotermal que se asocia lateralmente a areniscas rojizas, moradas y verdes alteradas (Figs. 9a, b). La brecha es matriz-sostenida, monomítica, y está conformada por clastos angulosos de cuarcita inmersos en cemento silíceo de color rojo, con textura flotante. Presenta textura "en rompecabezas" (*jigsaw*), es



**Figura 8.** Estructura en torno al embalse Las Maderas, en la Formación Áspero. a) Estratos con alto ángulo de inclinación en dirección al este; b) Pliegue en caja con eje de dirección NO-SE y plano axial inclinando al suroeste. La estructura de los estratos es remarcada por la línea punteada.



**Figura 9.** a) Brecha hidrotermal en el flanco oriental de la sierra de Mojotoro. Los clastos son de cuarcita de aspecto muy similar a las rocas del Grupo Mesón, y tiene cemento silíceo rojizo por presencia de óxidos de hierro; b) Areniscas rojizas, moradas y verdes alteradas e intensamente fracturadas asociadas lateralmente a la brecha hidrotermal.

decir que los fragmentos de roca tienen bordes complementarios entre sí (Fig. 8a). Las areniscas alteradas así como los fragmentos de roca de caja corresponden al Grupo Mesón.

### Corte estructural y discusión

Las estructuras que levantan la sierra de

Mojotoro y Las Maderas se enmarcan dentro del estilo estructural de la Cordillera Oriental, caracterizado por una faja plegada y corrida de piel gruesa cuyos corrimientos se orientan en dirección NNE-SSO, con intensa fracturación y plegamiento subordinado (Moya *et al.* 1999). Las fallas que delimitan escamas de basa-

mento tienen en general alto ángulo, mayor a  $45^\circ$  (Seggiaro *et al.* 2008). En el área de estudio, ubicada al norte del lineamiento Olacapato-Toro, la vergencia de los corrimientos es predominantemente hacia el este; sin embargo algunas estructuras, presentan vergencia occidental, relacionada con la inversión de fallas extensionales cretácicas y ordovícicas (Seggiaro *et al.* 2008).

La estructura de la sierra de Mojotoro corresponde a un anticlinal asimétrico vergente hacia el este, y volcado en el tramo medio (Ruiz Huidobro y Bonorino 1953, Ruiz Huidobro 1955). Moya *et al.* (1999) describieron un sistema de fallas transversales de rumbo ONO-ESE en el tramo medio de la sierra, e infirieron que el contacto entre el Paleozoico del flanco occidental de la sierra de Mojotoro y el Terciario expuesto en el borde oriental del Valle de Lerma es tectónico.

Según el modelo planteado en el presente trabajo (Fig. 1) la estructura en el sector del Abra de Santa Laura consiste en una falla inversa principal de alto ángulo que levanta las rocas paleozoicas, que son atravesadas por otra falla que apoya encima el basamento, y por fallas inversas con vergencia occidental que producen desplazamientos dentro de las rocas cambro-ordovícicas. En el flanco occidental de la sierra de Mojotoro el basamento y las sedimentitas del Grupo Mesón estarían cortados por un retrocorrimiento, que los separa de los conglomerados cenozoicos. De esta manera se conforma un anticlinal volcado con vergencia hacia el este, segmentado por fallas de vergencia oriental y occidental de distintas escalas (Fig. 1). Con respecto a la sierra Las Maderas, la estructura propuesta en el corte geológico consiste en un anticlinal volcado con vergencia occidental, cuyo flanco oeste es atravesado por una serie de fallas con origen en una falla inversa subparalela al corrimiento principal (Fig. 1). Las fallas someras llegan a la superficie poniendo en contacto estratos con actitudes discordantes; en otros casos no emergen sino que dan lugar en superficie al plegamiento en caja observado. Los importantes espesores de los depósitos cenozoicos reportados por Monaldi *et al.* (1996), que superan los 1000 m en las cuencas adyacentes a la sierra de Mojotoro, se relacionarían con

la actividad de los corrimientos que levantan a ésta y a la sierra Las Maderas. Se destaca que en la sierra de Mojotoro está exhumado el basamento y afloran también, separadas por distintas fallas, sedimentitas cámbricas y ordovícicas; mientras que en el sector hacia el este del embalse Las Maderas únicamente están expuestas las Formaciones Áspero y San Bernardo, las más jóvenes entre las rocas ordovícicas estudiadas. Esto implica un grado de levantamiento menor en la sierra Las Maderas con respecto a la sierra de Mojotoro, en la cual fue suprimido un mayor espesor de sedimentos, de por lo menos 900 metros más que en la primera. Con respecto a la brecha hidrotermal, dada su localización en la intersección entre dos zonas de falla de gran envergadura, y la ausencia de manifestaciones hidrotermales en la región, se la interpreta como asociada al sistema de fallas. Massabie *et al.* (2008) describen en las Sierras Australes y Septentrionales de la Provincia de Buenos Aires brechas hidrotermales comparables a las observadas: éstas están conformadas por clastos de cuarcitas inmersas en cemento silíceo ferroso, y se caracterizan por su textura flotante. Analizando estas brechas y su contexto regional, los autores las interpretaron como brechas hidráulicas originadas bajo esfuerzos extensionales asociados a la apertura atlántica; en particular, se apoyaron fuertemente en la textura flotante de las brechas, indicadora de un régimen distensivo. Por otro lado, siguiendo la clasificación de Sibson (1986) para brechas asociadas a fallas, la textura “en rompecabezas”, la ausencia de evidencias de abrasión o deformación de los clastos, el bajo grado de desplazamiento de los mismos y la matriz exótica hidrotermal, permiten interpretar la brecha observada como una brecha de implosión. Éstas se producen por la implosión hidráulica de la roca de caja al generarse cavidades en las zonas de falla durante el desplazamiento (*slip*) rápido a lo largo de planos de falla irregulares, y comúnmente se asocian a la presencia de sobrepasos dilatacionales (*dilational jogs*) (Sibson 1986); las brechas así formadas se encuentran como cuerpos lenticulares o romboidales asociadas a zonas de falla. Siguiendo el modelo de Sibson (1986), este tipo de brechas se

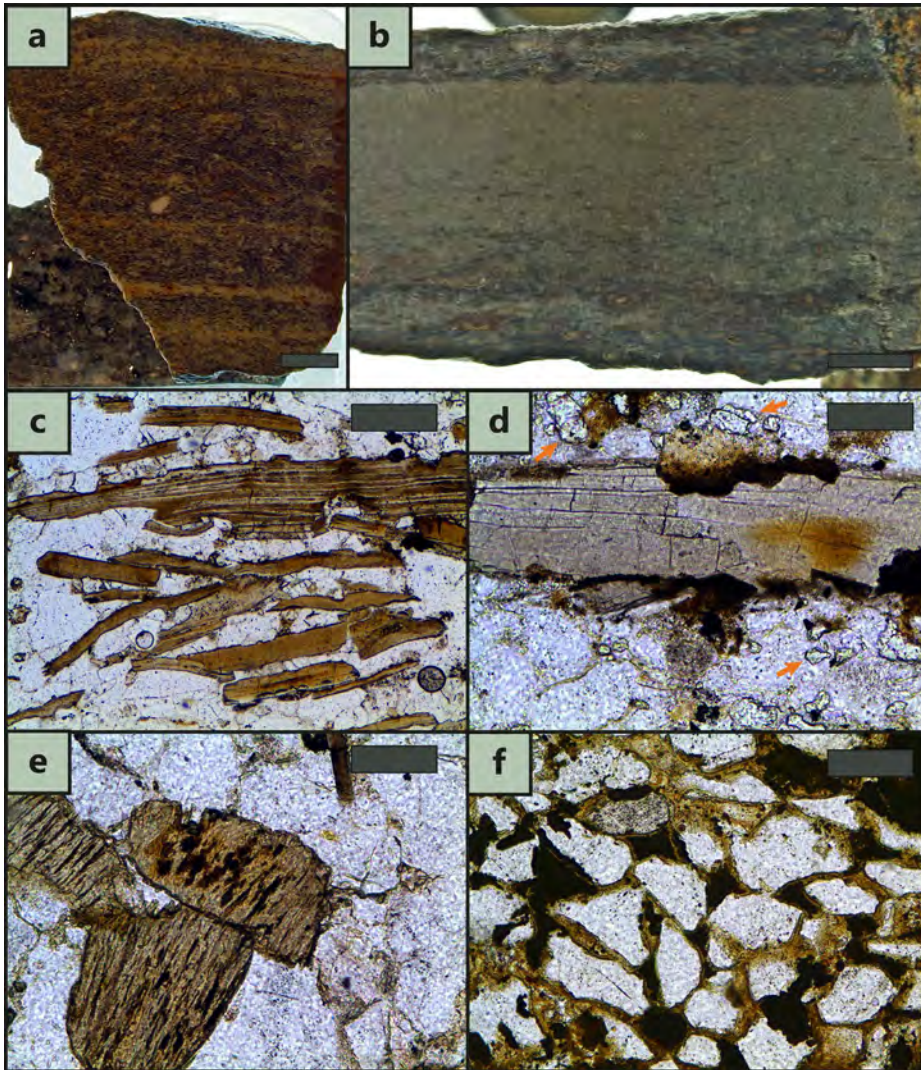
formarían bajo condiciones locales de extensión, aunque el régimen general pueda ser compresional o extensional. Dado que en el área de estudio estas brechas se restringen a un único afloramiento de extensión reducida, y no se conocen litologías comparables ampliamente distribuidas en la Cordillera Oriental, se infiere que su formación responde a condiciones locales, por lo que el segundo modelo genético parece más adecuado. La formación de la brecha hidráulica posiblemente esté relacionada con la presencia de las fallas transversales a la estructura principal. Además, la presencia de bloques de esta brecha en depósitos correspondientes a la Formación La Troja indica que esta litología estuvo expuesta al menos desde el Pleistoceno tardío.

## LOS NIVELES FOSFÁTICOS DEL TREMADOCIANO Y FLOIANO

Se describen a continuación niveles con manifestaciones fosfáticas encontrados en las Formaciones Floresta, Áspero y San Bernardo. Estos niveles se consideran rocas fosfáticas, por poseer menos de un 50 % de componentes fosfáticos determinado visualmente (Trappe 2001). Los componentes presentes son bioclastos fosfáticos primarios (restos de braquiópodos linguliformes) y en forma subordinada intraclastos fosfáticos, todos ellos considerados componentes aloquímicos. En función del tamaño de grano de los componentes mayoritarios y de la presencia de bioclastos no fosfáticos, se clasifican como *phosbio-grainstones*, *phosbio-rudstones* o *biophosbiorudstones* (*sensu* Trappe 2001, 2006). El origen de las rocas fosfáticas estudiadas no estaría asociado a un episodio de fosfogénesis *sensu stricto* (es decir al desarrollo de fábricas fosfáticas ortoquímicas por precipitación de apatita, Trappe 2006), sino al retrabajo sedimentario de partículas fosfáticas biogénicas. Los niveles de la Formación Floresta se clasifican como *phosbio-grainstones* y *phosbio-rudstones*, y están conformados por abundantes restos fragmentados de braquiópodos linguliformes en niveles que alcanzan varios centíme-

tros de espesor, con cantidades minoritarias de restos de trilobites y braquiópodos rinconelliformes (Fig. 10a), mientras que los correspondientes a las Formaciones Áspero y San Bernardo se clasifican como *biophosbiorudstones*, y tienen una composición mixta con una proporción importante de restos de trilobites y braquiópodos rinconelliformes conformando niveles delgados de baja concentración fosilífera (Fig. 10b). La matriz sedimentaria corresponde a arena cuarzosa muy fina a gruesa, y el cemento consiste en crecimiento secundario de cuarzo o parches y pátinas de óxido de hierro. Los bioclastos fosfáticos, correspondientes casi exclusivamente a fragmentos de braquiópodos inarticulados, presentan variación en su largo y espesor, microestructura (definición de la laminación interna, espesor de las láminas), forma (laminar o no laminar), y grado de alteración (bajo o moderado). Se distinguen dos tipos definidos en función de estos parámetros: bioclastos laminares con bajo grado de alteración y bioclastos no laminares con grado moderado de alteración (Figs. 10c-e). Los intraclastos fosfáticos consisten en granos siliciclásticos inmersos en cemento fosfático y ferroso (Fig. 10f). Los tres tipos de partículas fosfáticas se describen a continuación:

*Bioclastos laminares:* conchillas de braquiópodos linguliformes generalmente fragmentadas y poco redondeadas, con microestructura laminar (Fig. 10c). El espesor de las láminas es variable así como la definición de las mismas, observándose fragmentos de aspecto homogéneo. Los fragmentos tienen entre 0,05 mm y más de 4 mm de largo. Están compuestos por francolita, de color castaño claro a oscuro e isótropa con nicoles cruzados. Generalmente se encuentran ligeramente alterados a óxidos de hierro. En ocasiones están reemplazados a lo largo de las láminas por clorita o glauconita, o parcialmente disueltos (Fig. 10d). En los casos en los que los fragmentos presentan disolución parcial se suelen observar los siguientes rasgos asociados: parches de colofano de color amarillento o castaño claro; cristales de apatita, de color castaño claro o transparente, hábito prismático, baja birrefringencia y relieve moderado, ya sea en cúmulos de pequeños cristales o como cristales individuales de mayor tamaño.



**Figura 10.** a) Muestra de mano pulida de los niveles fosfáticos de la Formación Floresta en la sierra de Mojotoro, conformados principalmente por bioclastos fosfáticos (escala = 1 mm); b) Muestra de la Formación Áspero en la sierra Las Maderas, conformada por restos de braquiópodos inarticulados (fosfáticos), articulados y trilobites (escala = 1 mm); c) Bioclastos laminares vistos al microscopio de polarización (escala = 500 micrones); d) Bioclasto laminar parcialmente disuelto, con reemplazo de óxidos de hierro y precipitación de apatita indicada por flechas (escala = 200 micrones); e) Bioclastos no laminares, con menor grado de definición de la microestructura, y alteración a óxidos de hierro (escala = 200 micrones); f) Intraclasto fosfático ferroso con una primera generación de cemento fosfático coloforme y una segunda generación de óxidos de hierro en parche rellenando el espacio poral remanente (escala = 200 micrones).

*Bioclastos no laminares:* fragmentos de conchillas de braquiópodos linguliformes con forma equidimensional, oblada o prolada, generalmente subredondeados a redondeados, de microestructura laminar o fibrosa u homogéneos internamente (Fig. 10e). En algunos casos se observa que la orientación de la microestructura es normal a la dirección de elongación del clasto, al contrario de lo que ocurre en los fragmentos laminares. Su tamaño varía entre arena muy fina y arena gruesa, aunque se observan fragmentos elongados en dirección perpendicular a la estructura interna

que alcanzan tamaño arena muy gruesa. Los bioclastos no laminares están compuestos por francolita, de color castaño claro a oscuro e isotropa con nicoles cruzados. Se encuentran reemplazados en distintos grados por óxidos de hierro, clorita o glauconita, variando en función de ello la preservación de la microestructura. La alteración en algunos casos progresa desde los bordes y en otras se concentra en los núcleos de los clastos, siguiendo en general la laminación interna. Las partículas fosfáticas más redondeadas y sin microestructura marcada parecen ser

fragmentos de conchillas de lingúlidos alterados en un mayor grado; sin embargo, podría tratarse en algunos casos de bioclastos carbonáticos reemplazados, o de un corte transversal a la microestructura. *Intraclastos fosfático-ferrosos:* intraclastos subredondeados a redondeados, compuestos por clastos tamaño arena fina a limo mediano y cemento fosfático de color castaño rojizo o amarillento; también puede haber óxidos de hierro como cemento (Fig. 10f). El cemento fosfático representa la primera generación de cemento, y presenta textura coloforme (cemento A o de borde, de acuerdo con Krajewski 1984). El espacio poral es rellenado por una generación posterior de cemento fosfático (cemento B) o bien por óxido de hierro. Este aparece también creciendo en parches rodeando los clastos de cuarzo.

Los depósitos de la Formación Floresta presentan mayores concentraciones de partículas fosfáticas que los encontrados en las Formaciones Áspero y San Bernardo. Los análisis químicos (Moya *et al.* 2012) indican contenidos de pentóxido de fósforo entre 2,90 y 8,52 % para los depósitos de la sierra Las Maderas. No se dispone de análisis químicos de los depósitos del Abra de Santa Laura, pero los depósitos correspondientes a la Formación Floresta en otras localidades de la Sierra de Mojotoro presentan valores de pentóxido de fósforo entre 1,8 y 21 % (Moya *et al.* 2012). Los valores máximos y mínimos corresponden respectivamente a una concentración bioclástica fosfática y a una arenisca con bioclastos fosfáticos que sobreyace a la concentración, en una sección ubicada en el tramo norte de la sierra de Mojotoro sobre el flanco occidental; ambas litologías presentan características comparables con los distintos niveles hallados en la sucesión del Abra de Santa Laura, por lo que los porcentajes resultan representativos de los contenidos de fosfato en esa localidad. El espesor de los niveles encontrados en la Formación Floresta no supera los 40 cm, y el de los correspondientes a las Formaciones Áspero y San Bernardo los 20 cm. Las leyes de pentóxido de fósforo en los depósitos de la Formación Floresta son relativamente altas, pero estos constituyen bancos delgados y ais-

lados dentro de sucesiones plegadas o con fuerte inclinación, por lo que su explotación seguramente no sería factible económicamente.

## CONCLUSIONES

Se avanzó en el conocimiento de la geología del área del embalse Las Maderas, con el estudio de los afloramientos del extremo septentrional de la sierra de Mojotoro, un área relativamente poco conocida, y de la sierra Las Maderas (sobre la que no se han publicado hasta el momento más que observaciones paleontológicas). La pobre exposición de las rocas y compleja estructura hicieron imprescindible la cuidadosa integración de la información estructural con la estratigráfica para poder reconstruir la columna sedimentaria, en particular en los afloramientos aledaños al embalse Las Maderas en los que las rocas están expuestas en forma discontinua.

El núcleo de la sierra de Mojotoro está conformado por la Formación Alto de la Sierra (Cámbrico temprano), representada por metapelitas, metaareniscas y metavaques líticos grises. Por encima se encuentran las cuarcitas del Grupo Mesón (Cámbrico medio) de 300 m de espesor, que afloran a lo largo de todo el flanco oeste y también se encuentran en el flanco este. Las rocas del Grupo Santa Victoria (Cámbrico tardío-Ordovícico Medio) que afloran en la zona de estudio son las Formaciones La Pedrera, San José, Caldera, Floresta, Áspero y San Bernardo. Todas las formaciones del Grupo Santa Victoria mencionadas fueron identificadas en el flanco este de la sierra de Mojotoro, a excepción de la Formación Áspero que en la sección estudiada fue suprimida tectónicamente. En la sierra Las Maderas afloran únicamente las Formaciones Áspero y San Bernardo, las más jóvenes entre las rocas paleozoicas estudiadas; el espesor integrado de las formaciones aflorantes del Grupo Santa Victoria en el área de estudio es de alrededor de 1200 metros. La Formación Piquete (Plioceno a Pleistoceno temprano), representada por conglomerados con intercalaciones de limolitas, aflora sobre el flanco oriental de la sierra Las Maderas, y en las estribaciones septentrionales de la Sierra de Vaqueros,

ubicada al oeste de la sierra de Mojotoro en el sector sudoeste de la zona de estudio. Los conglomerados de la Formación La Troja (Pleistoceno tardío) se ubican en la depresión entre la sierra de Mojotoro y sierra Las Maderas.

En el tramo septentrional de la sierra de Mojotoro la estructura consiste en una falla inversa de alto ángulo que levanta las rocas paleozoicas y es cortada por otra falla que apoya encima de éstas al basamento; de esta manera se conforma un anticlinal volcado con vergencia hacia el este, segmentado por fallas de vergencia oriental y occidental que producen reducción de los espesores aflorantes en ciertas unidades, así como la supresión de la Formación Áspero. En la sierra Las Maderas la estructura es más simple y está representada por un anticlinal volcado de vergencia occidental, cuyo flanco oeste es atravesado por una serie de fallas menores con origen en una falla inversa subparalela al corrimiento principal. Se define un estilo estructural de piel gruesa, con pliegues de flexión de falla con vergencia oriental y occidental segmentados por fallas menores. Además de las estructuras de orientación N-S, existen importantes fallas transversales de orientación E-O que condicionan la distribución de los afloramientos del Grupo Mesón y Grupo Santa Victoria. En cercanía a una de estas fallas aflora una brecha hidrotermal asociada a areniscas alteradas, que se interpretó como una brecha de implosión. Además, la presencia de bloques conformados por esta brecha en la Formación La Troja indica que esta litología estuvo expuesta al menos desde el Pleistoceno Tardío. Finalmente, se destaca el menor grado de levantamiento en la sierra Las Maderas con respecto a la sierra de Mojotoro, con una diferencia en el espesor sedimentario erosionado de al menos 900 metros.

Los depósitos fosfáticos estudiados se encuentran en las Formaciones Floresta, Áspero y San Bernardo. Los niveles correspondientes a la Formación Floresta, aflorantes en la sierra de Mojotoro, están conformados por restos fragmentados de braquiópodos linguliformes (de composición fosfática) y se clasifican como *phosbio-grainstones* y *phosbio-rudstones*; mientras que los de las Formaciones Áspero y San Bernardo, que afloran en la

sierra Las Maderas, presentan además una proporción significativa de restos de braquiópodos rinconelliformes y trilobites, conforman bancos más delgados, y se clasifican como *biophosbio-rudstones*. Se describieron tres tipos diferentes de partículas fosfáticas, presentes en diferentes concentraciones en las unidades estudiadas: bioclastos laminares con bajo grado de alteración, bioclastos no laminares con grado moderado de alteración, e intraclastos fosfático-ferrosos. Los depósitos de la Formación Floresta presentan mayores concentraciones de partículas fosfáticas y mayores leyes que los encontrados en las Formaciones Áspero y San Bernardo. Tratándose de niveles delgados y aislados dentro de una sucesión espesa de compleja estructura, su explotación comercial no sería actualmente factible.

## AGRADECIMIENTOS

A Clara O'Grady por su invaluable participación en la campaña y por las fotografías presentadas en este trabajo; a Julio Monteros por su colaboración y observaciones durante el trabajo de campo. Este proyecto fue financiado por el PIP CONICET 2014 – 2017. 11220130100188CO KE1 "Sistemas sedimentarios y modelos de acumulación de minerales autigénicos marinos: eficiencia de los procesos de concentración de fosfatos y glauconita", otorgado a Roberto A. Scasso y María Cristina Moya.

Los autores desean agradecer el trabajo de revisión de Diego F. Muñoz y Fernando Zeballo y el trabajo de edición de Diego Kietzmann.

## REFERENCIAS

- Aceñolaza, F., Emig, C.C. y Gutiérrez-Marco, J.C. 2003. Lingulid shell beds from the Ordovician of Argentina, with notes on other peri-Gondwanan occurrences. En: Albanesi, G.L., Beresi, M.S. y Peralta, S.H. (eds.), Ordovician from the Andes. Serie de Correlación Geológica 17: 237-244, San Miguel de Tucumán.
- Aceñolaza, G.F., Fogliata, A., Nieva, S.M. y Mas, G. 2008. Los nódulos fosfáticos en el Ordovícico de la Sierra de Zenta (Sistema interandino de las provincias de Jujuy y Salta): Caracteres geoquímicos y ambiente



- de depositación. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 335-336, San Salvador de Jujuy.
- Aparicio González P.A., Moya, M.C. e Impiccini, A. 2010. Estratigrafía de las rocas metasedimentarias (Neoproterozoico-Cámbrico) de la sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 17: 65-83.
- Astini, R.A., Waisfeld, B. G., Toro, B.A. y Benedetto, J.L. 2004. El Paleozoico inferior y medio de la región de Los Colorados, borde occidental de la Cordillera Oriental (provincia de Jujuy). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 243-260.
- Balseiro, D. y Marengo, L. 2008. Tremadocian trilobite assemblages from the Argentine Cordillera Oriental, A preliminary analysis. En: Rabano, I., Gozalo, R. y García-Bellido, D. (eds), *Advances in Trilobite Research. Cuadernos del Museo Geominero* 9: 33-40, Madrid.
- Balseiro, D., Waisfeld, B.G. y Buatois, L.A. 2011. Unusual trilobite biofacies from the Lower Ordovician of the Argentine Cordillera Oriental: new insights into olenid palaeoecology. *Lethaia*, 44: 58-75.
- Barrionuevo, L.A. 1976. Exploración Minera de la Región Noroeste, Argentina, Síntesis informativa sobre la prospección por recursos fosfáticos (Provincias de Salta y Jujuy). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, informe técnico, New York.
- Benedetto, J.L. 2003. Ordovician fossils of Argentina. Secretaría de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de Córdoba, 561 p., Córdoba.
- Benedetto, J.L. 2005. Hacia un esquema bioestratigráfico de alta resolución para el Cámbrico tardío y Ordovícico del noroeste de Argentina basado en filozonas de braquiópodos rhynchonelliformes. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 371-378, La Plata.
- Benedetto, J.L. 2007. New Upper Cambrian-Tremadoc rhynchonelliform brachiopods from northwestern Argentina: evolutionary trends and early diversification of plectrothoideans in the Andean Gondwana. *Journal of Paleontology* 81: 261-285.
- Benedetto, J.L. y Carrasco, P.A. 2002. Tremadoc (earliest Ordovician) brachiopods from Purmamarca and the sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental of northwestern Argentina. *Geobios* 35: 647-661.
- Benedetto, J.L. y Muñoz, D.F. 2015. Linguloid brachiopods from the Lower Ordovician (Tremadocian) of northwestern Argentina. *Bulletin of Geosciences* 90: 417-430.
- Benedetto, J.L., Aceñolaza, G.F., Albanesi, G.L., Alfaro, M.B., Brussa, E.D., Buatois, L.A., Carrera, M.G., Cech, N., Esteban, S. B., Heredia, S., Mángano, G.M., Ortega, G., Ottone, E. G., Rubinstein, C., Salas, M.J., Sánchez, M., Toro, B.A., Tortello, M.F., Vaccari, N.E., Waisfeld, B.G. 2007. Los fósiles del Proterozoico Superior y Paleozoico Inferior de Argentina. *Publicación Electrónica de la Asociación Paleontológica Argentina* 11: 9-32.
- Benedetto, J.L., Lavie, F.J. y Muñoz, D.F. 2018. Broeggeria Walcott and other upper Cambrian and Tremadocian linguloid brachiopods from NW Argentina. *Geological Journal* 53: 102-119
- Buatois, L.A. y Mángano, M.G. 2003. Sedimentary facies, depositional evolution of the Upper Cambrian-Lower Ordovician Santa Rosita formation in northwest Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 16: 343-363.
- Buatois, L.A. y Mángano, M.G. 2004. Terminal Proterozoic-Early Cambrian ecosystems: Ichnology of the Puncoviscana Formation, Northwest Argentina. *Fossils and Strata* 51: 1-16.
- Buatois, L.A., Moya, M.C. Mángano, M.G. y Malanca, S. 2003. Paleoenvironmental and sequence stratigraphic framework of the Cambrian-Ordovician transition in the Angosto del Moreno area, northwest Argentina. En: Albanesi, G.L., Beresi, M.S. y Peralta, S.H. (eds.), *Ordovician from the Andes. Serie de Correlación Geológica* 17: 397-401, San Miguel de Tucumán.
- Buatois, L.A., Zeballo, F.J., Albanesi, G.L., Ortega, G., Vaccari, N.E. y Mángano, M.G. 2006. Depositional environments and stratigraphy of the Upper Cambrian-Lower Ordovician Santa Rosita Formation at the Alfarcito area, Cordillera Oriental, Argentina: integration of biostratigraphic data within a sequence stratigraphic framework. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 13: 1-29.
- Castro, L.N., Scasso, R.A. y Moya, M.C. 2009. Phosphate deposits in Argentina: State of the art. *COVAPHOS III*, Actas 5: 22-29, Marakech.
- Castro, L.N., Moya, M.C., Scasso, R.A., Fazio, A.M. y Zelaya, A.M. 2011. Geoquímica y distribución de tierras raras en los niveles fosfáticos del Ordovícico del noroeste argentino. 18° Congreso Geológico Argentino, Actas: 1068-1069, Neuquén.
- Chiliguay, J. 2008. Fosfatos en la Provincia de Jujuy. En: Coira, B. y Zappettini, E.O. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Jujuy, Relatorio del 17° Congreso Geológico Argentino*: 192-197, San Salvador de Jujuy.
- Cichowski, M., Waisfeld, B.G., Vaccari, N.E. y Marengo, L. 2015. The nautiloid Family Eothinoceratidae from the Floian of the Central Andean Basin (NW Argentina and South Bolivia). *Geological Journal* 50: 764-782.
- del Huerto Benítez, M. 2013. Depósitos de Tormenta en la Formación Coquena (Tremadociano superior) de la Quebrada de Chalala, Cordillera Oriental jujeña. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70: 183-192.
- Dunham, R. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En: Ham, W.E. (ed.), *Classification of carbonate rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir* 1: 108-121, Tulsa.
- Dott, R.H. 1964. Wacke, Graywacke and Matrix--What Approach to Immature Sandstone Classification? *Journal of Sedimentary Research* 34: 625-632.
- Duperron, M. 2016. Geología del área del embalse Las Maderas, Provincia de Jujuy. *Sedimentología de los depósitos fosfáticos ordovícicos. Trabajo Final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires (inédito)*, 77-115, Buenos Aires.
- Duperron, M., Scasso, R.A. y Moya, M.C. 2014. Microfábricas y estructuras sedimentarias en concentraciones bioclásticas fosfáticas del Ordovícico de la sierra de Mojotoro y Las Maderas, provincias de Salta y Jujuy. 14° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 102-103, Puerto Madryn.
- Embry, A.F. y Klovan, J.E. 1971. A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 19: 730-781.
- Esteban, S.B. y Tortello, M.F. 2009. Sedimentología y paleontología de la Formación Santa Rosita (Miembros Tilcara y Casa Colorada, Cámbrico Tardío) en la región de Iruya, provincia de Salta. *Acta Geológica Lilloana* 2: 129-153.
- Esteban, S.B., Benítez, M.D.H. y Tortello, M.F. 2015. Geología sedimentaria y paleoambientes de la Formación Santa Rosita (Furongiano tardío-Tremadociano) en la región de Nazareno, Cordillera Oriental, provincia de Salta, Argentina. *Serie corre-*

- lación geológica 31: 5-20, San Miguel de Tucumán.
- Eveling, E.J., Moya, M.C. y Scasso, R.A. 2012. Coquinas fosfáticas en el Tremadociano superior de la sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental argentina. 13° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas: 71-72, Salta.
- Eveling, E.J., Moya, M.C., Scasso, R.A. y Duperron, M. 2015. Microfabrics of bioclastic-siliciclastic rhythmites in the Tremadocian of the Cordillera Oriental, Argentina. Their use for searching tidal deposits. 9th International Conference on Tidal Sedimentology: 79-82, Puerto Madryn.
- Fernández, R.I. 1983. Nuevos hallazgos de rocas fosfáticas marinas en la Cordillera Oriental de la Provincia de Jujuy, República Argentina. 2° Congreso Argentino de Geología Económica, Acta 1: 233-255, San Juan.
- Fernández, R.I. 1984. Bioestratigrafía y Mineralogía de nuevos descubrimientos de roca fosfórica en la Provincia de Jujuy, Argentina. En: Ricaldi, V. y Escalera, S. (eds.), La roca fosfórica, fertilizante directo de bajo costo. I Conferencia Latinoamericana de roca fosfórica, Actas: 61-70, Cochabamba.
- Gallardo, E.F., Aguilera, N.G., Davies, D.A. y Alonso, N.R. 1996. Estratigrafía del Cuaternario del Valle de Lerma, provincia de Salta, Argentina. 11° Congreso Geológico de Bolivia, Actas: 483-493, Tarija.
- García, V.H., Hongn, F. y Cristallini, E.O. 2013. Late Miocene to recent morphotectonic evolution and potential seismic hazard of the northern Lerma valley. Clues from Lomas de Medeiros, Cordillera Oriental, NW Argentina. Tectonophysics 608: 1238-1253.
- Gebhard, J.A., Giudici, A.R. y Oliver Gascón, J. 1974. Geología de la comarca entre el río Juramento y arroyo Las Tortugas, provincias de Salta y Jujuy, República Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 29: 359-375.
- González Bonorino, G. y del Valle Abascal, L. 2012. Orogénesis y drenaje en la región del valle de Lerma (Cordillera Oriental, Salta, Argentina) durante el Pleistoceno tardío. Revista de la Asociación Geológica Argentina 69: 127-141.
- González Bonorino, G. y del Valle Abascal, L. 2013. Drainage and base-level adjustments during evolution of late Pleistocene piggyback basin, Eastern Cordillera, Central Andes of northwestern Argentina. Bulletin of the Geological Society of America 124: 1858-1870.
- Hain, M.P., Strecker, M.R., Bookhagen, B., Alonso, R.N., Pingel, H. y Schmitt, A.K. 2011. Neogene to Quaternary broken foreland formation and sedimentation dynamics in the Andes of NW Argentina (25 S). American Geophysical Union, Tectonics 30: 1-27.
- Harrington, H.J. 1937. On some Ordovician Fossils from Northern Argentina. Geological Magazine 74: 97-124.
- Harrington, H.J. 1938. Sobre las faunas del Ordoviciano inferior del norte Argentino. Revista del Museo de La Plata, nueva serie 1: 109-289.
- Harrington, H.J. 1957. Ordovician Formations of Argentina. En: Harrington, H.J. y Leanza, A.F. (eds.), Ordovician Trilobites of Argentina. University of Kansas Press, Special Publication 1: 1-59, Lawrence.
- Keidel, J. 1943. El Ordovícico inferior de los Andes del Noroeste argentino y sus depósitos marinos glaciares. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba 36: 140-229, Córdoba.
- Krajewski, K.P. 1984. Early diagenetic phosphate cements in the Albian condensed glauconitic limestone of the Tatra Mountains, Western Carpathians. Sedimentology 31: 443-470.
- Leanza, A.F. 1972. Prospección de rocas fosfáticas en la Argentina para la fabricación de fertilizantes. Idea 291: 53-60, Buenos Aires.
- Mángano, M.G. y Buatois, L.A. 2004. Reconstructing Early Phanerozoic intertidal ecosystems: Ichnology of the Cambrian Campanario Formation in northwest Argentina. Fossils and Strata 51: 17-38.
- Massabie, A.C., Nestiero, O.E. y Sanguinetti, A.S. 2008. Brechas y microbrechas cohesivas en cuarcitas de las sierras de Buenos Aires. Similitudes, diferencias y aproximaciones a su vinculación tectónica. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63: 163-171.
- Mergl, M., Herrera, Z., Villas, E. y Ortega, G. 2015. Lingulate brachiopods from the Lampazar Formation (late Cambrian) of the Cordillera Oriental of northwestern Argentina. Journal of Paleontology 89: 537-552.
- Monaldi, C.R., González, R.E. y Salfity, J.A. 1996. Thrust fronts in the Lerma Valley (Salta, Argentina) during the Piquete Formation deposition (Pliocene-Pleistocene). 3rd International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), Extended Abstracts: 447-450, St. Malo.
- Moya, M.C. 1988. Lower Ordovician in the Southern Part of the Argentine Eastern Cordillera. En: Bahlburg, H., Breitzkreuz, C. y Giese, P. (eds.), The Southern Central Andes. Springer, Lecture Notes in Earth Sciences 17: 55-69, Berlin, Heidelberg.
- Moya, M.C. 1998. El Paleozoico inferior en la sierra de Mojotoro, Salta-Jujuy. Revista de la Asociación Geológica Argentina 53: 219-238.
- Moya, M.C. 2003. The Ordovician System in the Argentine Eastern Cordillera. Ordovician and Silurian of the Cordillera Oriental and Sierras Subandinas, NW Argentina. Field Trip Guide. Serie Correlación Geológica 11: 7-16, San Miguel de Tucumán.
- Moya, M.C. 2008. El Paleozoico Inferior en el Noroeste Argentino. Evidencias, Incógnitas, Propuestas para la Discusión. En: Coira, B. y Zappettini, E.O. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Jujuy, Relatorio del 17° Congreso Geológico Argentino: 74-84, San Salvador de Jujuy.
- Moya, M.C. y Monteros, J.A. 2011. The Tremadocian deposits of the Argentinian eastern Cordillera. A Scandinavian signal in the central Andes. En: Gutiérrez-Marco, J.C., Rábano, I. y García-Bellido, D. (eds.), Ordovician of the World. Cuadernos del Museo Geominero 14: 379-390, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Moya, M.C., Malanca, S., Monteros, J.A. y Cuerda, A. 1994. Bioestratigrafía del Ordovícico Inferior en la Cordillera Oriental Argentina basada en graptolitos. Revista Española de paleontología 9: 91-104.
- Moya, M.C., Buatois, L., Ferreira, L.C. y Mángano, M.G. 1999. El Paleozoico inferior en la Cordillera Oriental argentina. Guía de Campo del 14° Congreso Geológico Argentino: 52, Salta.
- Moya, M.C., Malanca, S., Monteros, J.A., Albanesi, G.L., Ortega, G. y Buatois, L.A. 2003a. Late Cambrian - Tremadocian faunas and events from the Angosto del Moreno section, Eastern Cordillera, Argentina. En: Albanesi, G.L., Beresi, M.S. y Peralta, S.H. (eds.), Ordovician from the Andes. Serie de Correlación Geológica 17: 439-444, San Miguel de Tucumán.

- Moya, M.C., Monteros, J.A., Malanca, S., Ortega, G. y Albanesi, G.L. 2003b. Quebrada del Toro and Angosto de la Quesera, Eastern Precordillera, Salta Province, Field Trip Guide. *Miscelánea* 11: 47-49, San Miguel de Tucumán.
- Moya, M.C., Scasso, R.A., Castro, L.N. y Fazio, A.M. 2012. Los fosfatos en el Ordovícico del Norte Argentino. En Marquillas, R.A., Sánchez, M.C. y Salfity, J.A. (eds.), *Aportes sedimentológicos a la geología del noroeste argentino. Relatorio de la 13° Reunión Argentina de Sedimentología*: 145-167, Salta.
- Muñoz, D.F., Marengo, L.F. y Waisfeld, B.G. 2012. Concentraciones de braquiópodos linguliformes de la Formación Santa Rosita (Furongiano-Tremadociano superior), Cordillera Oriental argentina: Tafonomía y distribución. *13° Reunión Argentina de Sedimentología, Abstracts*: 150-151, Salta.
- Ortega G. y Albanesi, G.L. 2005. Tremadocian graptolite-conodont biostratigraphy of the Cordillera Oriental, NW Argentina. *Geologica Acta* 3: 355-372.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E. y Siever, R. 1972. *Sand and sandstone*. Springer, 618 p., New York.
- Rubinstein, C.V. y Toro, B.A. 2001. Review of acritarch biostratigraphy in the Arenig of the Eastern Cordillera, northwestern Argentina. New data and calibration with the graptolite zonation. En Weiss, R.H. (ed.), *Contributions to Geology and Palaeontology of Gondwana - In honour of Helmut Wopfner*. Geological Institute, University of Cologne: 421- 439, Cologne.
- Ruiz Huidobro, O.J. 1955. Tectónica de las Hojas Chicoana y Salta. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 10: 7-43.
- Ruiz Huidobro, O.J. y Bonorino, F.G. 1953. La estructura de la sierra de Mojotoro y la utilidad de "Cruziana" como indicador estructural. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 8: 214-219.
- Russo, A. 1972. La estratigrafía terciaria del noroeste argentino. *Resúmenes 5° Congreso Geológico Argentino*, 1-14, Buenos Aires.
- Saiz Cobbe, M.L. 2007. Los depósitos fosfáticos en el Ordovícico de la sierra de Mojotoro. Tesis Profesional, Universidad Nacional de Salta (inédita), 97 p., Salta.
- Saiz Cobbe, M.L. y Moya, M.C. 2008. Exploración de fosfatos en el Ordovícico de la sierra de Mojotoro. *12° Reunión Argentina de Sedimentología, Actas*: 159, Buenos Aires.
- Salas, M.J. y Vaccari, N.E. 2012. New insights into the early diversification of the Ostracoda: Tremadocian ostracods from the Cordillera Oriental, Argentina. *Acta Palaeontologica Polonica* 57: 175-190.
- Salas, M.J., Vannier, J. y Williams, M. 2007. Early Ordovician ostracods from Argentina: their bearing on the origin of binodicope and palaeoCOPE clades. *Journal of Paleontology* 81: 1384-1395.
- Sánchez, M.C. y Salfity, J.A. 1999. La cuenca cámbrica del Grupo Mesón en el Noroeste Argentino: desarrollo estratigráfico y paleogeográfico. *Acta Geológica Hispánica* 34: 123-139.
- Sánchez, T.M. y Benedetto, J.L. 2007. The earliest estuarine bivalve assemblage, Lower Ordovician (Arenig) of northwestern Argentina. *Geobios* 40: 523-533.
- Sánchez, T.M. y Vaccari, N.E. 2003. Ucumariidae new family (Bivalvia, Anomalodesmata) and other bivalves from the Early Ordovician (Tremadocian) of northwestern Argentina. *Ameghiniana* 40: 415-424.
- Seggiario, R., Mon, R. y Hongn, F. 2008. Evolución estructural del orógeno andino en la provincia de Jujuy. En: Coira, B. y Zappettini, E.O. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Jujuy. Relatorio del 17° Congreso Geológico Argentino*: 297-301, San Salvador de Jujuy.
- Sibson, R.H. 1986. Brecciation processes in fault zones: inferences from earthquake rupturing. *Pure and Applied Geophysics* 124: 159-175.
- Toro, B.A. y Maletz, J. 2007. Deflexed Balto-graptus species in the early to mid Arenig graptolite biostratigraphy of Northwestern Argentina. *Acta Palaeontologica Sinica* 46: 489-498.
- Tortello, M.F., Esteban, S.B. y Aceñolaza, G.F. 2002. Trilobites from the base of the Ordovician System in Northwestern Argentina. En Aceñolaza, G.F. (ed.), *Aspects of the Ordovician System in Argentina. Serie Correlación Geológica* 16: 131-142, San Miguel de Tucumán.
- Tortello, M.F., Zeballo, F.J. y Esteban, S.B. 2013. Trilobites tremadocianos en facies de lutitas oscuras del Miembro Alfarcito (Formación Santa Rosita), quebrada de Moya, Jujuy, Argentina. *Ameghiniana* 50: 137-152.
- Trappe, J. 2001. A nomenclature system for granular phosphate rocks according to depositional texture. *Sedimentary Geology* 145: 135-150.
- Trappe, J. 2006. Phanerozoic phosphorite depositional systems. A dynamic model for a sedimentary resource system. Springer, *Lecture Notes in Earth Sciences* 76, 316 p., Berlin.
- Turner, J.C.M. 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacencias. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba* 41: 165-196, Córdoba.
- Turner, J.C.M. y Méndez, V. 1975. Geología del sector oriental de los departamentos de Santa Victoria e Iruya, Provincia de Salta, República Argentina. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias* 51: 11-24.
- Ulrich, E.O. y Cooper, G.A. 1938. Ozarkian and Canadian brachiopoda. *Geological Society of America Special Paper* 13: 323.
- Vaccari, N.E., Waisfeld, B.G., Chatterton, B.D. y Edgecombe, G.D. 2006. New raphiophorid trilobites from the Ordovician of Argentina and their biogeographic implications. *Memoirs of the Association of Australasian Paleontologists* 32: 353-374.
- Vaccari, N.E., Waisfeld, B.G., Marengo, L.F. y Smith, L. 2010. Kainella Walcott, 1925 (Trilobita, Ordovícico Temprano) en el noroeste de Argentina y sur de Bolivia: Importancia bioestratigráfica. *Ameghiniana* 47: 293-305.
- Waisfeld, B.G., Vaccari, N.E., Toro, B.A., Rubinstein, C.V. y Astini, R.A. 2006. Revisión de la Biozona de Ogygiocaris araiorhachis (Trilobita, Tremadociano tardío) en la región de Pascha-Incamayo, Cordillera Oriental Argentina. Parte 1: Bioestratigrafía. *Ameghiniana* 43: 717-728.
- Waisfeld, B.G. y Vaccari, N.E. 2008. El género *Thysanopyge* (Trilobita, Ordovícico Temprano). Especies y distribución en el noroeste argentino. *Ameghiniana* 45: 753-774.
- Zeballo, F.J. y Albanesi, G.L. 2013. Biofacies and palaeoenvironments of conodonts in Cambro-Ordovician sequences of the Quebrada de Humahuaca, Cordillera Oriental of Jujuy, Argentina. *Geological Journal* 48: 194-211.
- Zeballo, F.J. y Tortello, M.F. 2005. Trilobites del Cámbrico tardío-Ordovícico temprano del área de Alfarcito, Tilcara, Cordillera Oriental de Jujuy, Argentina. *Ameghiniana* 42: 127-142.
- Zeballo, F.J., Albanesi, G.L., Ortega, G. y Tortello, M.F. 2003. Biostratigraphy of Ordovician sequences from Alfarcito area, Tilcara, Eastern Cordillera of Jujuy, Argentina. En Albanesi, G.L., Beresi, M.S. y Peralta, S.H.

- (eds.), Ordovician from the Andes. Serie de Correlación Geológica 17: 161-166, San Miguel de Tucumán.
- Zeballo, F.J., Albanesi, G.L. y Ortega, G. 2005a. Conodontes y graptolitos de las formaciones Alfarcito y Rupasca (Tremadociano) en el área de Alfarcito, Tilcara, Cordillera Oriental de Jujuy, Argentina. Parte 1: Bioestratigrafía. *Ameghiniana* 42: 39-46.
- Zeballo, F.J., Albanesi, G.L. y Ortega, G. 2005b. Conodontes y graptolitos de las formaciones Alfarcito y Rupasca (Tremadociano) en el área de Alfarcito, Tilcara, Cordillera Oriental de Jujuy, Argentina. Parte 2: Paleontología sistemática. *Ameghiniana* 42: 47-66.
- Zeballo, F.J., Ortega, G. y Albanesi, G.L. 2006. Nuevos registros de fósiles tremadocianos (Ordovícico Inferior) en la Cordillera Oriental de Jujuy, Argentina. 9º Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, Academia Nacional de Ciencias, Resúmenes: 169, Córdoba.
- Recibido: 2 de octubre, 2017  
Aceptado: 3 de enero, 2018