

# ACORTAMIENTO PALEÓGENO EN EL TRAMO MEDIO DE LOS VALLES CALCHAQUÍES: DEPOSITACIÓN SINTECTÓNICA DE LA FORMACIÓN QUEBRADA DE LOS COLORADOS

Alejandro J. ARAMAYO<sup>1</sup>, Fernando D. HONGN<sup>1</sup>, Cecilia E. del PAPA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Bio y Geociencias del NOA (CONICET-UNSa), Universidad Nacional de Salta. E-mail: alejandrojaramayo@yahoo.com.ar

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CONICET-UNC), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba.

## RESUMEN

Estudios realizados en diferentes sectores de la Puna y la Cordillera Oriental han confirmado el comienzo de la historia tectono-sedimentaria de la cuenca de antepaís desde el Paleógeno. El tramo medio de los Valles Calchaquíes incluye a los valles de Hualfín, Pucará y Calchaquí (Angastaco-Las Viñas-San Lucas), allí afloran los depósitos del Grupo Salta sobre los que se asienta la sucesión continental del Grupo Payogastilla. La cartografía detallada de rasgos estructurales y sedimentológicos reveló que la unidad basal de este último, de edad eocena (Formación Quebrada de los Colorados), presenta discontinuidades estratigráficas con las rocas infrayacentes y estructuras de crecimiento en sus niveles basales. Estos rasgos demuestran la existencia de un evento de deformación alrededor del Eoceno medio a tardío para este sector de los Andes del norte de Argentina. Esta deformación intracuenal mostró una propagación irregular en espacio y tiempo debido a la reactivación-inversión de las heterogeneidades previas. Las relaciones estratigráficas de la Formación Quebrada de los Colorados y las características de sus facies sedimentarias (rocas clásticas gruesas) permiten interpretar para esta unidad una depositación sintectónica con áreas de aportes locales, promovida por la actividad de las fallas de borde de las distintas zonas de acumulación que levantaron bloques de basamento que limitaron y controlaron la conectividad variable entre ellas. Por todo esto, el tramo medio de los Valles Calchaquíes conforma una zona de decenas de kilómetros donde habría ocurrido el desarrollo de cuencas en un antepaís fragmentado desde el Paleógeno.

**Palabras clave:** *Valles Calchaquíes, Formación Quebrada de los Colorados, estructuras de crecimiento, deformación paleógena, antepaís fragmentado*

## ABSTRACT

*Paleogene shortening in the middle sector of the Valles Calchaquíes: syntectonic accumulation of the Quebrada de los Colorados Formation.* Researches performed in several areas of the Puna and the Eastern Cordillera has confirmed the beginning of the tectono-sedimentary history of the foreland basin from the Paleogene. The middle segment of the Valles Calchaquíes region includes the Hualfín, Pucará y Calchaquí (Angastaco-Las Viñas-San Lucas) valleys. Successions of the Salta Group rift basin followed by the continental deposits of the Payogastilla Group foreland basin crop out extensively in these areas. Detailed mapping of structural-sedimentary features revealed that the lowermost unit from the Payogastilla Group of Eocene age (Quebrada de los Colorados Formation) displays stratigraphic unconformities with the underlying rocks and growth structures at its basal levels. These features represent evidences from the existence of a deformation event around the middle to late Eocene at this sector of the Andes from northern Argentina. This intrabasinal deformation showed an irregular propagation pattern in space and time due to the reactivation-inversion of the older heterogeneities. The stratigraphic relationships of the Quebrada de los Colorados Formation and the analysis of its facies (coarse clastic rocks) point to a syntectonic accumulation with local sources supply. Eocene faults bordering the different accumulation areas uplifted basement blocks that limited and controlled the variable connection between the deposition zones. The middle segment of the Valles Calchaquíes preserves the Eocene initial stages of the Payogastilla Group sedimentation. Faults displaced basement blocks from the initial stages of this Eocene broken foreland basin.

**Keywords:** *Valles Calchaquíes, Quebrada de los Colorados Formation, growth strata, paleogene deformation, broken foreland*

## INTRODUCCIÓN

El Paleógeno fue el tiempo en el que inició su desarrollo la cuenca de antepaís de

los Andes Centrales en el noroeste de Argentina (Jordan *et al.* 1983, Kennan *et al.* 1995, Sempere *et al.* 1997). La deformación eocena asociada fue, en principio, registrada

en los Andes peruanos (Laveno y Marocco 1984, Jaillard *et al.* 1992), en los Andes bolivianos (Sempere *et al.* 1990, Ege *et al.* 2001, DeCelles y Horton 2003, McQua-

rie *et al.* 2005) y en los Andes del norte de Chile (Maksaev 1979, Coira *et al.* 1982, Mpodozis *et al.* 2005, Charrier *et al.* 2009). Investigaciones realizadas en la Puna de Argentina y en regiones vecinas (Kraemer *et al.* 1999, Coutand *et al.* 2001, Carrapa *et al.* 2005, Mpodozis *et al.* 2005, Arriagada *et al.* 2006, Carrapa y DeCelles 2008) y en la Cordillera Oriental (Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, del Papa *et al.* 2013a, Montero López *et al.* 2016) han revelado algunas de las etapas tempranas en el levantamiento del orógeno andino indicando la existencia de deformación eocena a través del hallazgo de estructuras de crecimiento.

Aún no existe consenso acerca del tiempo en el que llegó el acortamiento andino a la región de los Valles Calchaquíes (Fig. 1). En este trabajo se usa el término "Valles Calchaquíes" en mención al conjunto de valles: Calchaquí, Amblayo, Tonco, Luracatao, Colomé, Amaicha, Hualfin y Pucará, extendidos entre los 24°-27° S y 65°30'-66°30' O, el término "Valle Calchaquí" en cambio, hace referencia al valle a través del cual escurre el río homónimo. Los Valles Calchaquíes muestran particularidades geológicas que permitieron a Salfity (2004) proponer la provincia geológica Calchaquenia. Algunos trabajos proponen que la deformación paleógena de retroarco estaba restringida al borde occidental de la Puna, consecuentemente las áreas más orientales registraban calma tectónica (Coira *et al.* 1982, Jordan y Alonso 1987, Allmendinger *et al.* 1997, Marrett *et al.* 1994). En este contexto, otras numerosas investigaciones indican que la deformación cenozoica en los Valles Calchaquíes se inició con la inversión de las estructuras extensionales del Grupo Salta en el Mioceno medio (Carrera y Muñoz 2008, Carrapa *et al.* 2011a, b, DeCelles *et al.* 2011, entre otros) y que los Valles Calchaquíes se comportaron como una cuenca de fosa frontal durante la depositación de la Formación Quebrada de los Colorados (Starck y Vergani 1996, Carrapa *et al.* 2011a, b, DeCelles *et al.* 2011).

Alternativamente, otros trabajos proponen la compartimentalización de la cuenca de antepaís en los Andes Centrales del norte argentino desde el Paleógeno (Kraemer *et al.* 1999, Coutand *et al.* 2001, Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, del Papa *et al.* 2013a, Montero López *et al.* 2016, entre

otros). Estas investigaciones plantean el desarrollo de secuencias de cuña frontal para el Eoceno en la Cordillera de Domeyko en Chile (Arriagada *et al.* 2006, Carrapa y DeCelles 2008), en la Puna Argentina (Carrapa *et al.* 2005), en la Cordillera Oriental de Bolivia entre 17-21°S (McQuarrie 2002, Horton 2005) y en el tramo centro-norte de los Valles Calchaquíes (Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, del Papa *et al.* 2013a).

Esto llevó a proponer que desde sus inicios el antepaís eoceno en el noroeste argentino estaba compuesto por bloques de basamento exhumados y que las áreas con sedimentación sintectónica de la Puna y la Cordillera Oriental-Calchaquenia se enmarcan mejor en un modelo de cuenca de antepaís fragmentado (Coutand *et al.* 2001, Hongn *et al.* 2007, 2011, Payrola Bosio *et al.* 2009, del Papa *et al.* 2013a) y no en un modelo de cuenca de antepaís simple (Starck y Vergani 1996, Carrera y Muñoz 2008, Carrapa *et al.* 2011a, b, DeCelles *et al.* 2011). En este contexto, la deformación y sedimentación

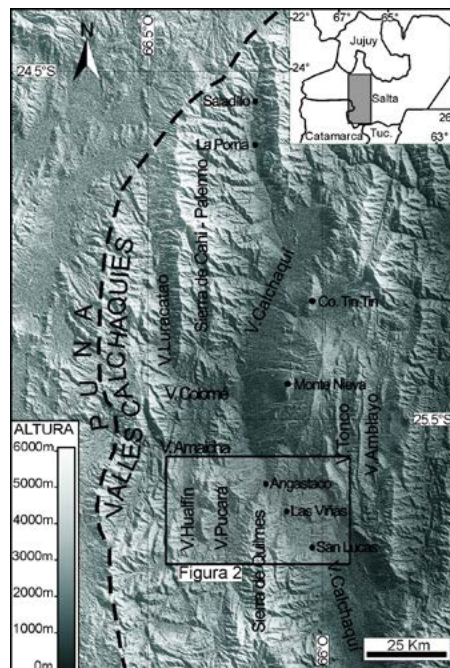
eocenas habrían seguido un patrón irregular de propagación en espacio y tiempo como consecuencia de la reactivación e inversión de las heterogeneidades preexistentes (Coutand *et al.* 2001, Deeken *et al.* 2006, Hongn *et al.* 2007).

En esta contribución se presentan datos estratigráficos, sedimentológicos y estructurales de la Formación Quebrada de los Colorados en el tramo medio de los Valles Calchaquíes (Fig. 1), que demuestran la depositación sintectónica de esta unidad en proto-valles intermontanos conectados. Dichas evidencias permiten discutir la naturaleza compleja de la cuenca de antepaís, el momento de comienzo del acortamiento andino en el Cenozoico, el inicio de la inversión tectónica de las fallas normales del rift cretácico y plantear una hipótesis acerca de cuándo se fragmentó la cuenca. Esto último es importante dado que algunos trabajos proponen un cambio de antepaís simple a antepaís fragmentado en el Mioceno medio (Starck y Vergani 1996, Galli y Hernández 1999, Mortimer *et al.* 2007, Carrapa *et al.* 2011a), mientras que otros autores sugieren que la cuenca estuvo compartimentada desde su inicio en el Paleógeno (Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, del Papa *et al.* 2013a).

## MARCO GEOLÓGICO

El tramo medio de los Valles Calchaquíes comprende a los valles de Hualfin, Pucará y Calchaquí principal, incluyendo éste último a las áreas Angastaco, Las Viñas y San Lucas (Fig. 2). Estos valles constituyen depresiones elongadas en sentido N-S, separadas por bloques de basamento y limitadas por fallas inversas de alto ángulo con vergencia occidental dominante (Turner y Mon 1979, Mon y Salfity 1995, Hongn y Seggiaro 2001, Carrera y Muñoz 2008).

La columna estratigráfica comienza con las rocas del basamento neoproterozoico-paleozoico inferior que incluyen metamorfitas de muy bajo a alto grado de las Formaciones Puncoviscana y La Paya (Fig. 3), y rocas plutónicas representadas principalmente por el Complejo Eruptivo Oire (CEO) y por los intrusivos menores que afloran en las sierras que separan los principales valles (Blasco *et al.* 1996, Hongn y Seggiaro 2001) (Fig. 2). La columna sedimentaria suprayacente comprende el relleno de dos



**Figura 1:** Modelo de elevación digital de los Valles Calchaquíes. En recuadro se resalta la ubicación de los valles secundarios que conforman el tramo medio de los Valles Calchaquíes. El límite con la Puna está dado por características morfoestructurales y por la divisoria de aguas que determina un escurrimiento regional endorreico hacia el oeste (Puna) y exorreico hacia el oriente (Valles Calchaquíes).

cuencas diferentes, la primera corresponde a la del *rift* del Grupo Salta (Cretácico-Eoceno medio) (Marquillas *et al.* 2005) y la segunda a la cuenca de antepaís del Grupo Payogastilla (Eoceno medio-Pleistoceno temprano) (Díaz y Malizzia 1983, del Papa *et al.* 2013b). El contacto entre ambos grupos está marcado por discontinuidades estratigráficas (Grier *et al.* 1991, Salfity *et al.* 1993).

El Grupo Salta está formado por los Subgrupos Pirgua, Balbuena y Santa Bárbara. Las facies de *sinrift* del Subgrupo Pirgua son notables en el valle de Pucará e inmediaciones (Sabino 2002), mientras que las sucesiones de *postrift* del Subgrupo Santa Bárbara se identifican en las áreas de San Lucas, donde se encuentra integrado por las Formaciones Mealla, Maíz Gordo y Lumbraera (Vergani y Starck 1989) y en Las Viñas donde sólo aflora la Formación Lumbraera (Aramayo 2015) (Fig. 2). El área estudiada (Fig. 2) no registra afloramientos del Subgrupo Balbuena.

El Grupo Payogastilla constituye una sucesión continental de más de 6000 m de espesor y está formado por las Formaciones Quebrada de los Colorados (Eoceno medio-Oligoceno tardío), Angastaco (Oligoceno tardío-Mioceno tardío), Palo Pintado (Mioceno tardío-Plioceno temprano) y San Felipe (Plioceno tardío-Pleistoceno tem-

prano). En el sector occidental del área de estudio (Hualfín-Pucará) afloran sólo las Formaciones Quebrada de los Colorados y Angastaco (Fig. 2), mientras que en el oriental (Angastaco-Las Viñas-San Lucas) el Grupo Payogastilla aflora completo y alcanza mayores espesores (véase síntesis en Galli *et al.* 2011).

En el área de estudio también se preservan depósitos piroclásticos tanto de caída como ignimbríticos (Grier y Dallmeyer 1990, Galli *et al.* 2008, Pereyra *et al.* 2008, Guzmán y Petrinovic 2010, Coira *et al.* 2014), entre los que se destaca la Ignimbrita Pucarilla de 12 Ma (Marrett *et al.* 1994) que cubre en discordancia angular a las unidades del Grupo Payogastilla en el extremo sur del valle de Hualfín (Fig. 2).

## METODOLOGÍA

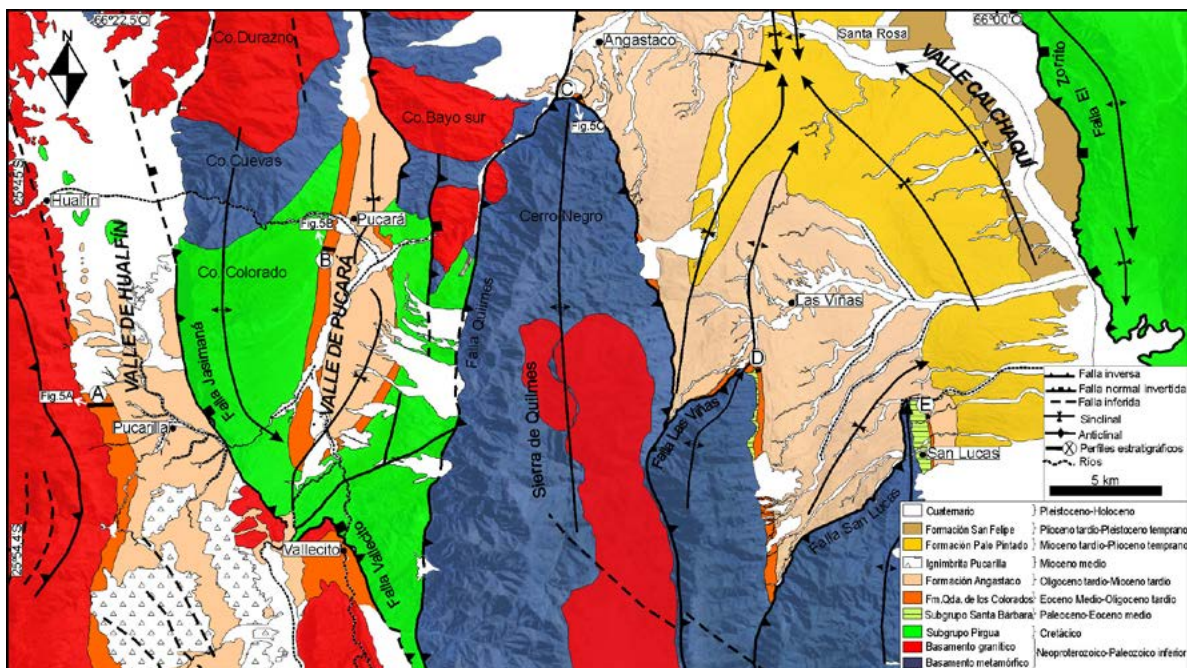
La cartografía detallada estratigráfico-estructural tuvo su objetivo en la identificación de discontinuidades (estructuras de crecimiento), estructuras tectónicas, arreglos estratigráficos y patrones de proveniencia en la Formación Quebrada de los Colorados. Se levantaron cinco columnas sedimentológicas, una en cada área estudiada, trabajo que incluyó la medición de espesores (con báculo de Jacob), el control de

la inclinación de estratos (brújula estructural) y el relevamiento de estructuras y facies sedimentarias. El estudio de procedencia comprendió la determinación de paleocorrientes y el conteo de clastos psefíticos. En el primer caso se establecieron 48 estaciones de control, en donde se tomaron 60 mediciones de estratificaciones cruzadas (según método de DeCelles *et al.* 1983) y 90 de clastos imbricados, el análisis de paleocorrientes requirió de una restitución a la horizontal de las capas cuando la inclinación superaba los 15°. Para los clastos psefíticos, se tomaron mediciones en 46 estaciones de control en donde se contaron más de 100 clastos por cada una con la utilización de una malla reticular de 10 x 10 cm y de 5 x 5 centímetros.

## FORMACIÓN QUEBRADA DE LOS COLORADOS

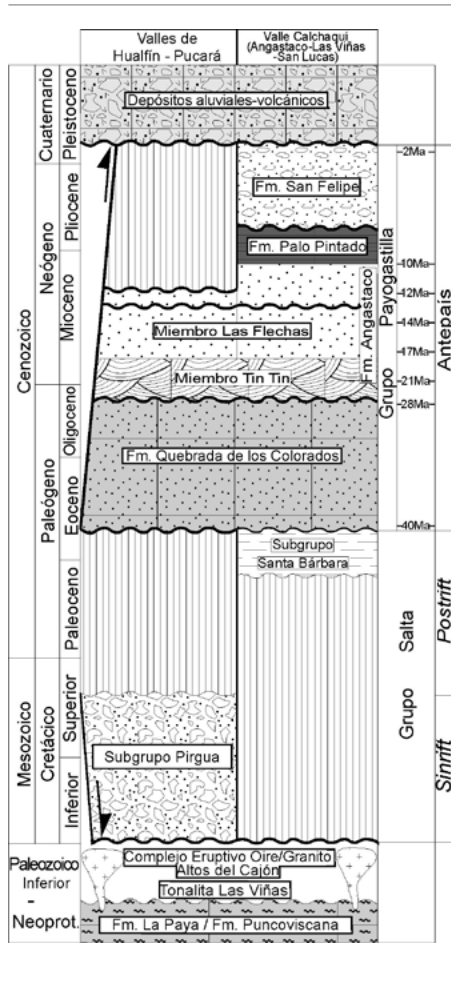
### Distribución y sedimentología

Los afloramientos de la Formación Quebrada de los Colorados conforman una faja elongada en el borde occidental del valle de Hualfín, donde se apoya en inconformidad sobre el basamento granítico (Complejo Eruptivo Oire) con un espesor de 505 m (Fig. 4a). En Pucará aflora en ambos flancos del sinclinal central, la sucesión del flanco



**Figura 2:** Mapa geológico del tramo medio de los Valles Calchaquíes. El sector estudiado incluye los valles de Hualfín, Pucará y Calchaquí. A, B y C: ubicaciones de estructuras de crecimiento en la Formación Quebrada de los Colorados (véase detalle en figura 5).





**Figura 3:** Cuadro estratigráfico del tramo medio de los Valles Calchaquíes. Se destaca la variación lateral en la exposición de las unidades litoestratigráficas.

occidental del sinclinal alcanza un espesor de 475 m (Fig. 4b) y se asienta en marcada discordancia angular sobre el Subgrupo Pirgua. Hacia el este, aflora al suroeste de la localidad de Angastaco donde presenta un espesor parcial de 196 m (Fig. 4c), dado que su base está suprimida por una falla inversa que monta el basamento sobre esta formación. Más al sur, aflora en ambos flancos del anticlinal de Las Viñas, en el occidental la base está suprimida por una falla inversa que superpone al basamento y en el oriental, menos deformado, presenta un espesor de 227 m (Fig. 4d) y traslapa a la infrayacente Formación Lumbraera. Relaciones similares se encuentran en el anticlinal de San Lucas, si bien allí el espesor es de 190 m (Fig. 4e) y traslapa a las tres unidades del Subgrupo Santa Bárbara.

La Formación Quebrada de los Colorados muestra un arreglo general grano y estrato

decreciente, con mayores espesores y una textura granulométrica más gruesa en las localidades occidentales (Hualfín y Pucará). Litológicamente está integrada por conglomerados guijarrosos clasto-soportados y areniscas conglomerádicas a gruesas, pardo rojizas, con estratificación cruzada planar y tangencial, se observan también estructuras gradadas y capas macizas. Intercalan niveles de limolitas y arcilitas macizas, más abundantes hacia el tope de las sucesiones, son de color pardo rojizo y en algunos casos se presentan con signos de bioturbación.

Para estos depósitos se interpreta un paleoambiente fluvial de ríos entrelazados anchos y someros, con dominio de carga por tracción que pasan en las áreas orientales (valle Calchaquí) a canales entrelazados con carga mixta (Bridge 1985, Miall 1996).

### Procedencia

El análisis composicional de la Formación Quebrada de los Colorados indica que sus conglomerados están dominados por dos tipos de rocas (Fig. 4): rocas metamórficas de bajo a mediano grado (filitas y esquistos) y rocas ígneas plutónicas (granitos y granodioritas, granitos rosados, granitos grises, tonalitas, pegmatitas, etc.). Por otro lado, el análisis de las paleocorrientes indica un predominio de corrientes desde el O, ONO, NNO y NO, no obstante en Hualfín se observó cierta bipolaridad (Fig. 4).

Sobre la integración de estos datos se propone que la impronta granítica de la Formación Quebrada de los Colorados refleja una roca madre plutónica. Los aportes provenirían desde los granitos del borde oriental de la Puna (Complejo Eruptivo Oire) para el valle de Hualfín y desde aquellos que forman el cerro Durazno para el Valle de Pucará (Fig. 2). En el Valle Calchaquí, se observan granitos grises que serían aportados por los plutones del Paleozoico temprano emplazados en la sierra de Quilmes (Tonalita Las Viñas y Granito Altos del Cañón) y granitos rosados que serían aportados por el Granito Pucará o sus equivalentes como el granito del cerro Bayo sur.

El aporte de rocas metamórficas se interpreta como proveniente de las metamorfitas del Complejo Metamórfico Río Blanco, aflorante en la Puna (fuera del área de estudio) para el valle de Hualfín, desde la Formación La Paya (cerro Cuevas) para el valle de Pucará y desde la Formación Puncoviscana

(sierra de Quilmes) para las metamorfitas de muy bajo grado predominantes en los perfiles C, D y E del Valle Calchaquí (véase Fig. 2 para ubicación).

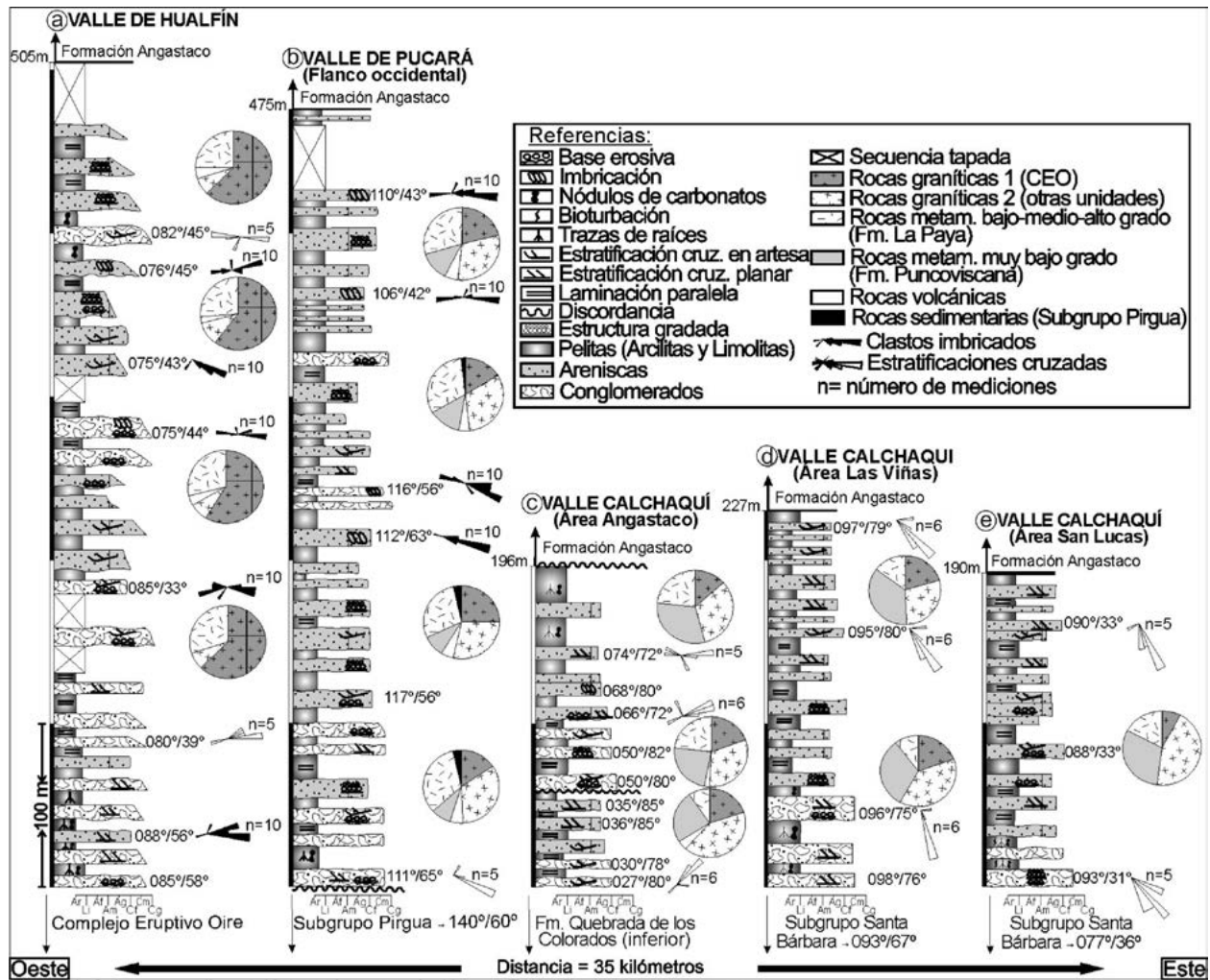
El contenido relativo de clastos provenientes del Complejo Eruptivo Oire disminuye gradualmente hacia el este, donde son más abundantes los granitos grises y rosados. Asimismo, en los perfiles de Las Viñas y San Lucas es notable el porcentaje de clastos de metamorfitas provenientes de la Formación Puncoviscana (sierra de Quilmes), los cuales son escasos o están ausentes en las localidades occidentales. Las características descriptas son compatibles con aportes detríticos locales en cada una de las localidades estudiadas. Una evidencia que apoya esta interpretación es el hallazgo de clastos del Subgrupo Pirgua solamente en los conglomerados de la Formación Quebrada de los Colorados acumulada en el valle de Pucará (Fig. 4b).

### Estructuras de crecimiento

En todas las áreas que componen el tramo medio de los Valles Calchaquíes, el mapeo estructural de detalle permitió registrar rasgos de sedimentación sintectónica en la Formación Quebrada de los Colorados. Estas estructuras de crecimiento documentan eventos de deformación acaecidos en el Paleógeno.

La Formación Quebrada de los Colorados se apoya en incomformidad sobre las rocas graníticas del Complejo Eruptivo Oire en el extremo sudoccidental del valle de Hualfín. Los estratos basales conforman un abanico de capas abierto hacia el este, en donde los buzamientos varían desde 62° a 36° (Fig. 5a). La proyección de estas capas converge en una superficie convexa hacia arriba y en disposición traslapante conformando una discordancia progresiva simple de tipo *onlap* rotatorio (Riba 1976). En este apilamiento de capas también se observa disminución de espesores, rasgo que evidencia una depositación sintectónica. Esta estructura de crecimiento sería el resultado de la actividad de una falla ciega con vergencia oriental, emplazada en el Complejo Eruptivo Oire, que produce un anticlinal con núcleo de granito y con los estratos de crecimiento situados en su flanco frontal.

La Formación Quebrada de los Colorados cubre en discordancia angular al Subgrupo Pirgua y sus niveles basales también mues-



**Figura 4:** Columnas sedimentológicas de la Formación Quebrada de los Colorados. Se grafican datos estructurales y de procedencia. a) valle de Hualfín; b) valle de Pucará; c) área Angastaco; d) área Las Viñas; e) área San Lucas. Véase figura 2 para ubicación.

tran un arreglo espacial de capas en abanico (Fig. 5b) en el borde occidental del Valle de Pucará. Los estratos muestran una divergencia gradual reflejada por una disminución en el buzamiento ( $75^{\circ}$ -  $32^{\circ}$ ) en corta distancia (200 m). Las capas apiladas se abren hacia el este describiendo una geometría de discordancia progresiva simple de tipo *offlap* rotatorio (Riba 1992). Esta estructura de crecimiento es el resultado del levantamiento del borde occidental del valle de Pucará por la actividad de la falla Jasimaná durante sus primeras etapas de inversión tectónica (Hongn y Seggiaro 2001, Seggiaro *et al.* 2006) de forma contemporánea con la sedimentación de la Formación Quebrada de los Colorados.

Hacia el suroeste de Angastaco, en el extremo nor-oriental de la sierra de Quilmes, los niveles inferior y superior de la sección

afiorante de la Formación Quebrada de los Colorados están separados por una discordancia angular sintectónica que se manifiesta por la variación en el rumbo de las capas (Fig. 5c). Las capas inferiores a la discordancia tienen rumbo NO y buzamiento al NE, mientras que por encima de ella tienen rumbo NNO y buzamiento al ENE (Fig. 5c). Este apilamiento de capas define una cuña detrítica entre los estratos tabulares y sería consecuencia de la actividad de la falla de Quilmes y el crecimiento del anticlinal con núcleo en la sierra homónima.

#### Edad

Las edades disponibles sugieren que la depositación de la Formación Quebrada de los Colorados ocurrió entre el Eoceno medio y el Oligoceno tardío, desde los 40 Ma hasta los 28 Ma aproximadamente.

Carrapa *et al.* (2011a, b) brindan edades de máxima depositación de  $37,6 \pm 1,2$  Ma y  $37,6 \pm 2$  Ma para la Formación Quebrada de los Colorados en los perfiles de Pucará y Angastaco. Por otro lado, DeCelles *et al.* (2011) obtuvieron una edad de  $40,6 \pm 0,3$  Ma a partir de circones detríticos en muestras de la base de la Formación Quebrada de los Colorados en Monte Nieva (hacia el nor-este y fuera del área de estudio) (véase Fig. 1).

Este conjunto de edades es coherente con los restos fósiles de vertebrados identificados en la sección basal de esta unidad en los Valles Calchaquíes del norte (Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, del Papa *et al.* 2013a), que incluyen marsupiales, notoungulados, Astrapotheria y Xenarthra (Dasypodidae) (véase síntesis en Powell *et al.* 2011). Esta asociación de mamíferos indica



una edad eocena media para la Formación Quebrada de los Colorados (Casamayorenses) (Powell *et al.* 2011, Herrera 2013). La edad del techo de esta unidad se estima por su posición estratigráfica, tomando como referencia dos edades de 21 Ma (Carrapa *et al.* 2011b, del Papa *et al.* 2013a) obtenidas en la base de la Formación Angastaco.

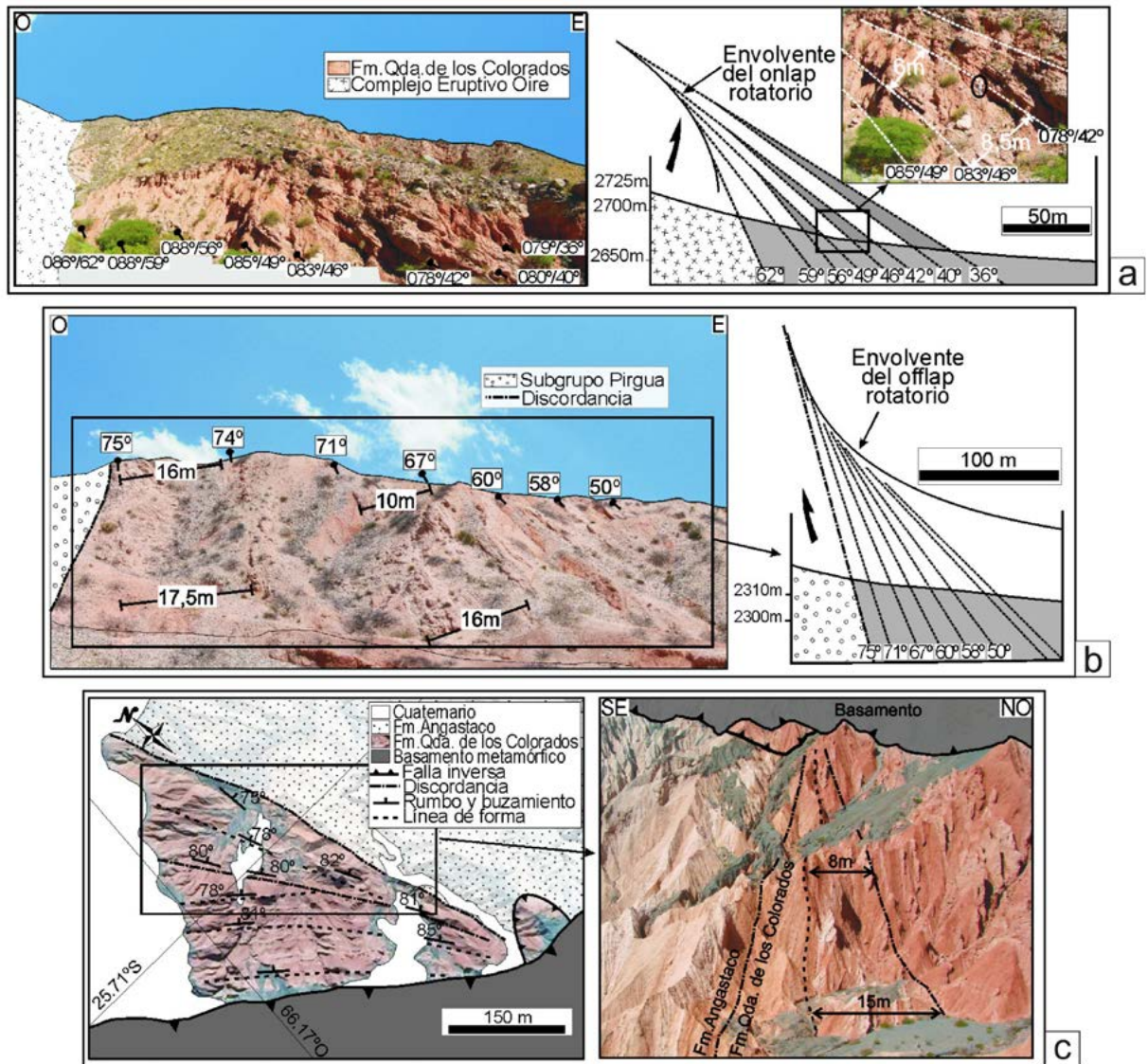
### ESTRUCTURA

El área de estudio muestra fallas y pliegues que en algunos casos alcanzan decenas de kilómetros de longitud (Carrera y Muñoz 2008, 2013). Los anticlinales mayores, con núcleo de basamento, son asimétricos y generados por fallas inversas de alto ángulo que cortan la cubierta sedimentaria.

Las estructuras tienen orientación general meridiana a submeridiana (Fig. 2) y una vergencia dominante hacia el oeste (Turner y Mon 1979, Hongn y Seggiaro 2001), probablemente producto de la reactivación-inversión de heterogeneidades previas como las fallas normales del *rift* cretácico de Salta y las estructuras del basamento (Hongn *et al.* 2010) que le otorgan al área un estilo tectónico de piel gruesa (Mon 1979, Drozdowski y Mon 1999).

En el borde occidental del valle de Hualfín las rocas del Complejo Eruptivo Oire son levantadas por fallas inversas de rumbo meridiano y vergencia oriental, cuya orientación habría estado parcialmente condicionada por fajas de deformación dúctil (Hongn y Seggiaro 2001). En el borde oriental, la

falla Jasimaná de rumbo general NNO y vergencia occidental, superpone las rocas del Subgrupo Pigua sobre la cubierta cenozoica (sección B-B' de la Fig. 6). Esta falla inversa es una estructura extensional del *rift* cretácico, invertida durante el acortamiento cenozoico (Hongn y Seggiaro 2001, Seggiaro *et al.* 2006, Carrera y Muñoz 2008) y cuyos datos cinemáticos relevados y analizados por Seggiaro *et al.* (2006) a lo largo de su traza, demuestran un desplazamiento horizontal izquierdo para esta estructura. En el tramo sur del valle de Hualfín, la cubierta sedimentaria describe pliegues (anticlinales y sinclinales) levemente asimétricos, con ejes en su mayoría de orientación NNO y superficies axiales con buzamiento alto hacia el naciente, posiblemente vinculados



**Figura 5:** Fotografías e interpretación de las estructuras de crecimiento encontradas en los niveles basales de la Formación Quebrada de los Colorados. Véase figura 2 para su localización. A) valle de Hualfín; b) valle de Pucará; c) área Angastaco (valle Calchaquí).

con fallas inversas ciegas asociadas a la falla Jasimaná (sección B-B' de la Fig. 6).

En el bloque alto de la falla Jasimaná, el Subgrupo Pirgua conforma el anticlinal del cerro Colorado que constituye el borde occidental del valle de Pucará. El flanco oriental de este pliegue está truncado, en un ángulo de hasta 20° en el rumbo, por la discordancia entre el Subgrupo Pirgua y la Formación Quebrada de los Colorados (sección A-A' de la Fig. 6). Por otro lado, en el borde oriental de este valle, la falla de Quilmes, de vergencia occidental, monta las rocas del basamento sobre el Subgrupo Pirgua. La estructura principal del valle de Pucará es un sinclinal cuyo eje cambia de orientación desde NNE en el tramo sur a N en el tramo norte (Fig. 6).

Dos cuñas o bloques de basamento levantados por fallas con alto ángulo de buzamiento al este se destacan en el borde nororiental de este valle (sección A-A' de la Fig. 6). En los bloques de techo de estas fallas está expuesta la base conglomerádica del Subgrupo Pirgua que pasa vertical y lateralmente a facies más finas. Estas estructuras podrían

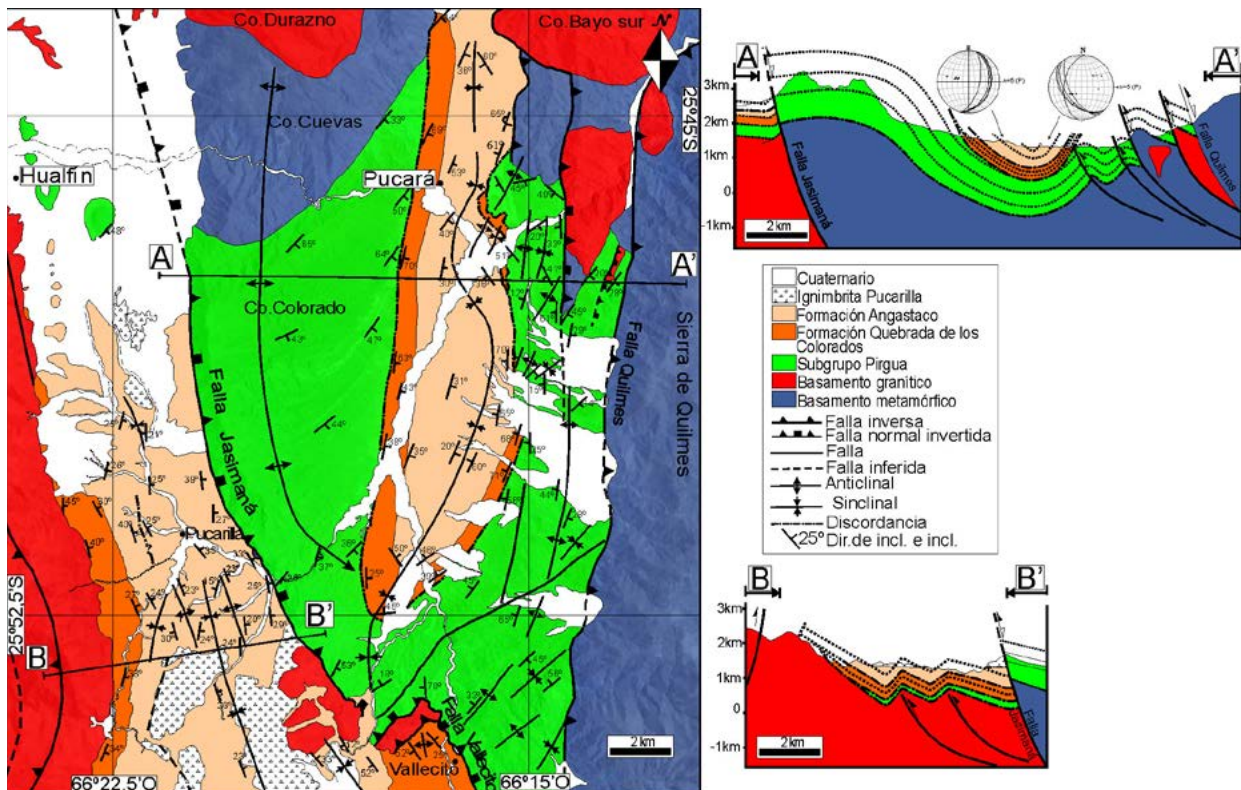
interpretarse como fallas sintéticas menores reactivadas y ubicadas en el piso (bloque rotado) del hemigraben de Pucará, cuya falla maestra corresponde a la falla Jasimaná. Otras complicaciones estructurales observadas en el tramo central consisten en pliegues de segundo orden en la cubierta sedimentaria producidos por fallas ciegas de vergencia occidental y una discordancia angular entre la Formación Angastaco y las unidades infrayacentes. Este conjunto de evidencias permiten interpretar a la falla de Quilmes como una estructura con un significativo grado de actividad o de acortamiento durante el Cenozoico.

Más al este, la sierra de Quilmes conforma una estructura tipo *pop-up* (Carrera y Muñoz 2008) limitada por la falla de Quilmes al oeste y otra falla antitética de vergencia oriental por el este. Asociadas a la falla de Quilmes, hacia el este se encuentran las fallas Las Viñas y San Lucas, que levantan de forma escalonada bloques de basamento relacionados con el tramo suroccidental de la sierra de Quilmes en el área de estudio (Fig. 2).

En el valle Calchaquí, hacia el este de An-

gastaco, la cubierta sedimentaria describe pliegues con ejes de orientaciones diferentes que convergen en una misma zona conformando un patrón de interferencia que resulta en una depresión estructural (Fig. 2) (Carrera y Muñoz 2008). Dos de estos pliegues de primer orden continúan hacia el sur en los anticlinales de Las Viñas y San Lucas (Fig. 7). Estos pliegues con núcleo de basamento muestran fallas en sus flancos occidentales a través de las cuales el basamento monta al Grupo Payogastilla. Las sedimentitas del Subgrupo Santa Bárbara así como las del Grupo Payogastilla se disponen en relaciones estratigráficas de paraconformidad en los flancos orientales con menor deformación.

El anticlinal Las Viñas muestra una línea axial de orientación variable (NE a N) y la superficie axial con leve vergencia occidental. En su flanco occidental se observa una ramificación de la falla Las Viñas que afecta a las rocas del Grupo Payogastilla (sección C-C' de la Fig. 7). Una relación estratigráfica de interés ocurre en la zona de cierre del anticlinal, en donde la Forma-

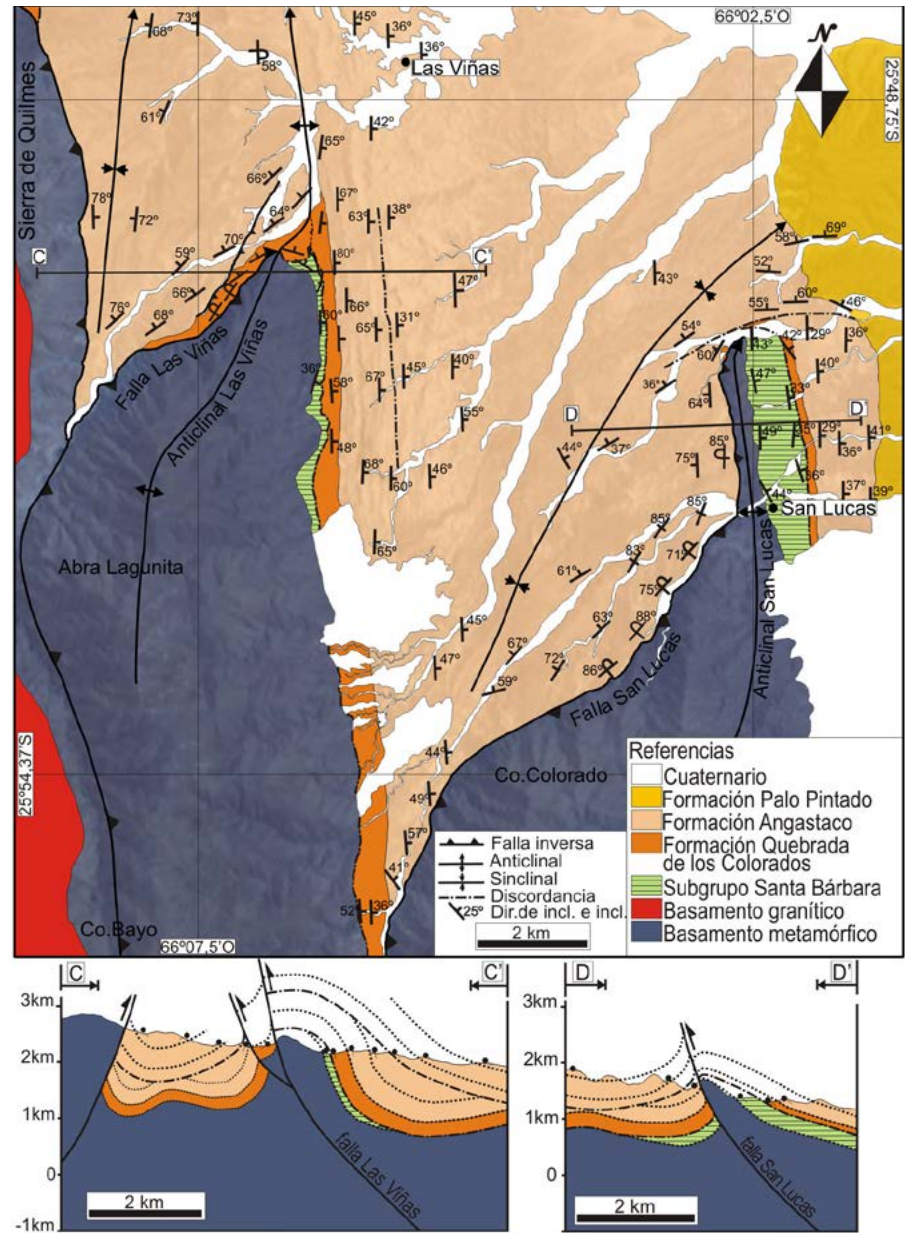


**Figura 6:** Mapa de detalle y secciones estructurales esquemáticas de los valles de Hualfín y Pucará. La sección A-A' muestra a la falla Jasimaná que pliega al Subgrupo Pirgua durante su inversión tectónica en el Eoceno, a la vez que genera la discordancia progresiva de la base de la Formación Quebrada de los Colorados en el flanco occidental del sinclinal del valle de Pucará. La sección B-B' muestra los plegamientos de la cubierta sedimentaria en el valle de Hualfín y la discordancia progresiva de la base de la Formación Quebrada de los Colorados generada por la falla vergente al naciente emplazada en el basamento granítico.



ción Quebrada de los Colorados traslapa a la Formación Lumbreira y se apoya directamente sobre el basamento en la charnela del pliegue (sección C-C' de la Fig. 7). Esto evidencia el plegamiento por inversión del Subgrupo Santa Bárbara, durante el pasaje hacia un régimen tectónico compresivo y la depositación de la Formación Quebrada de los Colorados en la cuenca. Otra discontinuidad, ubicada en el flanco oriental del anticlinal Las Viñas, ocurre entre los niveles inferiores a medios de la Formación Angastaco que están en contacto mediante una discordancia angular (Aramayo *et al.* 2017) (sección C-C' de la Fig. 7), esta misma fue también identificada en afloramientos cercanos a la localidad de Angastaco (Carrapa *et al.* 2011a) y en San Lucas (Carrera y Muñoz 2008).

La línea axial del anticlinal San Lucas es de dirección N y con una marcada inmersión hacia el norte. La falla San Lucas, que expone el basamento sobre la Formación Angastaco (sección D-D' de la Fig. 7) pierde rechazo hacia el norte. Los niveles de la Formación Quebrada de los Colorados aflorantes en la quebrada de orientación E-O que corta la nariz del anticlinal dibujan el cierre del pliegue y no están desplazados por la falla como lo documentaron Carrera y Muñoz (2008) (véase Fig. 10 de ese trabajo). Por lo que se interpreta que la Formación Quebrada de los Colorados traslapa sobre las tres unidades del Subgrupo Santa Bárbara y se apoya directamente sobre el basamento en el flanco occidental del anticlinal San Lucas, completando así la geometría del pliegue en la parte norte. Esta relación de traslape estaría vinculada con las primeras etapas de crecimiento del pliegue de San Lucas, situación que conduce a la erosión del Subgrupo Santa Bárbara en etapas previas e iniciales a la depositación de la Formación Quebrada de los Colorados. Estas relaciones refuerzan la interpretación de una discontinuidad entre la Formación Quebrada de los Colorados y las unidades infrayacentes que fueron erosionadas. La discordancia angular intraformacional en la Formación Angastaco, descrita para la zona de Las Viñas (Aramayo *et al.* 2017), tiene mejor expresión en esta área (bloque yacente, sección D-D' de la figura 7) y fue registrada en el sector norte del anticlinal San Lucas por Carrera y Muñoz (2008).



**Figura 7:** Mapa de detalle y secciones estructurales esquemáticas de las áreas Las Viñas y San Lucas (valle Calchaquí). Ambas secciones estructurales muestran anticlinales con núcleo de basamento en cuyos flancos orientales se registra la discontinuidad entre el Subgrupo Santa Bárbara (Formación Lumbreira) y el suprayacente Grupo Payogastilla. También se destaca la discordancia intraformacional en la Formación Angastaco documentada en ambas localidades.

## DISCUSIÓN

La Formación Quebrada de los Colorados es la unidad más antigua del Grupo Payogastilla. Corresponde a la base del relleno sedimentario de la cuenca de antepaís en los Valles Calchaquíes que preserva evidencias de los primeros episodios de contracción cenozoica. La edad eocena media a tardía de la base de esta unidad es indiscutible de acuer-

do con las últimas evidencias brindadas por fósiles y dataciones a partir de circones detriticos (Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, Carrapa *et al.* 2011a, b, DeCelles *et al.* 2011, Powell *et al.* 2011, del Papa *et al.* 2013a, Herrera 2013, entre otros). Los resultados de este trabajo reflejan claramente que el depósito de la Formación Quebrada de los Colorados en el tramo medio de los Valles Calchaquíes ocurrió bajo



un régimen sintectónico, como se ha mencionado por Hongn *et al.* (2007), Payrola Bosio *et al.* (2009) y del Papa *et al.* (2013a) para áreas situadas hacia el norte. La deformación eocena queda documentada por las discordancias existentes en la base de la Formación Quebrada de los Colorados como la que se observa en el borde occidental del valle de Pucará. Si bien el *hiatus* entre los niveles del Subgrupo Pirgua y el Grupo Payogastilla es de decenas de millones de años, se interpreta que el anticlinal del Subgrupo Pirgua resulta de las primeras etapas de inversión tectónica de la falla Jasimaná, ocurrida previo al depósito de la Formación Quebrada de los Colorados, que comenzó en el Eoceno medio a tardío.

Asimismo, la erosión del Subgrupo Santa Bárbara en los anticlinales de Las Viñas y San Lucas, donde la Formación Quebrada de los Colorados traslapa estas unidades y se asienta directamente sobre basamento, constituye otro argumento para sostener el episodio de deformación paleógena que separa las cuencas de los Grupos Salta y Payogastilla.

Carrera y Muñoz (2008), interpretan que el traslape del Grupo Payogastilla sobre el Subgrupo Santa Bárbara en el anticlinal de San Lucas se debe a que allí se encuentra el borde de cuenca de las facies de *postrift*, para lo cual argumentan una litología de brechas en estas unidades. Al mismo tiempo, señalan que estas unidades no se encuentran en el flanco oeste del anticlinal San Lucas. Por el contrario, en este sitio se reconoce una secuencia sedimentaria compuesta de areniscas y limolitas con desarrollo local de paleosuelos para las formaciones Mealla, Maíz Gordo y Lumbraera, la cual no concuerda con un borde de cuenca que produciría el acuñamiento de más de 500 metros de potencia en una distancia menor a 300 metros. Asimismo, la interpretación de Carrera y Muñoz (2008) no tiene en cuenta la continuidad de la Formación Lumbraera en Las Viñas, más al oeste, como lo reconocen Vergani y Starck (1989). Por lo tanto, interpretamos que el traslape de la Formación Quebrada de los Colorados sobre las unidades infrayacentes estaría asociado a las etapas iniciales de crecimiento del anticlinal San Lucas, situación que produce la erosión del Subgrupo Santa Bárbara. Esto plantea la exhumación del Subgrupo Santa Bárbara previo a la depositación del relleno del antepaís, aunque no se han observado clastos reciclados de estas unidades en la For-

mación Quebrada de los Colorados.

En esta contribución se adhiere a las hipótesis que señalan al contacto entre los Grupos Salta y Payogastilla como una discontinuidad estratigráfica regional (Vergani y Starck 1989, Salfity *et al.* 1993, del Papa *et al.* 2004, Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, entre otros).

La existencia de deformación paleógena se sustenta además con el hallazgo de estructuras de crecimiento en la Formación Quebrada de los Colorados en Hualfín, Pucará y Angastaco (Fig. 8a). El evento de deformación responsable corresponde al Eoceno medio a tardío teniendo en cuenta las edades de 37 Ma disponibles (Carrapa *et al.* 2011a, b). Esta deformación activó fallas de borde que levantaron y exhumaron bloques de basamento que aportaron sedimentos locales en todas las áreas estudiadas (Fig. 8).

En el extremo sur del valle de Hualfín, la estructura de crecimiento de la base de la Formación Quebrada de los Colorados indica que las fallas con vergencia oriental que levantaron y establecieron al Complejo Eruptivo Oire como un protoalto estructural, se habrían reactivado antes del Eoceno medio a tardío. Los análisis de proveniencia que sugieren áreas fuentes graníticas y las paleocorrientes que indican un paleoflujo proveniente desde el O y NO documentadas en el perfil de Hualfín (Fig. 4a), apoyan esta interpretación. El hecho de que la Formación Geste en la Puna también registre proveniencia desde el Complejo Eruptivo Oire, refuerza la hipótesis de que este cinturón magmático constituía un alto que separaba las cuencas de las Formaciones Geste en la Puna y Quebrada de los Colorados en los Valles Calchaquíes (del Papa *et al.* 2013a).

Para el valle de Pucará, los rasgos de sedimentación sintectónica de la Formación Quebrada de los Colorados demuestran la inversión tectónica de la falla Jasimaná previo y durante el Eoceno medio a tardío. Este proceso levantó los cerros Colorado (Subgrupo Pirgua), Cuevas (basamento metamórfico) y Durazno (basamento granítico), estableciendo un alto estructural que separaba parcialmente los valles de Hualfín y Pucará. El análisis composicional de clastos psefíticos (predominio de clastos de granitos rosados y presencia de clastos del Subgrupo Pirgua) y los datos de paleocorrientes (flujos predominantes desde el O y NO) (Fig. 4b), tomados en los conglomerados de la Formación Quebrada de los

Colorados en este sitio, respaldan esta idea.

Finalmente, la estructura de crecimiento identificada en la Formación Quebrada de los Colorados en Angastaco (Valle Calchaquí), señala la actividad de la falla de Quilmes y el establecimiento de la sierra homónima como alto estructural limítrofe entre éste y los sectores más occidentales durante el Eoceno. En los perfiles del Valle Calchaquí, los conglomerados de la Formación Quebrada de los Colorados exhiben granitos grises y pegmatitas compatibles con las rocas plutónicas emplazadas en la sierra de Quilmes (Tonality Las Viñas y Granito Alto del Cajón) y la abundancia de clastos de metamorfitas de muy bajo grado provenientes de la Formación Puncoviscana. Los datos de paleocorrientes que indican flujos desde el O, NO y NNO (Fig. 4c-e), se corresponden con estas observaciones.

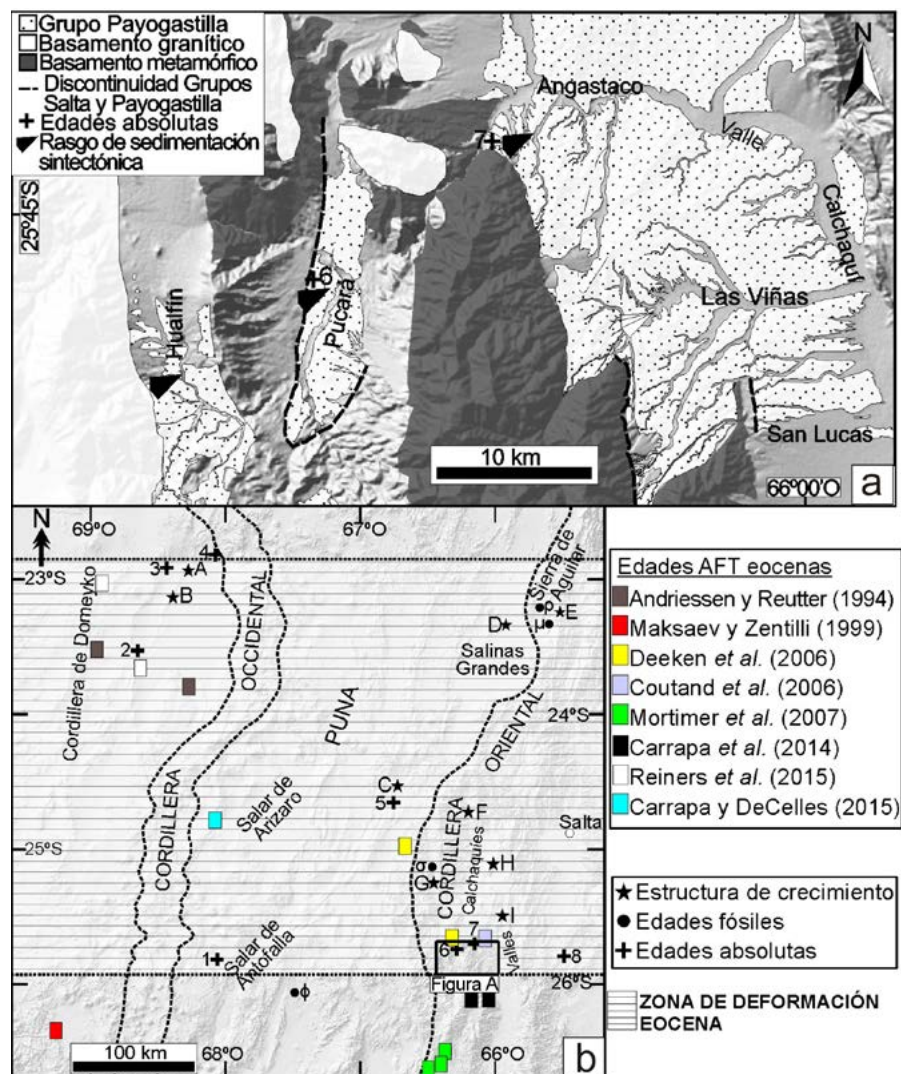
Las evidencias descritas más arriba sugieren que la deformación y sedimentación ocurrían de forma contemporánea en las diferentes áreas estudiadas desde el Eoceno medio a tardío.

El registro de la deformación paleógena es discutido para la región de los Valles Calchaquíes (Carrera y Muñoz 2008, Carrapa *et al.* 2011a, b, DeCelles *et al.* 2011, entre otros). Estas investigaciones proponen que los Valles Calchaquíes correspondían a una zona de fosa frontal durante la depositación de la Formación Quebrada de los Colorados (Carrapa *et al.* 2011a) en respuesta al frente de deformación que se localizaba en el borde oriental de la Puna. En estos modelos, los Valles Calchaquíes evolucionaron como la fosa frontal (*foredeep*) de un antepaís simple hasta el Mioceno medio, tiempo en que se produce el acortamiento andino con el que comienza la inversión del Grupo Salta junto a la depositación de la sección media a superior de la Formación Angastaco y la cuenca pasa a comportarse como una zona de techo de cuña (*wedge-top*), para adquirir un diseño de cuencas intermontanas (antepaís fragmentado) en el Plio-Pleistoceno (Coutand *et al.* 2006, Mortimer *et al.* 2007, Carrapa *et al.* 2011a). Las observaciones presentadas en este trabajo refuerzan las hipótesis que señalan al contacto entre las cuencas de los Grupos Salta y Payogastilla como una discontinuidad estratigráfica regional (Vergani y Stack 1989, Salfity *et al.* 1993, del Papa *et al.* 2004, Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, entre otros).

Carrapa y DeCelles (2015), presentan una compilación de datos de edades de levantamiento y exhumación obtenidos mediante termocronología (trazas de fisión y edades de (UTh)/He en apatitas), a partir de la cual proponen que el frente de deformación eoceno se extendía desde la Cordillera de Domeyko hasta el borde oriental de la Puna y alcanzó la posición de los Valles Calchaquíes en el Mioceno medio. La discontinuidad entre los Grupos Salta-Payogastilla y los rasgos de sedimentación sintectónica de la Formación Quebrada de los Colorados en los Valles Calchaquíes (Hongn *et al.* 2007, Payrola Bosio *et al.* 2009, 2011, del Papa *et al.* 2013a, este trabajo), junto a las evidencias de deformación paleógena documentada en regiones más orientales (Mina Aguilar-Casa Grande) (Montero López *et al.* 2016), sugieren que la zona de deformación eocena era más amplia que la propuesta por estos autores, y a la vez plantea inconvenientes para definir un frente de deformación en el sentido clásico (Dahlen 1990); en este contexto el registro disponible de deformación eocena indica que las manifestaciones más orientales se encontraban en el valle del Tonco y/o en la sierra de Aguilar (Payrola *et al.* 2011, Montero López *et al.* 2016). De esta manera, la deformación eocena queda registrada con diacronías leves para el Eoceno medio a tardío dentro de una zona de aproximadamente 300 km de ancho (Fig. 8b).

En consecuencia, la cuenca del antepaís de los Valles Calchaquíes mostró una configuración compleja desde su inicio en el Eoceno y su evolución estuvo regulada por procesos de deformación intracuenal con formación de bloques de basamento que se levantaban afectando la conectividad entre las áreas donde se acumulaba sinorogénicamente la Formación Quebrada de los Colorados. En este estilo tectónico influyeron marcadamente las estructuras pre-cenozoicas que definían un sustrato fuertemente fragmentado por las heterogeneidades del basamento y las fallas normales cretácicas (Hongn *et al.* 2010). Esta tectónica de piel gruesa acompañó la compartimentalización de la cuenca del Grupo Payogastilla desde el Eoceno medio a tardío (Hongn *et al.* 2011, del Papa *et al.* 2013a).

Bajo estas condiciones, las deformación y sedimentación eocenas habrían seguido un patrón irregular de propagación en espacio y tiempo como consecuencia de la reactivación



**Figura 8:** a) detalle del tramo medio de los Valles Calchaquíes, se destaca el hallazgo de estructuras de crecimiento en la base del Grupo Payogastilla; b) extensión regional del área con manifestaciones de deformación para el Eoceno. Referencias: 1: Kraemer *et al.* (1999); 2: Ramírez y Gardeweg (1982); 3: Mpodozis *et al.* (2005); 4: Reutter *et al.* (1991); 5: DeCelles *et al.* (2007); 6: Carrapa *et al.* (2011a); 7: Carrapa *et al.* (2011b); A: Mpodozis *et al.* (2005); B: Arriagada *et al.* (2006); C: Carrapa y DeCelles (2008); D: Monaldi *et al.* (1993); E: Montero López *et al.* (2016); F: Hongn *et al.* (2007); G: Payrola Bosio *et al.* (2009); H: Hongn *et al.* (2011); I: Payrola Bosio *et al.* (2011); φ: Ciancio *et al.* (2016); σ: Payrola Bosio *et al.* (2009); μ: Deraco *et al.* (2008); ρ: Insel *et al.* (2012).

de inversión de las heterogeneidades preexistentes (Coutand *et al.* 2001, Deeken *et al.* 2006, Hongn *et al.* 2007), procesos que se verifican desde el Eoceno y no desde el Neógeno como generalmente se postuló. Esto último no implica desconocer que las discordancias internas de la Formación Angastaco se vinculan con la intensificación de la deformación en el Mioceno medio, que diversas investigaciones han documentado en los Valles Calchaquíes (Carrera y Muñoz 2008, Carrapa *et al.* 2011a, Aramayo *et al.* 2017).

## CONCLUSIONES

Las estructuras de crecimiento preservadas en la Formación Quebrada de los Colorados y la discontinuidad de su base, evidencian que el acortamiento andino alcanzó la posición de los Valles Calchaquíes a partir del Eoceno medio a tardío. Esta deformación produjo la primera etapa de inversión tectónica de las fallas normales cretácicas asociadas al *rift* del Grupo Salta y una deposición sinorogénica de la Formación



### Quebrada de los Colorados.

La participación de bloques de basamento en las estructuras eocenas, sugiere que la cuenca del Grupo Payogastilla se comportó como un antepaís fragmentado desde su inicio en el Paleógeno, mostrando un comportamiento irregular con períodos en los que los procesos de deformación y sedimentación se registraban contemporáneamente en los Valles Calchaquíes del norte y el sur, e incluso en la Puna.

La actividad de fallas de borde y el alto grado de preservación de rocas clásticas gruesas en las secuencias paleógenas depositadas adyacente a las protosiembras, señalan que el tramo medio de los Valles Calchaquíes conformaba una zona de aproximadamente 50 km de ancho en donde las deformación y sedimentación habrían estado activas en cada una de las zonas de acumulación que lo componen (Valles de Hualfín, Pucará y Calchaquí). Este escenario ubica a la cuenca de antepaís paleógena de este sector del noroeste argentino en un modelo de antepaís fragmentado (*sensu* Jordan *et al.* 1983), más que una de cuenca de antepaís simple (DeCelles y Giles 1996).

Los resultados de esta contribución amplían sensiblemente el mapa de la deformación y sedimentación eocena en el noroeste de Argentina dado que extienden hacia el sur las evidencias de estructuras que estuvieron activas durante el Paleógeno y que del Papa *et al.* (2013a) documentaron en la porción norte de los Valles Calchaquíes. Además, permite continuar regionalmente hacia el sur la franja de la Cordillera Oriental de Bolivia y Argentina con registro de estos eventos de deformación paleógenos (Horton 2005, del Papa *et al.* 2013a, Montero López *et al.* 2016).

### AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en esta contribución forman parte de investigaciones financiadas por ANPCyT (PICT 2012-0419 y PICT 2011-0407), CONICET (PIP 489) y CIUNSa (N°2027). A las personas de los valles de Hualfín, Pucará y Calchaquí por su hospitalidad. A Carolina Montero por su colaboración en la lectura del manuscrito. A Carlos Bianchi por su valiosa colaboración con la parte gráfica. Los autores agradecen las revisiones de los Doctores Silvia Barredo y Sergio Georgieff que permitieron mejorar

sensiblemente la versión final de esta contribución.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Andriessen, P.A. y Reutter, K.J. 1994. K–Ar and fission track mineral age determinations of igneous rocks related to multiple magmatic arc systems along the 23°S Latitude of Chile and Argentina. *Tectonics of the Southern Central Andes*. Springer-Verlag, 141-154 p., Berlin.
- Allmendinger, R.W., Jordan, T., Kay, S. y Isacks, B. 1997. The evolution of the Altiplano–Puna Plateau of the central Andes. *Annual Review Earth Planet Sciences* 25: 139-174.
- Aramayo, A.J. 2015. Migraciones espacial y temporal de las deformación y sedimentación cenozoicas en el tramo medio de los valles calchaquíes (Hualfín-Pucará-Angastaco-San Lucas), provincia de Salta. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Salta (inérita), 354 p., Salta.
- Aramayo, A.J., Guzmán, S., Hongn, F.D., del Papa, C.E., Montero López, C. y Sudo, M. 2017. A Middle Miocene (13.5 -12 Ma) deformational event constrained by volcanism along the Puna-Eastern Cordillera border, NW Argentina. *Tectonophysics* 703-704: 9-22.
- Arriagada, C., Cobbold, P.R. y Roperch, P. 2006. Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in the central Andes since the mid-Cretaceous. *Tectonics* 25: TC1008.
- Blasco, G., Zappettini, E. y Hongn, F.D. 1996. Hoja Geológica 2566-I, San Antonio de los Cobres. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, Boletín 217: 126 p., Buenos Aires.
- Bridge, J.S. 1985. Paleochannel patterns inferred from alluvial deposits: a critical evaluation. *Journal of Sedimentary Petrology* 55: 579-589.
- Carrapa, B. y DeCelles, P.G. 2008. Eocene exhumation and basin development in the Puna of northwestern Argentina. *Tectonics* 27: TC1015.
- Carrapa, B. y DeCelles, P.G. 2015. Regional exhumation and kinematic history of the central Andes in response to cyclical orogenic processes. En: DeCelles, P.G., Ducea, M.N., Carrapa, B., and Kapp, P.A. (eds.) *Geodynamics of a Cordilleran Orogenic System: The Central Andes of Argentina and Northern Chile*, Geological Society of America Memoir 212: 201-213.
- Carrapa, B., Adelman, D., Hilley, G., Mortimer, E., Strecker, M.R. y Sobel, E.R. 2005. Oligocene uplift, establishment of internal drainage and development of plateau morphology in the southern Central Andes. *Tectonics* 24: TC4011.
- Carrapa, B., Trimble, J. y Stockli, D. 2011a. Patterns and timing of exhumation and deformation in the Eastern Cordillera of NW Argentina revealed by (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics* 30: TC3003.
- Carrapa, B., Bywater-Reyes, S., DeCelles, P., Mortimer, E. y Gehrels, G.E. 2011b. Late Eocene–Pliocene basin evolution in the Eastern Cordillera of northwestern Argentina (25°–26°S): regional implications for Andean orogenic wedge development. *Basin Research* 23: 1-20.
- Carrapa, B., Bywater-Reyes, S., Safipour, R., Sobel, E.R., Schoenbohm, L., Reiners, P. y Stockli, D. 2014. The effect of inherited paleotopography on exhumation of the central Andes of NW Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 126: 6-77.
- Carrera, N. y Muñoz, J.A. 2008. Thrusting evolution in the southern Cordillera Oriental (northern Argentine Andes): Constraints from growth strata. *Tectonophysics* 24. doi:10.1029/2004TC001762.
- Carrera, N. y Muñoz, J.A. 2013. Thick-skinned tectonic style resulting from the inversion of previous structures in the southern Cordillera Oriental (NW Argentine Andes). *Geological Society, London, Special Publications* 377: 77-100.
- Charrier, R., Farias, M. y Maksae, V. 2009. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 5-35.
- Ciancio, M., Herrera, C., Aramayo, A.J., Payrola Bosio, P. y Babot, M.J. 2016. Diversity of cingulate xenarthrans in the middle-late Eocene of Northwestern Argentina. *Actas Palaeontologica Polonica* 61: 575-590.
- Coira, B., Davidson, J., Mpodozis, C. y Ramos, V.A. 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of Northern Argentina and Chile. *Earth Science Review* 18:303-332.
- Coira, B., Galli, C.I., Kay, S.M., Kay, R.W. y Flores, P. 2014. Niveles piroclásticos como herramientas de correlación en los depósitos cenozoicos del Grupo Payogastilla, valles Calchaquí, Tonco y Amblayo, en el noroeste de Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71: 147-160.
- Coutand, I., Cobbold, P., de Urreiztieta, M., Gautier, P., Chauvin, A., Gapais, D., Rossello, E. y López Gamundí, O. 2001. Style and history of Andean deformation. Puna plateau, northwestern Argentina. *Tectonics* 20: 210-234.
- Coutand, I., Carrapa, B., Deeken, A., Schmitt, A.K., Sobel, E.R. y Strecker, M.R. 2006. Pro-

- pagation of orographic barriers along an active range front: insights from sandstone petrography and detrital apatite fission-track thermochronology in the intramontane Angastaco Basin, NW Argentina. *Basin Research* 18: 1-26.
- Dahlen, F.A. 1990. Critical taper model of fold-and thrust belts and accretionary wedges. *Annual Review Earth Planet Sciences* 18: 55-99.
- DeCelles, P.G. y Giles, K.A. 1996. Foreland basin systems. *Basin Research* 8: 105-123.
- DeCelles, P.G. y Horton, B. 2003. Early to Middle Tertiary foreland development and the history of Andean crustal shortening in Bolivia. *Geological Society of America Bulletin* 115: 58-77.
- DeCelles, P.G., Langford, R.P. y Schwartz, R.K. 1983. Two new methods of paleocurrent determination from trough cross stratification. *Journal of Sedimentary Research* 53: 629-642.
- DeCelles, P.G., Carrapa, B. y Geherels, G.E. 2007. Detrital zircon U-Pb ages provide provenance and chronostratigraphic information from Eocene synorogenic deposits in northwestern Argentina. *Geology* 35: 323-326.
- DeCelles, P.G., Carrapa, B., Horton, B.K. y Gehrels, G.E. 2011. Cenozoic foreland basin system in the central Andes of northwestern Argentina: implications for Andean geodynamics and modes of deformation. *Tectonics* 30: TC6013.
- Deeken, A., Sobel, E.R., Coutand, I., Haschke, M., Riller, U. y Strecker, M.R. 2006. Development of the Southern Eastern Cordillera, NW Argentina, constrained by apatite fission track thermochronology: from early Cretaceous extension to middle Miocene shortening. *Tectonics* 25: TC6003.
- del Papa, C., Hongn, F., Petrinovic, I. y Domínguez, R. 2004. Evidencias de deformación pre-miocena media asociada al antepaís andino en la Cordillera Oriental (24° 35' S- 66° 12' O). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 506-509.
- del Papa, C.E., Hongn, F.D., Powell, J., Payrola Bosio, P., do Campo, M., Strecker, M.R., Petrinovic, I., Schmitt, A.K. y Pereyra, R. 2013a. Middle Eocene-Oligocene broken foreland evolution in the Andean Calchaquí Valley, NW Argentina: insights from stratigraphic, structural and provenance studies. *Basin Research* 25: 1-20.
- del Papa, C., Hongn, F.D., Payrola Bosio, P., Powell, J., Deraco, V. y Herrera C. 2013b. Relaciones estratigráficas de las Formaciones Quebrada de los Colorados y Angastaco (Paleógeno-Neógeno), Valles Calchaquíes, Salta (Argentina): significado en el análisis de la cuenca del Grupo Payogastilla. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 20: 51-64.
- Deraco, M.V., Powell, J.E. y López, G. 2008. Primer leontínido (Mammalia, Notoungulata) de la Formación Lumbraera (Subgrupo Santa Bárbara, Grupo Salta-Paleógeno) del noroeste argentino. *Ameghiniana* 45: 83-91.
- Díaz, J. y Malizzia, D. 1983. Estudio geológico y sedimentológico del Terciario Superior del Valle Calchaquí (Dpto. San Carlos, Salta). *Boletín Sedimentológico* 2: 8-28.
- Drozdzewski, G. y Mon, R. 1999. Oppositely-verging thrusting structures in the North Argentine Andes compared with the German Variscides. *Acta Geológica Hispánica* 34: 185-196.
- Ege, H., Jacobshagen, V., Scheuber, E., Sobel, E.R. y Vietor, T. 2001. Thrust related exhumation revealed by apatite track dating, Central Andes (Southern Bolivia). *General Assembly Geophysics Research Abs*: 25.30.
- Galli, C.I. y Hernández, R.M. 1999. Evolución de la Cuenca de Antepaís desde la zona de la Cumbre Calchaquí hasta la Sierra de Santa Bárbara, Eoceno inferior- Mioceno medio, provincia de Salta, Argentina. *Acta Geológica Hispánica* 34: 167-184.
- Galli, C.I., Ramirez, A., Barrientos, C., Reynolds, J., Viramonte, J.G. y Idleman, B. 2008. Estudio de proveniencia de los depósitos del Grupo Payogastilla (Mioceno Medio-Superior) aflorantes en el río Calchaquí, provincia de Salta, Argentina. 17° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 353-354, Jujuy.
- Galli, C.I., Ramirez, A., Reynolds, J., Viramonte, J.G., Idleman, B., y Barrientos, C. 2011. Proveniencia de los depósitos del Grupo Payogastilla (Cenozoico), río Calchaquí, provincia de Salta, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 263-278.
- Grier, M. y Dallmeyer, R.D. 1990. Age of the Payogastilla Group: Implications for foreland basin development. *NW Argentina. Journal of South American Earth Sciences* 3:269-278.
- Grier, M.E., Salfity, J.A. y Allmendinger, R.W. 1991. Andean reactivation of the Cretaceous Salta rift, northwestern Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 4: 351-372.
- Guzmán, S. y Petrinovic, I. 2010. The Luingo caldera: The south-easternmost collapse caldera in the Altiplano-Puna plateau, NW Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 194:174-188.
- Herrera, C.M. 2013. Los Dasipódidos (Mammalia, Xenarthra) del Paleógeno del noroeste argentino. Aspectos Evolutivos y Bioestratigráficos. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Tucumán (inédita), 195 p., Tucumán.
- Hongn, F.D. y Seggiaro, R. 2001. Hoja Geologica 2566-III, Cachi. Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina, Boletín 248: 87 p., Buenos Aires.
- Hongn, F.D., del Papa, C.E., Powell, J., Petrinovic, I., Mon, R. y Deraco, V. 2007. Middle Eocene deformation and sedimentation in the Puna-Eastern Cordillera transition (23°-26°S): Control by preexisting heterogeneities on the pattern of initial Andean shortening. *Geology* 35: 271-274.
- Hongn, F., Mon, R., Petrinovic, I., del Papa, C.E., y Powell, J. 2010. Inversión y reactivación tectónicas cretácico-cenozoicas en el noroeste argentino: influencia de las heterogeneidades del basamento neoproterozoico-paleozoico inferior. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66: 38-53.
- Hongn, F., del Papa, C., Powell, J., Payrola, P., Petrinovic, I. y Mon, R. 2011. Fragmented Paleogene foreland basin in the Valles Calchaquíes, NW Argentina. En: Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. (eds.) *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*, SCS Publisher: 189-209, Salta.
- Horton, B. 2005. Revised deformation history of the central Andes: Inferences from Cenozoic foredeep and intermontane basins of the Eastern Cordillera, Bolivia. *Tectonics* 24: TC3011.
- Insel, N., Grove, M., Haschke, M., Barnes, J.B., Schmitt, A.K. y Strecker, M.R. 2012. Paleozoic to early Cenozoic cooling and exhumation of basement underlying the eastern Puna Plateau margin prior to plateau growth. *Tectonics* 31: TC6006.
- Jordan, T.E. y Alonso, R.N. 1987. Cenozoic stratigraphy and basin tectonics of the Andes Mountains, 20–28 south latitude. *American Association Petroleum Geologist Bulletin* 71: 49-64.
- Jordan, T., Isacks, B.L., Allmendinger R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A. y Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of the subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin* 94: 341-361.
- Jaillard, E., Berrones, G., Ordóñez, M., Bengtson, P., Benitez, S., Jiménez, N. y Zambrano, I. 1992. El Senoniano y el Paleógeno de la "Cuenca Célica-Lancones" (sur Ecuador-Norte Perú) datos preliminares e implicaciones tectónicas. En: Lorente, M.A. (ed.) *El Paleógeno de Sur América: libro de resúmenes*, 1-2.
- Kennan, L., Lamb, S. y Rundle, C. 1995. K-Ar dates from the Altiplano and Cordillera Oriental of Bolivia: Implications for Cenozoic stratigraphy and tectonics. *Journal of South American Earth Sciences* 8: 163-186.
- Kraemer, B., Adelman, D., Alten, M., Schnur, W., Erpenstein, K., Kiefer, E., van den Bogaard, P. y



- Górler, K. 1999. Incorporation of the Paleogene foreland into Neogene Puna Plateau: The Salar de Antofalla, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 12: 157-182.
- Lavenu, A. y Marocco, R. 1984. Continental sedimentation and tectonics in a fold belt related to a subduction zone—The Central Andes (Peru-Bolivia) during the Tertiary: Bulletin du centre de Recherche et d' Exploration-Production. Elf- Aquitaine 8: 57-70.
- Maksaev, J. 1979. Las fases tectónicas Incaica y Quechua en la Cordillera de los Andes del Norte Grande de Chile. 2º Congreso Geológico Chileno, Actas 1: 63-77, Arica.
- Maksaev, V. y Zentilli, M., 1999. Fission track thermochronology of the Domeyko Cordillera, northern Chile; implications for Andean tectonics and porphyry copper metallogenesis. *Exploration and Mining Geology* 8: 65-89.
- Marquillas, R.A., del Papa, C.E. y Sabino, I.F. 2005. Sedimentary aspects and paleoenvironmental evolution of a rift basin: Salta Group (Cretaceous-Paleogene), northwestern Argentina. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* 94: 94-113.
- Marrett, R., Allmendinger, R.W., Alonso, R. y Drake, R. 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 7: 179-207.
- McQuarrie, N. 2002. Initial plate geometry, shortening variations, and evolution of the Bolivian orocline. *Geology* 30: 867-870.
- McQuarrie, N., Horton, B., Zandt, G., Beck, S. y DeCelles, P. 2005. Lithospheric evolution of the Andean fold-thrust belt, Bolivia, and the origin of the central Andean Plateau. *Tectonophysics* 399: 15-37.
- Miall, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary facies, basin analysis, and Petroleum geology*. Springer Verlag, 582 p., Berlín.
- Mon, R. 1979. Esquema tectónico de los Andes del Norte Argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 35: 582-585.
- Mon, R. y Salfity, J.A. 1995. Tectonic evolution of the Andes of northern Argentina. En: Tankard, A.J., Suarez Soruco, R. y Welsink, H.J. (eds.) *Petroleum basins of South America*, American Association of Petroleum Geologists Memoir 62: 269-283, Tulsa.
- Monaldi, R., Salfity, J., Vitulli, N. y Ortiz, A. 1993. Estructuras de crecimiento episódico en el subsuelo de la laguna de Guayatayoc, Jujuy, Argentina. 12º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 55-64, Mendoza.
- Montero López, C., del Papa, C.E., Hongn, F.D., Strecker, M.R. y Aramayo, A.J. 2016. Synsedimentary broken-foreland tectonics during the Paleogene in the Andes of NW Argentina: new evidence from regional to centimetre-scale deformation features. *Basin Research*: 1-18. doi: 10.1111/bre.12112.
- Mortimer, E., Carrapa, B., Coutand, I., Schoenbohm, L., Sobel, E.R., Sosa Gomez, J. y Strecker, M.R. 2007. Fragmentation of a foreland basin in response to out-of-sequence basement uplifts and structural reactivation; El Cajon-Campo del Arenal Basin, NW Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 119: 637-653.
- Mpodozis, C., Arriagada, C., Basso, M., Roperch, P., Cobbold, P. y Reich, M. 2005. Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes. *Tectonophysics* 399: 125-154.
- Payrola Bosio, P.A., Powell, J., del Papa, C.E. y Hongn, F.D. 2009. Middle Eocene deformation-sedimentation in the Luracatao Valley: Tracking the initial Andean deformation in the Central Andes (NW Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 28: 142-154.
- Payrola Bosio, P.A., Hongn, F.D., del Papa, C.E., Aramayo, A. y Gorustovich, S. 2011. Inversión tectónica y variaciones estructurales a lo largo del valle del Tonco, Valles Calchaquíes noroeste de la Argentina. *Acta Geológica Lilloana* 23: 3-20.
- Pereyra, R., Becchio, R., Viramonte, J.G. y Pimentel, M. 2008. Minerales pesados en depósitos piroclásticos de caída distales, su uso en la correlación crono-estratigráfica entre la Formación Angastaco (Grupo Payogastilla) y Formación Anta (Grupo Orán). 17º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 227-228, Jujuy.
- Powell, J.E., Babot, M.J., García López, D.A., Deraco, M.V. y Herrera, C. 2011. Eocene vertebrates of Northwestern Argentina: annotated list. En: Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. (eds.) *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*, SCS Publisher: 349-370, Salta.
- Ramírez, C.F. y Gardeweg, M.C. 1982. Hoja Tonconao, Región de Antofagasta. Carta Geológica Chile 54 (1:250.000). Servicio Nacional de Geología y Minería 1-122 p.
- Reiners, P.W., Thomson, S.N., Vernon, A., Willett, S.D., Zattin, M., Einhorn, J., Gehrels, G., Quade, J., Pearson, D., Murray, K.E. y Cavazza, W. 2015. Low-temperature thermochronologic trends across the central Andes, 21 S-28 S. En: DeCelles, P.G., Ducea, M.N., Carrapa, B. y Kapp, P.A. (eds.) *Geodynamics of a Cordilleran Orogenic System: The Central Andes of Argentina and Northern Chile*. Geological Society of America Memoirs 212: 215-249. doi:10.1130/2015.1212(12).
- Reutter, K., Scheuber, E. y Helmcke, D. 1991. Structural evidence of orogen-parallel strike-slip displacements in the Cordillera of Northern Chile. *Geologische Rundschau* 80: 135-153.
- Riba, O. 1976. Syntectonic unconformities of the Alto Cardener. Spanish Pyrenees: A genetic interpretation. *Sedimentary Geology* 15: 213-233.
- Riba, O. 1992. Las discordancias sintectónicas como elementos de análisis de cuencas. En Arche, A. (ed.) *Sedimentología* 491-524, Madrid.
- Sabino, I.F. 2002. *Geología del Subgrupo Pirgua (Cretácico) del noroeste argentino*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Salta (inédita), 260 p., Salta.
- Salfity, J.A. 2004. *Geología regional del Valle Calchaquí, Argentina*. Anales Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 56: 133-150.
- Salfity, J.A., Monaldi, C.R., Marquillas, R.A. y Gonzáles, R.E. 1993. La inversión tectónica del Umbral de los Gallos en la cuenca del Grupo Salta durante la fase incaica. 12º Congreso Geológico Argentino y 2 Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 200-210, Mendoza.
- Seggiaro, R., Brandán, E.M. y Guzmán, S. 2006. Inversión Tectónica del Cerro Colorado, Departamento San Carlos, Provincia de Salta. 13º Reunión de Tectónica, resúmenes expandidos, San Luis.
- Sempere, T., Hérial, G., Oller, J. y Bonhomme, M.G., 1990. Late Oligocene—Early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia. *Geology* 18, 946-949.
- Sempere, T., Butler, R.F., Richards, D.R., Marshall, L.G., Sharp, W. y Swisher, C.C. 1997. Stratigraphy and chronology of Late Cretaceous—early Paleogene strata in Bolivia and northwest Argentina. *Geological Society of America Bulletin* 109: 709-727.
- Starck, D. y Vergani, G. 1996. Desarrollo tectosedimentario del Cenozoico en el sur de la provincia de Salta. 13º Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 433-452, Buenos Aires.
- Turner, J.C. y Mon, R. 1979. Cordillera Oriental. En: Turner, A.F. (ed.), *Geología Regional Argentina*. Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias 1: 57-94, Córdoba.
- Vergani, G. y Starck, D. 1989. Aspectos estructurales del Valle de Lerma al sur de la Ciudad de Salta: Boletín de Informaciones Petrolíferas 16: 2-9.

Recibido: 18 de noviembre, 2016

Aceptado: 22 de junio, 2017