



Cronología depositacional del miembro inferior de la Formación Toro Negro (Mioceno-Plioceno), antepaís andino, La Rioja

Patricia L. CICCIOI¹, Guillermo H. RE¹, William H. AMIDON², Sergio A. MARENSSI¹ y Carlos O. LIMARINO¹

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Ciencias Geológicas – Instituto de Geociencias Básicas, Ambientales y Aplicadas- Universidad de Buenos Aires - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

²Geology Department, Middlebury, VT, USA.

E-mail: ciccioi@gl.fcen.uba.ar, indio@gl.fcen.uba.ar, smarenssi@hotmail.com, limar@gl.fcen.uba.ar, wamidon@middlebury.edu

Editor: Luis Buatois

Recibido: 19 de julio de 2019

Aceptado: 3 de febrero de 2020

RESUMEN

Se presenta un análisis integrado de la magnetoestratigrafía reinterpretada, a partir de los datos de Re (2008), en función de nuevas edades U-Pb obtenidas por Amidon et al. (2016), con modelos de estratigrafía secuencial de los sistemas fluviales del miembro inferior de la Formación Toro Negro, quebrada de La Troya, Cuenca de Vinchina, La Rioja. Este estudio permite obtener patrones de tasas de sedimentación que ayudan a mejorar considerablemente los modelos tectosedimentarios de la cuenca. Las tasas de sedimentación obtenidas para la AF1 (0.45 mm/a en el modelo 1 y 0.3 mm/a a 0.52 mm/a en el modelo 2), reflejan las condiciones de confinamiento con bajo espacio de acomodación que caracterizaron al relleno inicial del paleovalle, formado como consecuencia del ascenso de la sierra de Famatina. El pasaje a valores más altos (1.75 mm/a en el modelo 1 y 0.85 mm/a en el modelo 2), señala, de manera clara, un aumento muy probablemente vinculado al ascenso del perfil de equilibrio de los sistemas fluviales que permitió acomodar una mayor cantidad de sedimento dentro del paleovalle (alto espacio de acomodación confinado). La disminución en la tasa de sedimentación al perderse por completo el confinamiento en la SDII (0.5 mm/a), indica la transición a una etapa de mayor espacio de acomodación lateral. La nueva información magnetoestratigráfica sugiere que el paleovalle se formó entre los ~ 9-8 Ma y el inicio de la sedimentación de la Formación Toro Negro en la quebrada de La Troya corresponde al cron C4n sin descartar que en posiciones más profundas del paleovalle sea más antigua. Finalmente, la superficie que separa los miembros inferior y superior de la Formación Toro Negro es aquí incluida en el cron C3n.

Palabras clave: Neógeno, Magnetoestratigrafía, Sistemas fluviales, Estratigrafía secuencial

ABSTRACT

Depositional chronology of the lower member of the Toro Negro Formation (Mio-Pliocene), Andean Foreland, La Rioja.

An integrated analysis of the reinterpreted magnetostratigraphy from Re (2008), based on new U-Pb ages from Amidon et al. (2016), with models of sequence stratigraphy of fluvial systems of the lower member of the Toro Negro Formation, quebrada de la Troya, Vinchina Basin, La Rioja is here presented. This study allows obtaining patterns of sedimentation rates that help to considerably improve the tectosedimentary models for the basin. The sedimentation rates obtained for FA1 (0.45 mm/y in model 1 and 0.3 mm/y to 0.52 mm/y in model 2), reflect conditions of confinement with low accommodation space that characterized the initial filling of the paleovalley, formed as a consequence of the uplift of Famatina range. The passage to higher values (1.75 mm/y in model 1 and 0.85 mm/y

in model 2) is most likely linked to the rise in the equilibrium profile of the rivers that were able to accommodate a greater amount of sediment within the paleovalley (confined high-accommodation space). The decrease in the sedimentation rate, due to the complete loss of confinement in SDII (0.5 mm/y), indicates the transition to a stage of greater lateral accommodation space. The new data suggests that the paleovalley was carved between ~ 9-8 Ma and the beginning of the sedimentation of the Toro Negro Formation at this locality corresponds to the chron C4n without discarding that in deeper positions of the paleovalley it may be older. Finally, the surface that separates the lower and upper members of the Toro Negro Formation is here included within the chron C3n.

Keywords: Neogene, Magnetostratigraphy, Fluvial systems, Sequence stratigraphy.

INTRODUCCIÓN

La Formación Toro Negro (Turner 1964) constituye la parte superior del relleno de la cuenca de Vinchina, uno de los depocentros cenozoicos más importantes del antepaís fracturado andino, ubicado en el noroeste de la provincia de La Rioja (Fig. 1). Esta área queda comprendida en la parte septentrional del segmento de subducción subhorizontal pampeano de los Andes Centrales (Ramos et al. 2002), motivo por el cual, el magmatismo no declinó tan fuertemente a partir del Mioceno tardío como lo hizo en ese segmento en general. En este sector se reconocen estructuras transpresivas vinculadas al accionar conjugado de los lineamientos de Desaguadero-Valle Fértil al S-SE y Tucumán al N-NE (Rossello et al. 1996) que jugaron un papel crítico en la evolución de la cuenca (Ciccioli et al. 2011, 2013, Japas et al. 2016) (Fig. 1a). El efecto de estos lineamientos, asociado con la tectónica compresional andina, favoreció el ascenso de bloques de basamento (Sierras Pampeanas Noroccidentales) dentro de un estilo deformacional de corrimientos de piel gruesa (thick-skinned) (Ciccioli et al. 2011, Japas et al. 2016).

La cuenca de Vinchina, que registra más de 10.000 metros de sedimentos continentales (principalmente las Formaciones Vinchina y Toro Negro), aflora conformando la sierra de Los Colorados, unidad orográfica que limita al norte y al sur con las sierra de Toro Negro y Umango-Espinal respectivamente y al este por el Sistema de Famatina (Fig. 1b). Estos bloques de basamento han condicionado la evolución de la cuenca a lo largo de todo el Cenozoico y, en particular, la sierra de Toro Negro ha jugado un rol importante en la configuración paleogeográfica durante el Mioceno superior correspondiente a la etapa de antepaís transpresional propuesta por Ciccioli et al. (2011, 2013).

Varias investigaciones se han llevado a cabo sobre la Formación Toro Negro referidas a su estratigrafía, sedimentología y paleontología (Turner 1964, Ramos 1970, De Iullis et al. 2004, Ciccioli et al. 2005, 2010a, Rodríguez Brizuela y Tauber 2006, Krapovickas et al. 2009, Ciccioli 2008, Martínez y Rodríguez-Brizuela 2011, Ciccioli y Marensi 2012, Ciccioli et al.

2014a, 2018, entre otros). Además, se han realizado estudios tectosedimentarios de la cuenca, paleomagnéticos y de correlación regional (Reynolds 1987, Tabbutt et al. 1989, Re y Vilas 1990, Re y Barredo 1993, Re y Rapalini 1997, Re 2008, Ciccioli et al. 2011, 2013, 2014b, 2018, Japas et al. 2016a, b, Collo et al. 2011, 2017, Stevens Goddard y Carrapa 2018a, b, entre otros).

Recientemente, Amidon et al. (2016) han presentado 8 dataciones radiométricas U-Pb en circones volcánicos a lo largo del perfil de la Formación Toro Negro en la quebrada de La Troya. Estas edades han permitido ajustar la edad de la formación al Mioceno tardío-Plioceno temprano para el miembro inferior, y al Plioceno hasta Pleistoceno temprano para el miembro superior. Cabe mencionarse que la edad pleistocena temprana corresponde a la parte más cuspidal de dicho miembro. Además, Amidon et al. (2016) calcularon tasas de sedimentación que van de 1.2 mm/a a 0.3 mm/a para el miembro inferior y 0.6 mm/a para el miembro superior.

En este trabajo se presenta la reinterpretación de la magnetoestratigrafía, realizada por Re (2008), para el miembro inferior de la Formación Toro Negro a partir de los nuevos datos radiométricos de Amidon et al. (2016). Además, se integra con la información estratigráfica, sedimentológica y composicional ya publicada (Ciccioli et al. 2010a, b, 2014a, Ciccioli y Marensi 2012) para analizar en detalle la estratigrafía secuencial de los sistemas fluviales propuesta por Ciccioli et al. (2010b). De esta manera, el análisis integrado permite establecer con mayor precisión las edades de las secuencias depositacionales, calcular tasas de sedimentación mínimas para dichas secuencias y así poder comprender mejor la evolución de la cuenca durante el Mioceno tardío-Plioceno.

LA FORMACION TORO NEGRO

La Formación Toro Negro (Turner 1964) fue dividida en dos miembros, inferior y superior (Ramos 1970). El miembro inferior se encuentra integrado principalmente por areniscas pardo-amarillentas, grises y verdosas con intercalaciones de

pelitas y abundantes brechas intraformacionales pelíticas, presentando varios niveles de tobas blancas, grises y verdosas. Este miembro se caracteriza por presentar variaciones, tanto litológicas como en el espesor, a lo largo de la sierra de Los Colorados (Ciccioli y Marenssi 2012). Por su parte, el miembro superior que se caracteriza por una mayor homogeneidad en su composición y en el espesor, se encuentra integrado principalmente por conglomerados con presencia de areniscas finas a limolitas de color rosado y escasos niveles tobáceos. Ciccioli et al. (2010b) dividieron la Formación Toro Negro en 3 secuencias depositacionales (SD). La SDI y SDII corresponden al miembro inferior y la SDIII al miembro superior (Fig. 2). La SDI comprende la parte basal de la unidad, y se encuentra mejor representada en el sector norte de la cuenca (quebrada de Los Pozuelos, Figs. 1b, 2), donde rellena un paleovalle labrado sobre la Formación Vinchina (Ciccioli 2008, Limarino et al. 2010). En la quebrada de La Troya esta secuencia depositacional presenta un contacto basal erosivo sobre la Formación Vinchina (piso del paleovalle) y se encuentra representada por dos asociaciones de facies (Figs. 2, 3a, b, Cuadro 1). La asociación de facies 1 (AF1), formada principalmente por brechas intraformacionales y areniscas, y escasas pelitas, corresponde a un sistema fluvial multicanalizado con canales arenosos amalgamados fuertemente incisos en depósitos finos de planicie de inundación (Fig. 3b, c). Cabe destacar que estos sistemas empiezan a preservar mayor porcentaje de depósitos de planicie de inundación ha-

Cuadro 1. Resumen de las facies sedimentarias (FA) reconocidas en cada Secuencia Depositacional (SD) del miembro inferior de la Formación Toro Negro.

SD	AF	Interpretación paleoambiental
SDI	AF1	Sistema fluvial multicanalizado con canales arenosos fuertemente incisos en depósitos finos de planicie de inundación.
	AF2	Sistema fluvial anastomosado efímero, con canales incisos arenosos asociados a planicies arenosas, dominadas por depósitos de desbordamientos.
SDII	AF3	Sistema fluvial entrelazado con canales gravo-arenosos de baja sinuosidad y espesas planicies areno-fangosas. Intercalaciones eólicas y abundantes niveles tobáceos. Paleocorrientes predominante N-S.
	AF4	Megaabanicos fluviales (sistemas fluviales distributivos) con canales gravo-arenosos someros inmersos en espesas planicies areno-fangosas. Paleocorrientes predominante N-S.
	AF5	Sistema lacustre somero (playa lake) con sedimentación clástica a mixta.

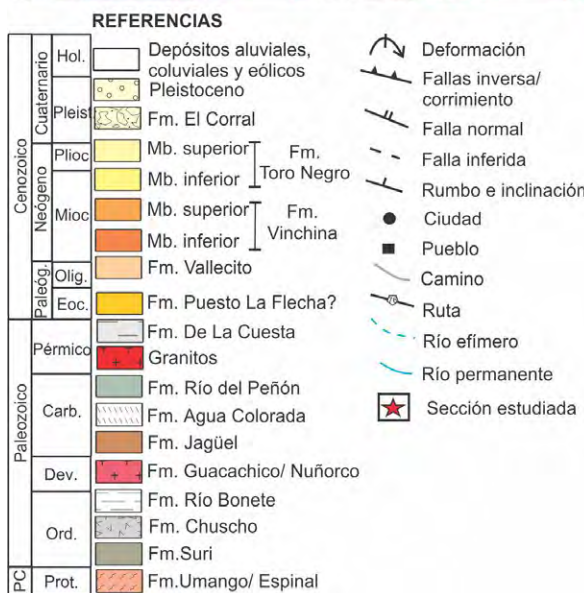
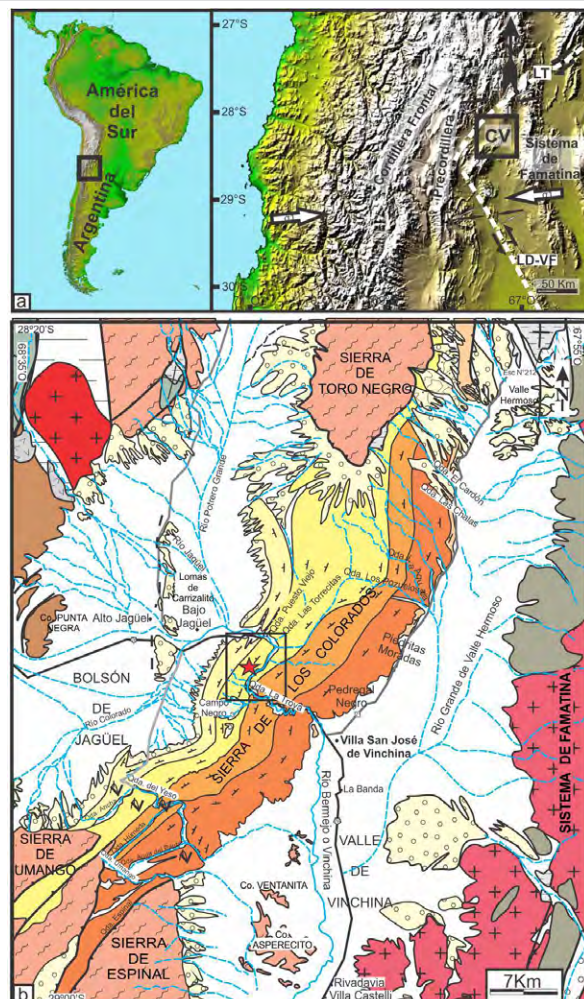


Figura 1. a) Mapa de ubicación del área de estudio. CV: Cuenca de Vinchina, CLT: Cuenca de La Troya, LD-VF: lineamiento Desaguadero-Valle Fértil y LT: lineamiento de Tucumán. 1. Sierra de Toro Negro, 2. Sierra de Umango-Espinal; 3. Sierra de Maz, 4. Cerros de Cumichangos; b) Mapa geológico de la Sierra de Los Colorados donde se indica la sección estudiada a lo largo de la quebrada de La Troya.

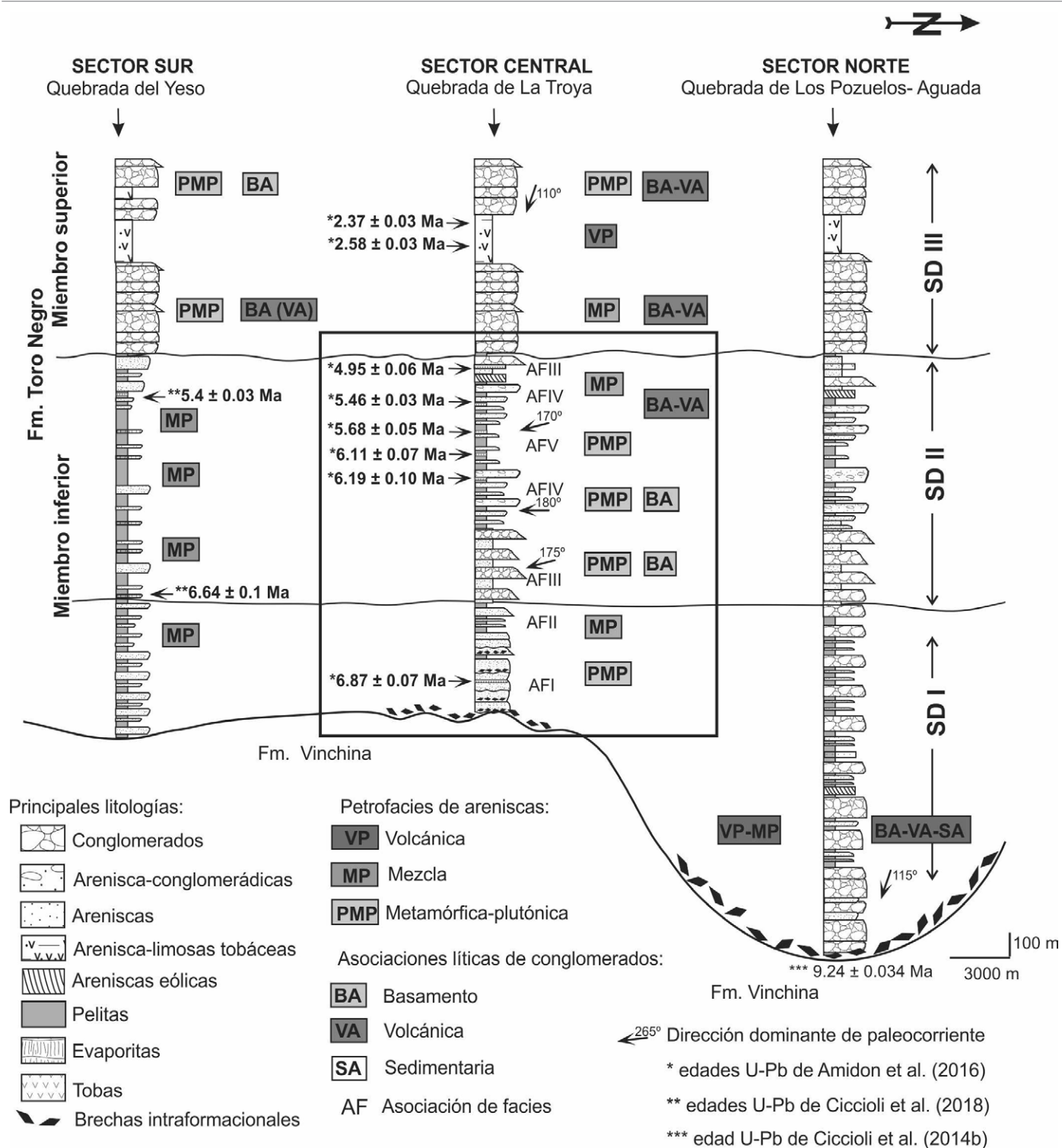


Figura 2. Secciones esquemáticas de la Formación Toro Negro en los distintos sectores de la cuenca, indicando las secuencias depositacionales (SD), las petrofacies y edades U-Pb. El recuadro indica el perfil estudiado en este trabajo. Modificado de Ciccioli et al. (2014a).

cia el tope de la asociación (Fig. 3c). Por su parte, la AF2 se encuentra integrada por areniscas medianas pardas y verdosas y, en menor proporción, por pelitas rojas, con escasa participación de areniscas guijarrosas, conglomerados y brechas intraformacionales. Estas rocas fueron depositadas en

un sistema fluvial anastomosado efímero, con canales incisos arenosos asociados a planicies arenosas, dominadas por depósitos de desbordamientos que, en ocasiones, desarrollan ciclos grano-estrato crecientes (Fig. 3d). La composición de la SDI indica aporte de basamento cristalino a mezcla (PMP-

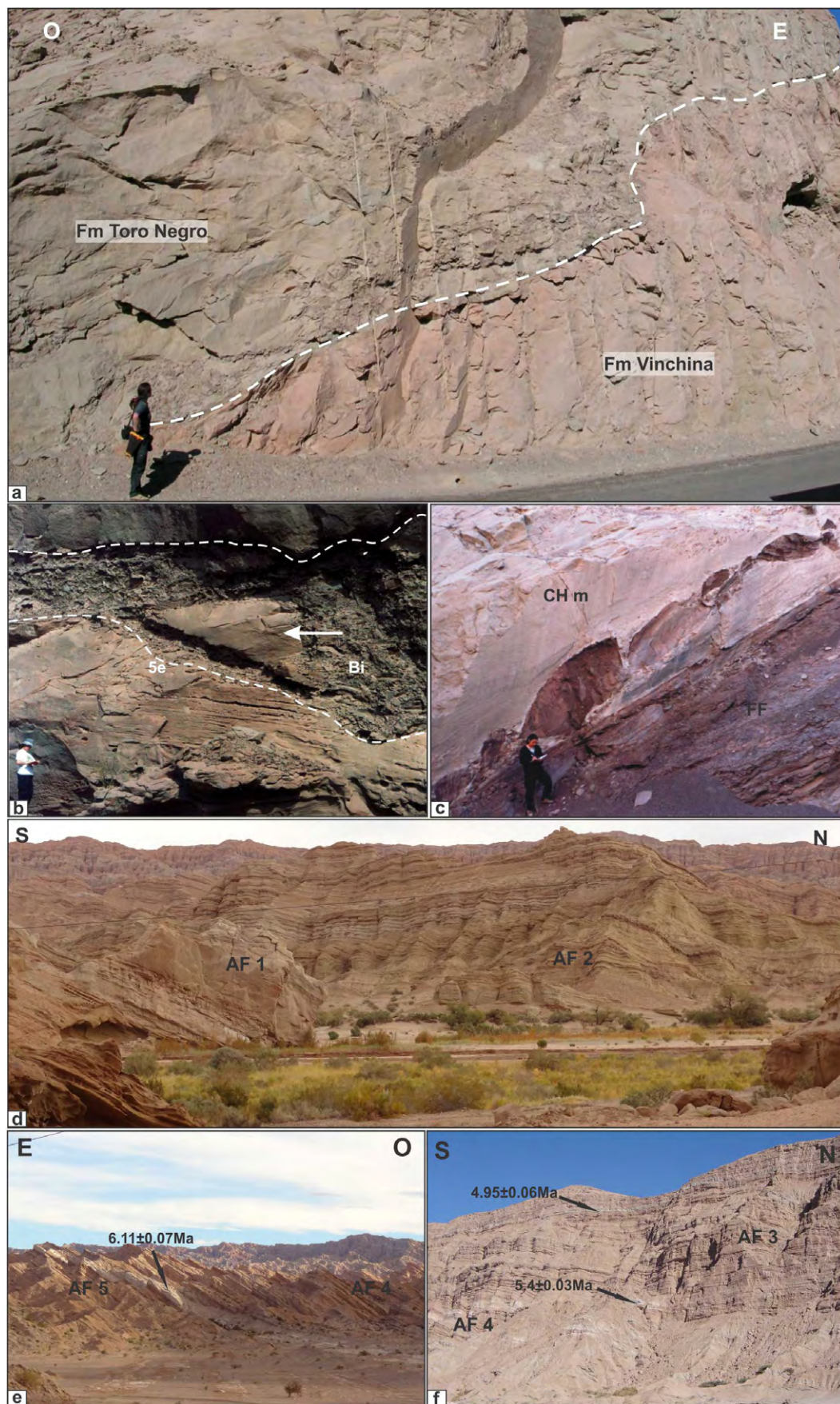


Figura 3. a) Contacto basal de la Formación Toro Negro cubriendo en forma erosiva a la Formación Vinchina; b) Niveles de brechas intraformacionales (Bi) asociados a depósitos de barranca (rezago) de los sistemas fluviales incisos de la AF1 limitados por una superficie de 5 orden erosiva (5e); c) Canales arenosos (CHm) y planicies finas (FF) de la AF1 mostrando bloques de intraclastos pelíticos en la base de los canales incisos; d) Vista de las asociaciones de facies (AF) 1 y 2 que conforman la SDI; e) Depósitos finos de la AF5 (*playa lake*) mostrando una de las edades U-Pb obtenidas por Amidon et al. (2016); f) Aspecto de las AF4 y 3 recurrentes en la parte alta del miembro inferior con las edades U-Pb de Amidon et al. (2016).

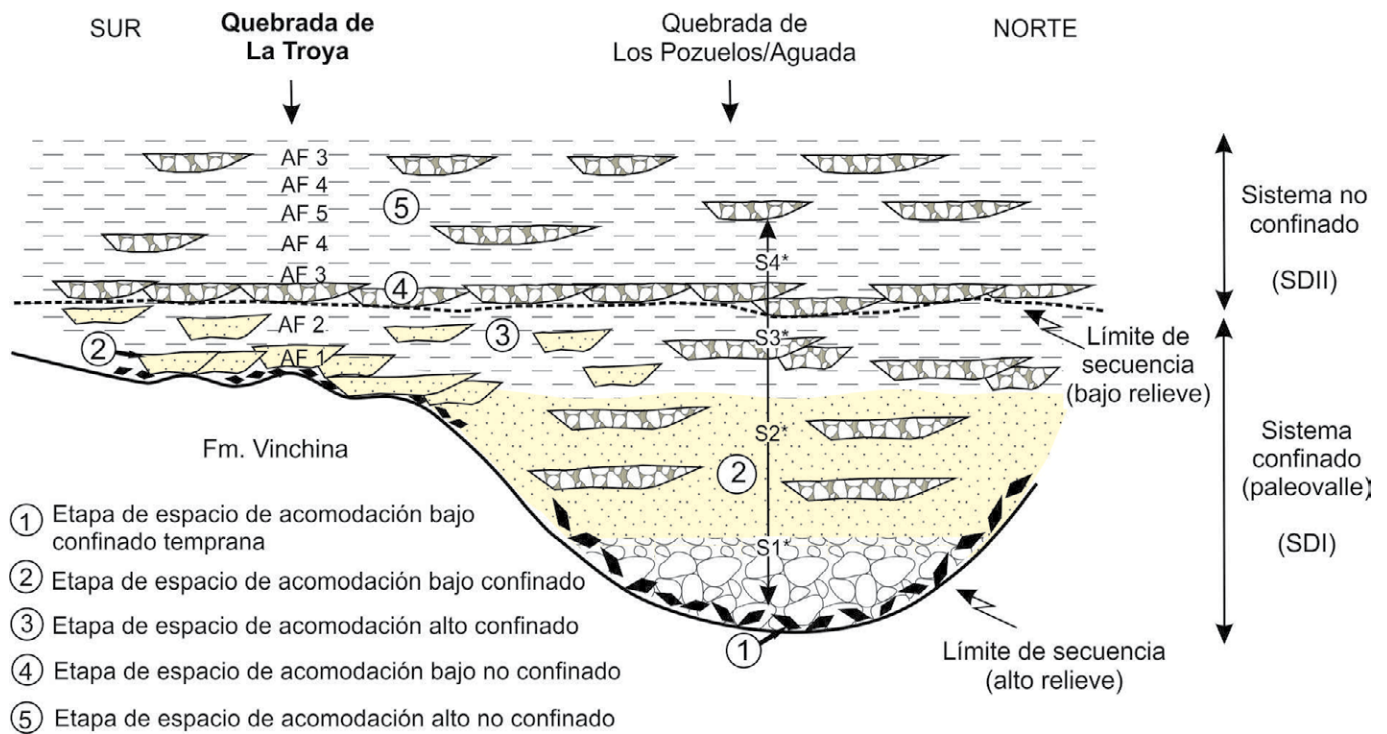


Figura 4. Diagrama esquemático mostrando los diferentes estilos arquitecturales de los sistemas fluviales reconocidos en el miembro inferior de la Formación Toro Negro: sistemas confinado (paleovalle) y no confinado (sin escala), y las distintas etapas reconocidas. Se indican la distribución de las asociaciones de facies (AF), las secuencias depositacionales (SD) y su correlación con las secciones (S) de Limarino et al. (2010).

MP, petrofacies metamórfica-plutónica a mezcla, Ciccioli et al. 2014) (Fig. 2).

La SDII está integrada por 3 asociaciones de facies, dos de ellas recurrentes a lo largo del perfil de la quebrada de La Troya (Fig. 2, Cuadro 1). La AF3, compuesta por conglomerados y areniscas gruesas con proporciones variables de areniscas finas y pelitas, corresponde a sistemas fluviales entrelazados con canales gravo-arenosos de baja sinuosidad, asociadas a espesas planicies areno-fangosas con intercalaciones eólicas y abundantes niveles tobáceos. Esta unidad pasa transicionalmente a la AF4 integrada por areniscas medianas a finas y pelitas de color pardo rojizo y, en menor medida, por conglomerados y areniscas guijarrosas grises que desarrollan ciclos grano-estrato crecientes de hasta 15 m (Fig. 3e, f). Esta unidad es interpretada como megaabanicos fluviales (o sistemas fluviales distributivos) con canales gravo-arenosos someros inmersos en espesas planicies areno-fangosas (Ciccioli y Marensi 2012). Ambas asociaciones de facies presentan paleocorrientes predominantemente Norte-Sur (180-175° en promedio). Transicionalmente, se reconoce la AF5, dominada por pelitas y areniscas finas rojas, correspondiente a depósitos de un sistema lacustre somero (*playa lake*) con sedimentación clástica a mixta (Fig. 3e). La composición de

las AF3, AF4 y AF5 (SDII) indica un claro aporte de basamento cristalino (PMP, petrofacies metamórfica-plutónica para las areniscas y basamento para los conglomerados) salvo en la segunda recurrencia de la AF3 correspondiente al tope de la SDII donde se reconoce un aporte de mezcla dado el aumento de material volcánico (Ciccioli et al. 2014a; Fig. 2).

ESTRATIGRAFÍA SECUENCIAL

Las secuencias depositacionales de la Formación Toro Negro, definidas por Ciccioli et al. (2010b), fueron analizadas teniendo en cuenta dos conceptos principales de la estratigrafía secuencial de las sucesiones fluviales: 1. Espacio de acomodación y 2. Grado de confinamiento de los sistemas depositacionales (Dalrymple et al. 1998, Catuneanu et al. 2009). De esta manera, Ciccioli et al. (2010b) reconocieron cinco etapas principales de espacio de acomodación: 1. Etapa de espacio de acomodación bajo confinado temprana, 2. Etapa de espacio de acomodación bajo confinado, 3. Etapa de espacio de acomodación alto confinado, 4. Etapa de espacio de acomodación bajo no confinado, 5. Etapa de espacio de acomodación alto no confinado (Fig. 4).

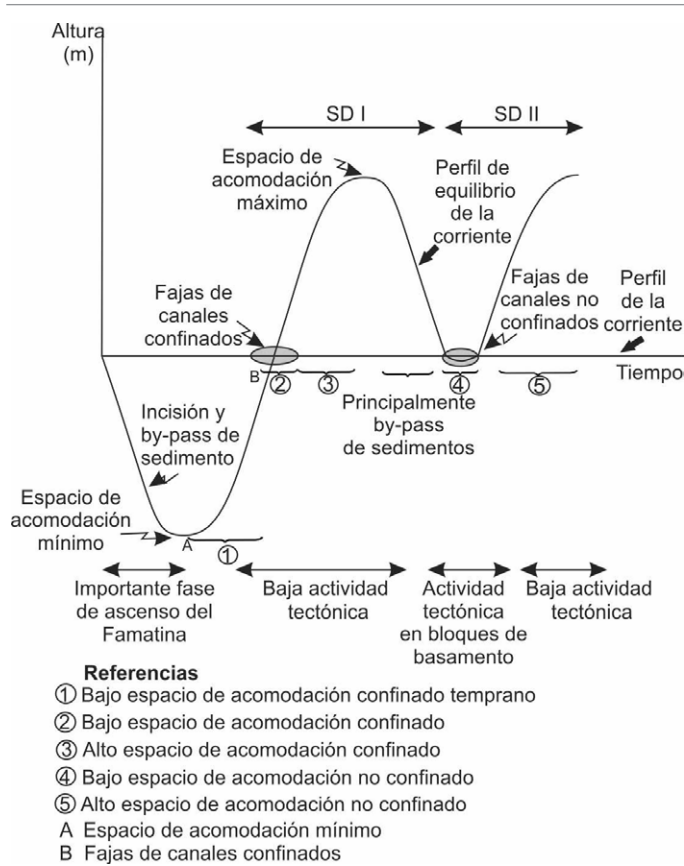


Figura 5. Perfil de la corriente y perfil de equilibrio de la corriente mostrando las dos situaciones reconocidas en las dos secuencias depositacionales (SD) del miembro inferior de la Formación Toro Negro.

La SDI corresponde a la base de la Formación Toro Negro y presenta mayor desarrollo en el sector norte de la cuenca (quebrada de Los Pozuelos-Aguada, Fig. 1b, 2) donde se reconoce un paleovalle labrado sobre la infrayacente Formación Vinchina (Ciccioli 2008, Limarino et al. 2010, Ciccioli y Marensi 2012, Ciccioli et al. 2011, 2014a). En la parte central de la cuenca (quebrada de La Troya) esta secuencia presenta menor desarrollo y corresponde a las facies marginales del relleno del paleovalle. La creación de este paleovalle ha sido analizada en detalle por Limarino et al. (2010) quienes lo han interpretado como producto de un importante pulso de ascenso del Famatina Occidental (Fig. 1b). Este ascenso habría generado una importante subsidencia frente al recientemente elevado Famatina y un incremento menor de la misma en toda la región (Limarino et al. 2010). Así, en el sector más distal al frente de ascenso tectónico (actual sierra de Los Colorados), los sistemas fluviales tuvieron que incidir para alcanzar las nuevas condiciones de equilibrio y crearon la superficie erosiva de gran escala que es reconocida como la base de la Formación Toro Negro (Limarino et al. 2010). De esta manera, la formación del paleovalle correspondería a la etapa

de incisión y *bypass* de sedimento producto de una brusca caída en el nivel de base de los sistemas fluviales generado por un importante pulso de ascenso de la sierra de Famatina al este del área de estudio (Fig. 5). Esta superficie erosiva es cubierta por megabrechas intraformacionales y depósitos de barranca durante la etapa de espacio de acomodación bajo confinado temprana (1 en Fig. 5). En la quebrada de La Troya se registran las facies marginales del relleno de este paleovalle representado en la SDI (S3 de Limarino et al. 2010, Fig. 4). En este sector se reconocen, por un lado, sistemas fluviales multicanalizados con canales arenosos amalgamados fuerte-

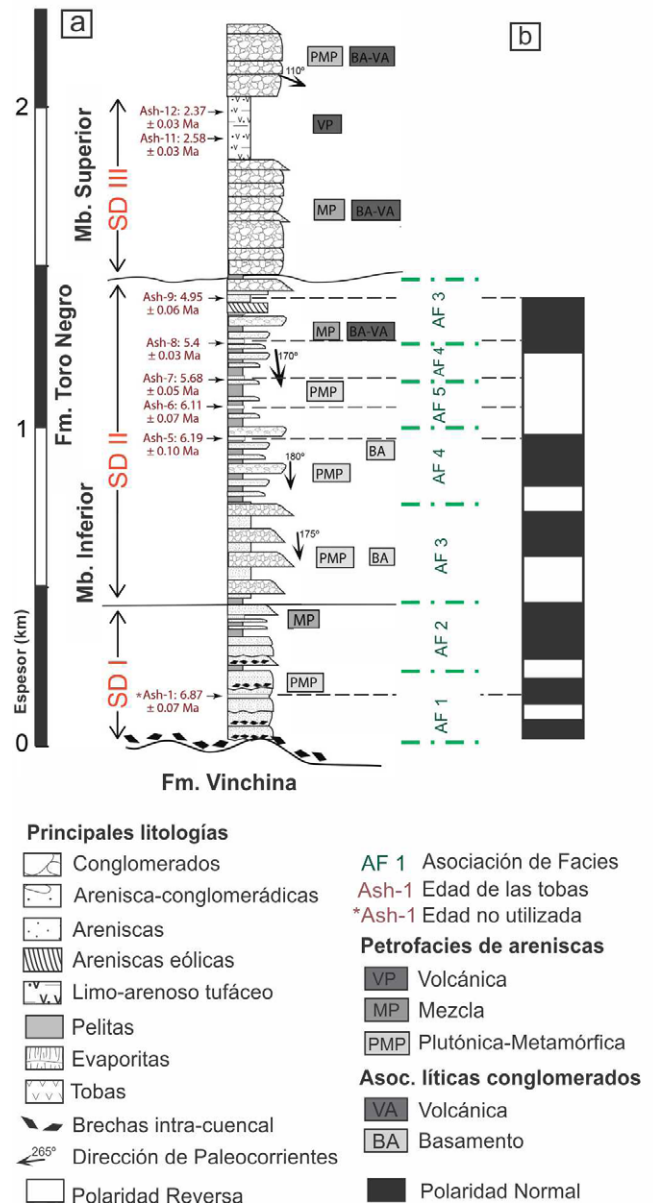


Figura 6. a) Columna estratigráfica de la Formación Toro Negro en la quebrada de La Troya, indicando las secuencias depositacionales (SD), las asociaciones de facies (AF), y las edades U-Pb. Modificada de Amidon et al. (2016); b) La columna magnetoestratigráfica local obtenida por Re (2008).

mente incisos (AF1) que cubren a la superficie erosiva basal y que corresponderían a la etapa de bajo espacio de acomodación confinado en las márgenes del paleovalle (2 en Fig. 5).

La SDII presenta una superficie erosiva de bajo relieve sobre la que se depositan los sistemas fluviales gravo-arenosos con espesas planicies areno-fangosas (AF3 y AF4) correspondientes a megaabanicos fluviales o sistemas fluviales distributivos con dirección principal de paleocorriente NNO-SSE que drenan hacia un *playa lake* (AF5) mejor desarrollado en el sur de la cuenca (quebrada del Yeso, ver Ciccioli y Marensi 2012, Ciccioli et al. 2018). Esta secuencia correspondería a condiciones de alto espacio de acomodación no confinado en el modelo estratigráfico (5 en Fig. 5).

METODOLOGÍA

La magnetoestratigrafía del miembro inferior de la Formación Toro Negro, que fuera obtenida por Re (2008), fue reinterpretada en función de 5 de las 8 edades U-Pb obtenidas por Amidon et al. (2016) para toda la Formación Toro Negro a lo largo de la quebrada de la Troya (Fig. 6). La muestra Ash-1 de 6.8 ± 0.07 Ma de Amidon et al. (2016) fue descartada para el análisis magnetoestratigráfico dado que la misma corresponde a un bloque caído (Amidon et al. 2016) y, por lo tanto, no permite establecer su correcta ubicación estratigráfica.

El perfil magnetoestratigráfico obtenido por Re (2008) fue

realizado obteniendo muestras orientadas de 64 sitios del miembro inferior de la Formación Toro Negro, a razón de tres muestras de mano por sitio estratigráfico. Las muestras recolectadas fueron preferentemente pelitas, por ser ellas las que preservan mejor la información paleomagnética. Por estar constituido predominantemente por conglomerados, Re (2008) descartó el estudio paleomagnético del miembro superior de la Formación Toro Negro.

Las muestras fueron procesadas por Re (2008) utilizando un magnetómetro criogénico 2G en el Laboratorio de Paleomagnetismo “Daniel A. Valencio”, del Departamento de Ciencias Geológicas-IGEB (Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires), Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires-CO-NICET. Este magnetómetro tiene conectado un desmagnetizador estático 2G600 para realizar los lavados AF. Para los lavados térmicos se utilizaron un horno ASC de dos cámaras o un horno Schonstedt TSD-1.

CORRELACIÓN MAGNETOESTRATIGRÁFICA Y TASAS DE SEDIMENTACIÓN

En este trabajo se presenta la magnetoestratigrafía reinterpretada del miembro inferior de la Formación Toro Negro, que fuera obtenida por Re (2008), en el perfil de la quebrada

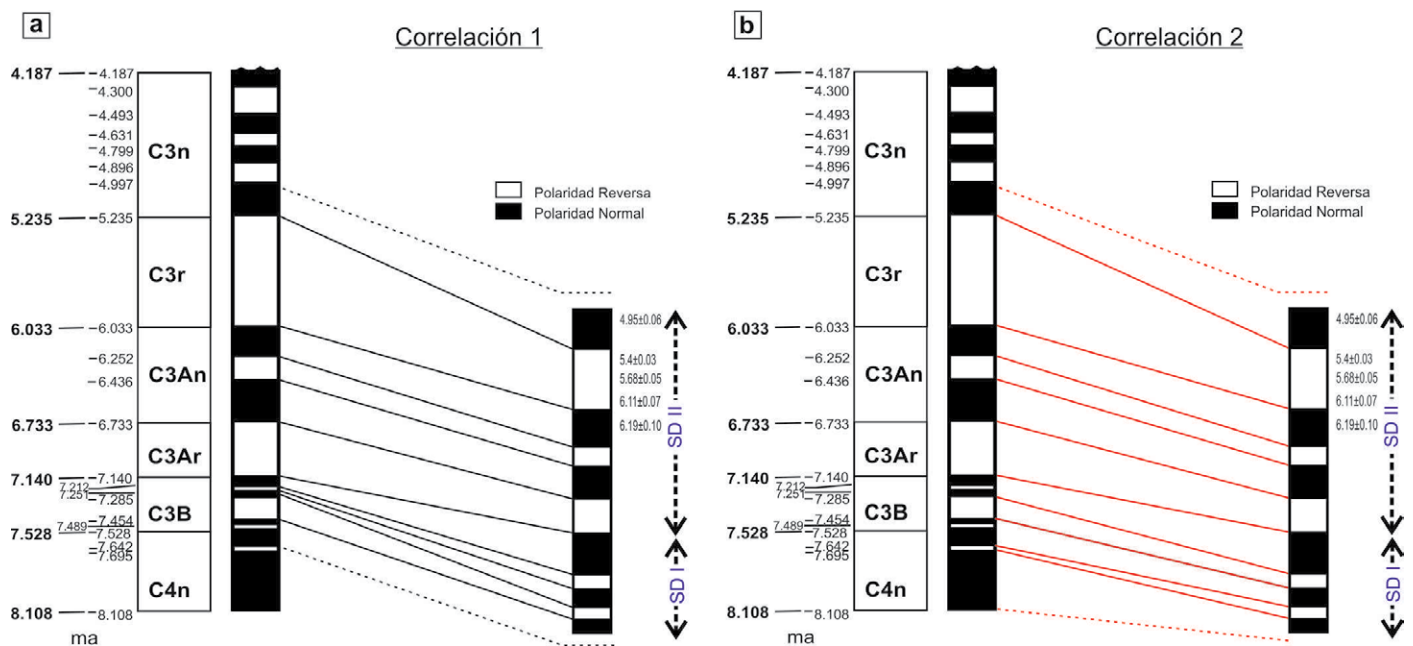


Figura 7. Las dos posibles correlaciones de la magnetoestratigrafía local obtenida por Re (2008) para el miembro inferior de la Formación Toro Negro con la escala patrón de reversiones del c.m.t. publicada por Gradstein et al. (2012). a) Correlación 1 “estricta”; b) Correlación 2 más “flexible”.

de La Troya, sierra de Los Colorados, provincia de La Rioja (Fig. 1b).

La magnetoestratigrafía obtenida se correlacionó con la escala cronológica de reversiones del campo magnético terrestre (cmt) presentada por Gradstein et al. (2012) (Figs. 7a y b). Para realizar dicha correlación se tienen distintas opciones. Por un lado, las distintas edades obtenidas por Amidon et al. (2016) y, por otro lado, existen discordancias intraformacionales, como fue explicado anteriormente, las cuales interrumpen la continuidad del registro depositacional (por ejemplo, el hiato en la base de la SDII), no existiendo forma de cuantificar la extensión temporal no representada por sedimentos. Por este motivo, al realizar la correlación con la escala geomagnética patrón, se consideró que la extensión de este *hiatus* es “despreciable” comparado con la escala de discriminación de la magnetoestratigrafía, de esta forma se considera a la secuencia como “continua” a lo largo del perfil de La Troya. De este modo, la correlación magnetoestratigráfica lograda brinda un rango de edad mínimo durante el cual se produjo la depositación; pues con la información geocronológica disponible no es posible establecer el rango de edad máximo para la depositación del total de la secuencia. Para

realizar la correlación se tomaron, como punto de control, las edades absolutas de Amidon et al. (2016) descartando la edad de la muestra Ash-1 por la incertidumbre en su exacta ubicación estratigráfica (Fig. 6). Al realizar el estudio se plantearon dos posibilidades de correlacionar el tramo inferior de la columna local con la columna patrón del cmt de Gradstein et al. (2012). Una opción es realizar una correlación “estricta” (correlación 1, Fig. 7a) y otra opción es realizar una correlación más “flexible” (correlación 2, Fig. 7b). En el primer caso se correlacionaron todos los intervalos de polaridad, excepto el intervalo reverso de la base del cron C3B (Fig. 7a); y en el segundo caso no se correlacionaron los intervalos reversos cercanos al techo y a la base del cron C3B (Fig. 7b). Estas opciones surgen ante la posibilidad que estos intervalos, debido a su corta duración temporal, no hayan sido determinados en la columna magnetoestratigráfica local debido a no haberse obtenido muestras de estos intervalos, o que los mismos no estuvieran registrados en la columna sedimentaria debido a no sedimentación o a erosión.

A partir de la correlación 1 (Fig. 7a) se determinó que la sección aflorante del miembro inferior de la Formación Toro Negro se habría depositado entre los ~ 7.642 Ma y los ~ 4.997

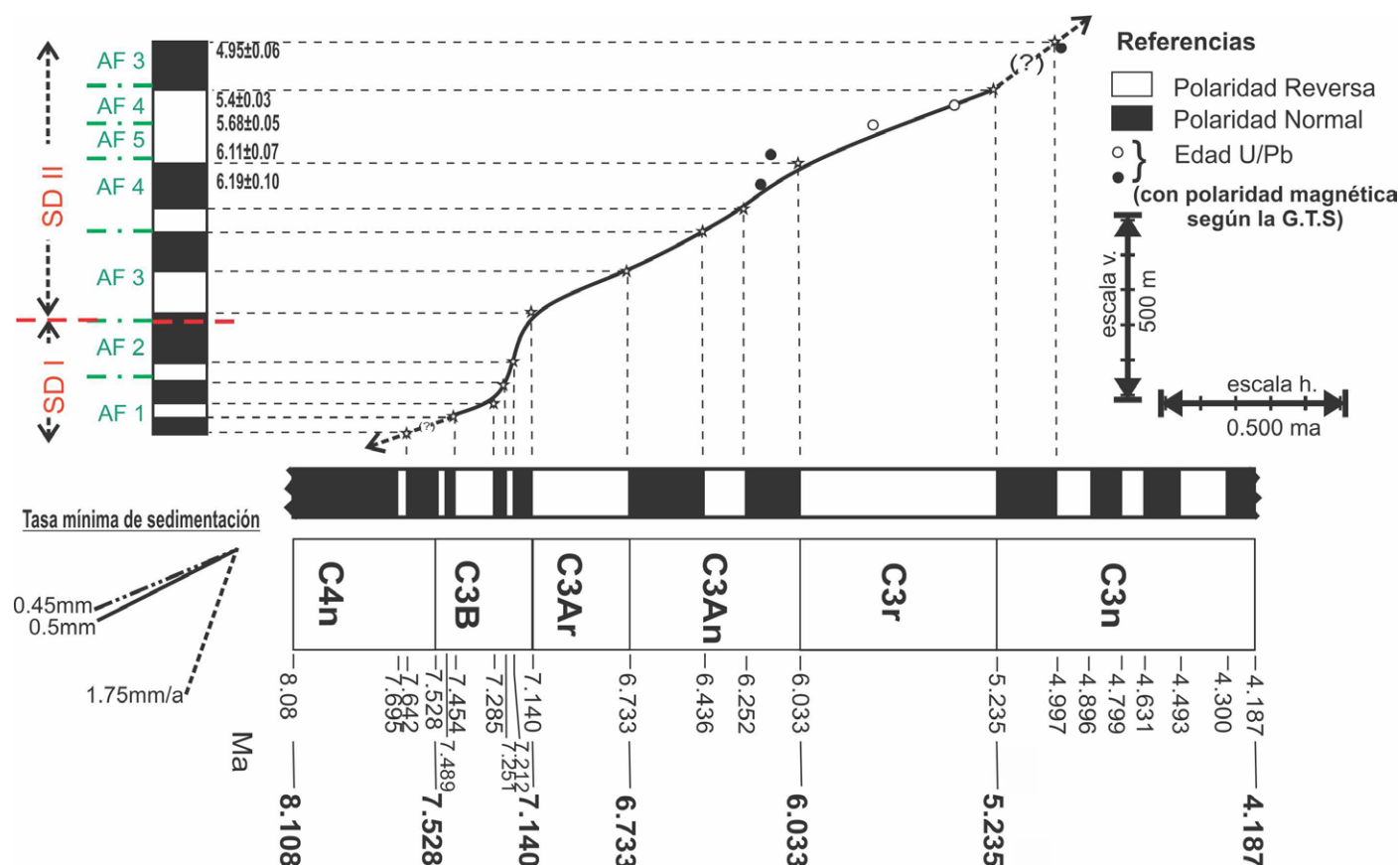


Figura 8. Valores de la variación en las tasas de sedimentación estimadas, para el miembro inferior de la Formación Toro Negro, a partir de la correlación 1 mostrada en la figura 7.

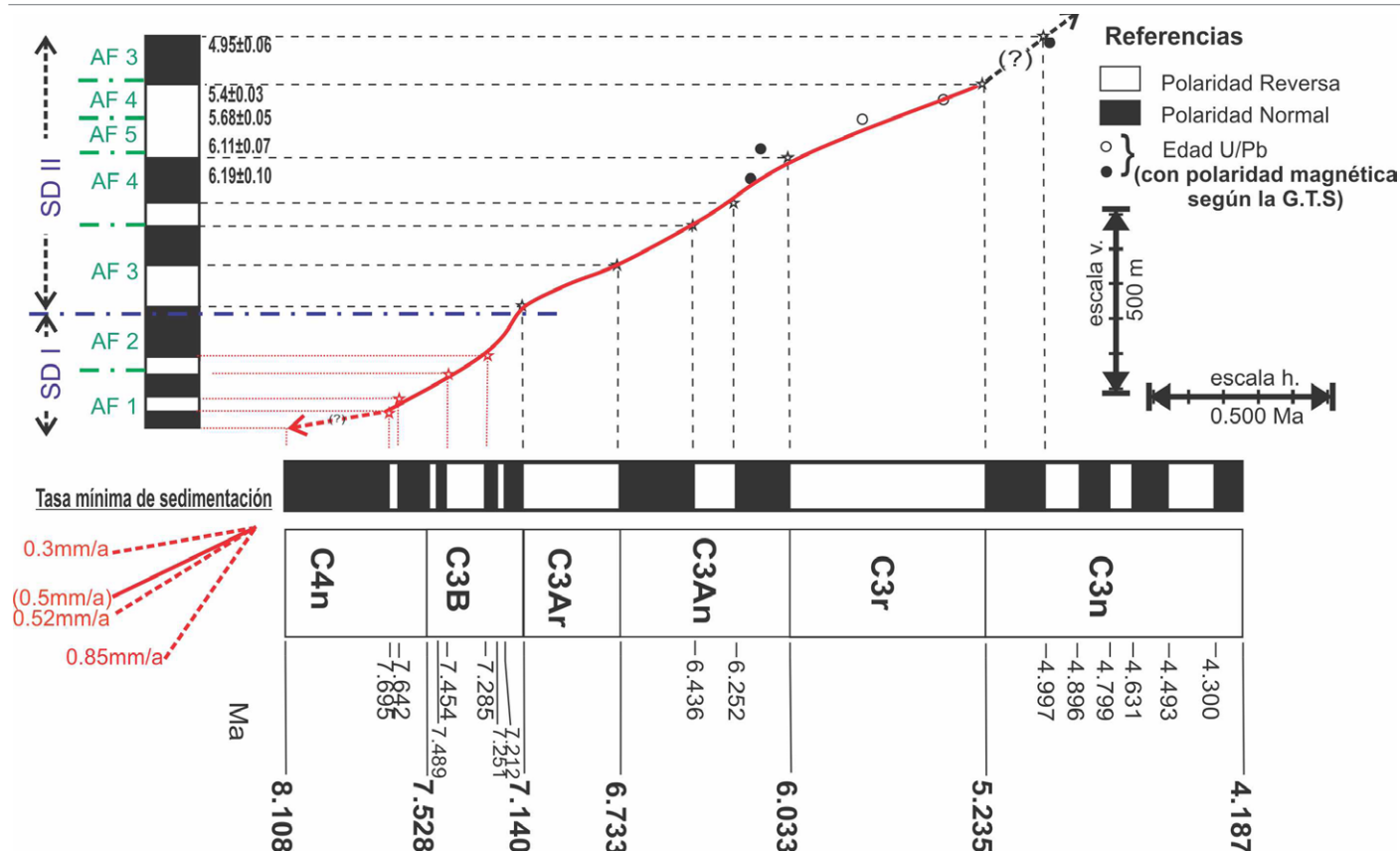


Figura 9. Valores de la variación en las tasas de sedimentación estimadas, para el miembro inferior de la Formación Toro Negro, a partir de la correlación 2 mostrada en la figura 7. En rojo se indican los cambios observados respecto a lo mostrado en la figura 8.

Ma, aproximadamente. Esto permite establecer que la sedimentación de la DSI se habría depositado entre los ~ 7.642 Ma y los ~ 7.140 Ma aproximadamente, es decir durante los cronos C4n y C3B. A partir de los ~ 7.140 Ma comienza la deposición de la DSII que continuó hasta los ~ 4.95 Ma dentro de los cronos C3Ar, C3An, C3r y la parte baja del C3n.

El segundo modelo de correlación (Fig. 7b) sugiere que la sección aflorante del miembro inferior de la Formación Toro Negro se habría depositado entre ~ 8.108 y los ~ 4.997 Ma. Con lo cual la DSI se habría depositado entre los ~ 8.108 Ma y los ~ 7.140 Ma (cronos C4n y C3B). A partir del inicio del cron C3Ar (~ 7.140 Ma) comienza la sedimentación de la DSII que continuó hasta los ~ 4.896 Ma, dentro de los cronos C3Ar, C3An, C3r y la parte baja del C3n.

Ambos modelos son consistentes en sugerir que los conglomerados que integran la DS III (miembro superior de la Formación Toro Negro) comenzaron a depositarse probablemente después de los ~ 4.95 Ma, finalizando su deposición en el Pleistoceno temprano (Ramos 1970, Amidon et al. 2016).

Tomando como base las correlaciones cruzadas realizadas (Figs. 8 y 9), se determinaron en forma gráfica las va-

riaciones en la tasa de sedimentación del miembro inferior de la Formación Toro Negro. Es necesario aclarar que estos valores de velocidad de sedimentación son mínimos ya que se consideró a las unidades compactadas. Para el caso de la correlación 1 la tasa de sedimentación presenta tres valores principales (Fig. 8). El primer tramo, con tasa de sedimentación de 0.45 mm/a, entre los ~ 7.642 Ma y los ~ 7.285 Ma aproximadamente, se corresponde con los depósitos basales de la AF1 de la SDI. A partir de los ~ 7.285 Ma se produce un fuerte incremento en la tasa de sedimentación, la cual alcanza los 1.75 mm/a en el intervalo entre los ~ 7.285 Ma y los ~ 7.140 Ma aproximadamente, y se corresponde con la deposición del tope de la AF1 y la AF2 de la SDI. A partir de este momento, ~ 7.140 Ma, comienza la sedimentación de la SDII, y el valor de la tasa de sedimentación se mantiene relativamente constante, tomando un valor cercano a los 0.5 mm/a, hasta el momento en que se inicia la deposición del miembro superior de la Formación Toro Negro (SDIII) después de los ~ 4.9 Ma.

Para el caso de la correlación 2 (Fig. 9) la tasa de sedimentación estimada presenta también tres valores principales. El primer tramo, con tasa de sedimentación de 0.3 mm/a,

entre los ~ 8.108 y los ~ 7.695 Ma aproximadamente, luego se incrementa hasta alcanzar los 0.52 mm/a hasta los ~ 7.285 Ma. A partir de los ~ 7.285 Ma se produce un aumento en la tasa de sedimentación, la cual alcanza los 0.85 mm/a en el intervalo entre los ~ 7.285 y los ~ 7.140 Ma aproximadamente. En este caso no se observa un cambio significativo en la tasa de sedimentación al pasar de la AF1 a la AF2 dentro de la SDI. A partir de este momento, ~ 7.140 Ma, ambas correlaciones son iguales por lo cual los valores de tasa de sedimentación son los indicados para la correlación 1.

INTEGRACIÓN DE LOS DATOS Y DISCUSIÓN

La integración de la magnetoestratigrafía reinterpretada con los datos ya existentes sobre la estratigrafía, sedimentología y procedencia de la Formación Toro Negro permiten mejorar el análisis estratigráfico y genético de los sistemas fluviales. Por un lado, dicha integración establece con mayor precisión el rango de edades para el miembro inferior de la Formación Toro Negro y de sus secuencias depositacionales. Además, permite acotar el rango de edades para el desarrollo del paleovalle y la significativa superficie de incisión de la base de la unidad producida por una importante fase de ascenso del Famatina Occidental (Limarino et al. 2010). De esta manera, esta superficie de incisión se habría desarrollado aproximadamente entre los ~ 9 y 8 Ma teniendo en cuenta tanto la edad U-Pb de 9.24 ± 0.034 Ma en el techo de la Formación Vinchina en el sector norte de la cuenca (Ciccioli et al. 2014b), las edades U-Pb de la Formación Toro Negro en la quebrada de La Troya (Amidon et al. 2016) y la magnetoestratigrafía reinterpretada en este trabajo (Figs. 2, 7). A su vez, el miembro inferior de la Formación Toro Negro, en la quebrada de La Troya, se habría depositado desde el cron C4n hasta la parte más baja del cron C3n (Fig. 7). Sin embargo, probablemente en el sector norte (quebrada de Los Pozuelos-Aguada) donde se desarrolló el paleovalle, el inicio de la sedimentación del miembro inferior sea más antiguo y alcance la parte más baja del cron C4n y quizás la parte alta del cron C4r de acuerdo con la edad U-Pb del techo de la Formación Vinchina en ese sector de la cuenca (Ciccioli et al. 2014b).

Asimismo, la SDI, en la quebrada de La Troya, se desarrollaría entre los ~ 8.1-7.64 Ma y ~ 7.14 Ma (cronos C4n y C3B) mientras que la SDII entre los ~ 7.14 Ma y ~ 4.9 Ma (cronos C3Ar, C3An, C3r y la parte baja del C3n) (Fig. 7).

Por otro lado, la integración de los datos nos permite correlacionar las distintas etapas de espacio de acomodación

reconocidas dentro de las secuencias depositacionales por Ciccioli et al. (2010b) con las tasas de sedimentación obtenidas para dichos intervalos estratigráficos en la quebrada de La Troya. Como se observa, el miembro inferior de la Formación Toro Negro presenta importantes variaciones en la tasa de sedimentación. Esta tasa varía desde 0.45 mm/a a 1.75 mm/a y finalmente 0.5 mm/a (según la correlación 1, Fig. 8); o desde 0.3 mm/a a 0.52 mm/a, luego a 0.85 mm/a y finalmente 0.5 mm/a (según la correlación 2, Fig. 9) hasta los ~ 4.95 Ma, momento en que se inicia la depositación el miembro superior de la Formación Toro Negro (SDIII).

En la quebrada de La Troya, la SDI, que registra las facies marginales del relleno del paleovalle, se inicia con sistemas fluviales multicanalizados con canales arenosos amalgamados fuertemente incisos que cubren a la superficie erosiva basal (AF1), los cuales van incorporando mayor proporción de depósitos de planicie de inundación hacia el tope de esta. Así, la parte basal de la AF1 que correspondería a la etapa de bajo espacio de acomodación confinado en las márgenes del paleovalle (2 en Fig. 10), presenta una baja tasa de sedimentación de 0.3 mm/a (según modelo de correlación 2) dado que interactúan en forma proporcional la erosión y la agradación de los sistemas fluviales (Fig. 10). La mayor proporción de depósitos de planicie de inundación hacia el tope de la AF1 evidencia el pasaje a condiciones de mayor espacio de acomodación todavía confinado en los márgenes del paleovalle (3 en Fig. 10) con una tasa de sedimentación de 0.45 mm/a (modelo de correlación 1) o 0.52 mm/a (modelo de correlación 2) (Fig. 10). En esta etapa la agradación de los sistemas fluviales empieza a dominar sobre la erosión. Por su parte, el importante incremento en la tasa de sedimentación a 1.75 mm/a (modelo de correlación 1) o a 0.85 mm/a (modelo de correlación 2) que se registra a partir de los ~ 7.285 Ma estaría relacionado a condiciones de máximo espacio de acomodación confinado representado en la AF2 (Fig. 10).

Posteriormente, a los ~ 7.140 Ma se inicia la SDII la cual presenta una superficie erosiva de bajo relieve sobre la que se depositan los sistemas fluviales gravo-arenosos con espesas planicies areno-fangosas (AF3 y AF4) correspondientes a megaabanicos fluviales o sistemas fluviales distributivos con dirección principal de paleocorriente N-S que drenan hacia un *playa lake* (AF5) mejor desarrollado en el sur de la cuenca (Ciccioli y Marensi 2012, Ciccioli et al. 2018). Esta etapa presenta un cambio en la tasa de sedimentación a 0.5 mm/a constante a lo largo de toda la secuencia para ambas correlaciones (Figs. 8, 9) y se correspondería a condiciones de alto espacio de acomodación no confinado en el modelo estratigráfico (5 en Fig. 10).

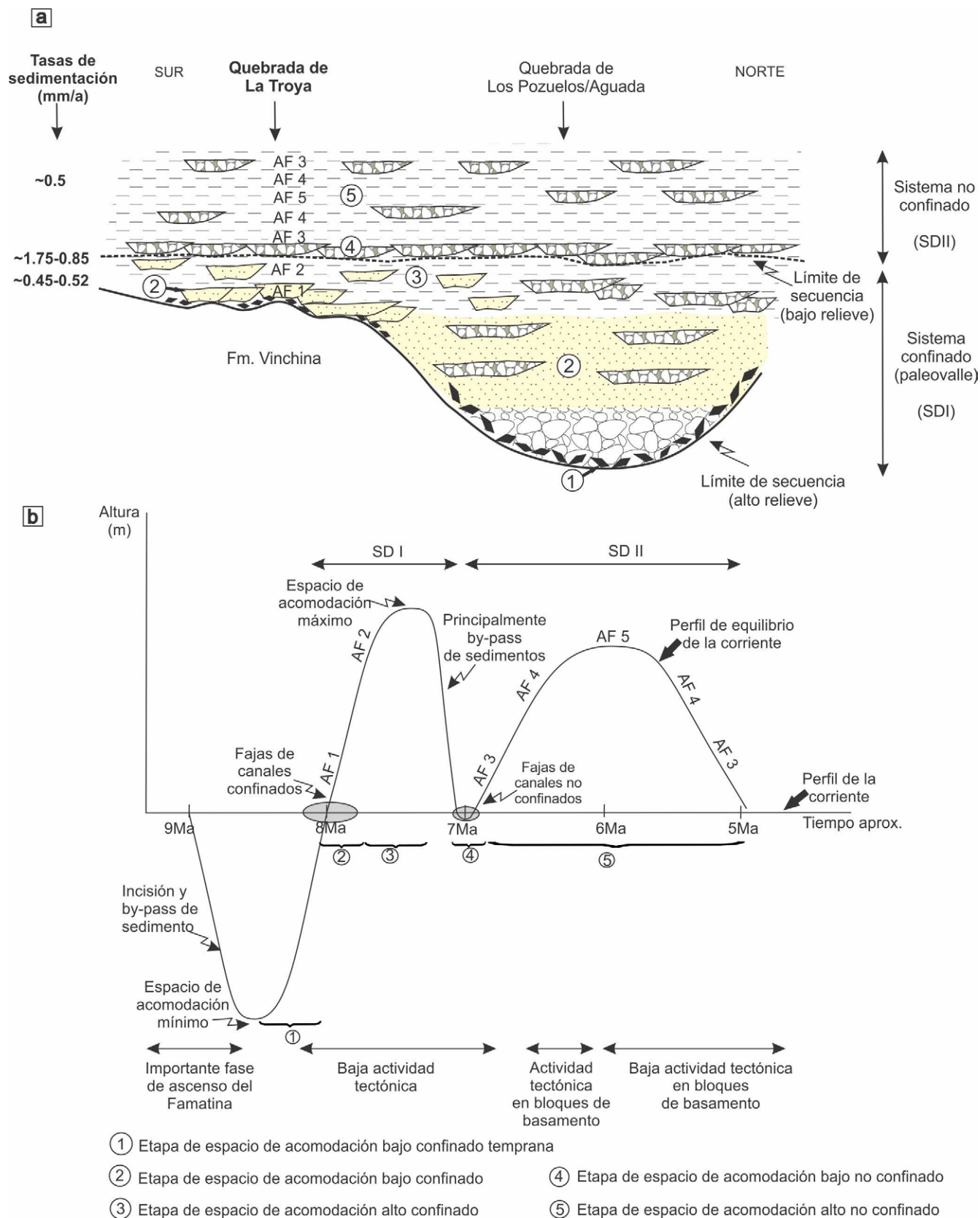


Figura 10. a) Esquema de la figura 4 integrado con los rangos de tasas de sedimentación obtenidos para la Formación Toro Negro en la quebrada de La Troya; b) Reinterpretación de la Figura 5 en función de las edades y tasas de sedimentación obtenidas en este trabajo.

Conceptualmente, la AF2 representa un sistema fluvial confinado terminal, en transición a uno no confinado (AF3). En este esquema, al disminuir la subsidencia en el área del Famatina, la AF2 habría alcanzado las mayores tasas de sedimentación debido al continuo incremento en el perfil de equilibrio con relación al perfil de los cauces, llevando a una rápida agradación de los sistemas fluviales (Fig. 10). La AF3 refleja la pérdida total, o casi total, del confinamiento, lo que condujo a un mayor espacio de acomodación lateral y, por lo tanto, a una declinación de la tasa de sedimentación (Fig. 10).

La SDII estaría relacionada a un pulso importante de ascenso de la sierra de Toro Negro y de los cerros Cuminchancos (Fig. 1), ubicados al N-NO de la cuenca, que actuaron como las principales áreas de aporte (petrofacies PMP y BA, Fig. 2) evidenciando un cambio en la dirección principal de aporte, que pasaría de O-E para la SDI, a N-S para la SDII (Ciccioli et al. 2014a). Además, asociado a este levantamiento del basamento se habría producido probablemente el inicio del ascenso de la sección basal de la sierra de Los Colorados como indica la edad de traza de fisión (7.3 ± 1.3 Ma) sobre granos de circones obtenida por Tabbutt et al. (1989) para la parte inferior de la Formación Vinchina.

Finalmente, después de los ~ 4.9 Ma se habría producido un importante evento tectónico marcado por la formación de una superficie de erosión de bajo relieve y de extensión regional que se reconoce a lo largo de toda la sierra de Los Colorados y que señala la base del miembro superior de la Formación Toro Negro (SDIII).

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que el análisis integrado de la información magnetoestratigráfica, sumado a edades absolutas y modelos de estratigrafía secuencial, permite mejorar considerablemente los modelos paleogeográficos y tectosedimentarios de una cuenca.

En el caso aquí analizado de la Formación Toro Negro, la integración de la magnetoestratigrafía con edades absolutas U-Pb ha hecho posible obtener tres patrones de tasas de sedimentación que se corresponden adecuadamente con los modelos tectosedimentarios previos. Es así como las tasas de sedimentación obtenidas para la AF1 (0.45 mm/a en el modelo de correlación 1 y 0.3 mm/a y 0.52 mm/a en el modelo de correlación 2), reflejan las condiciones de confinamiento con bajo espacio de acomodación que caracterizaron al relleno inicial del paleovalle y sus tributarios, formado como consecuencia de una importante fase de ascenso de la sierra

de Famatina. El pasaje a valores más altos de 1.75 mm/a (modelo de correlación 1) y 0.85 mm/a (modelo de correlación 2), señala claramente un aumento en la tasa de sedimentación, muy probablemente vinculado al ascenso del perfil de equilibrio de los sistemas fluviales que permitió acomodar una mayor cantidad de sedimento dentro del paleovalle (etapa de alto espacio de acomodación confinado) y la transición hacia sistemas fluviales no confinados. Así, la disminución en la tasa de sedimentación, al perderse por completo el confinamiento en la SDII (0.5 mm/a), indica la transición a una etapa de mayor espacio de acomodación lateral. En esta etapa, al mantenerse aproximadamente constante el aporte sedimentario y la subsidencia local, se produce una reducción en la tasa de sedimentación.

Otro aspecto destacable es que la nueva información sugiere que el paleovalle labrado sobre la Formación Vinchina se habría formado aproximadamente entre los ~ 9 y 8 Ma. Además, el inicio de la sedimentación de la Formación Toro Negro, en la quebrada de La Troya, corresponde al cron C4n. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en posiciones más profundas del paleovalle el inicio de la sedimentación de la unidad es más antigua, pero difícilmente supere la base del cron C4n a juzgar por la edad del techo de la Formación Vinchina en ese sector. Finalmente, la superficie que separa los miembros inferior y superior de la Formación Toro Negro es aquí incluida en el cron C3n.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco de los proyectos UBACyT 218BA de la Universidad de Buenos Aires, PICT 1963-2014 y 2015-2239 de la ANPCyT y PIP 262 de CONICET. Los autores agradecen los comentarios y correcciones realizadas por dos revisores anónimos que han permitido mejorar sustancialmente el manuscrito.

REFERENCIAS

- Amidon, W.H., Ciccioli, P.L., Marensi, S.A., Limarino, C.O., Fisher, G.B., Burbank, D.W. y Kylander-Clark, A. 2016. U-Pb ages of detrital and volcanic zircons of the Toro Negro Formation, northwestern Argentina: Age, provenance and sedimentation rates. *Journal of South American Earth Sciences* 70: 237-250.
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J.P., Blum, M.D., Dalrymple, R.W., Eriksson, P.G., Fielding, C.R., Fisher, W.L., Galloway, W.E., Gibling, M.R., Giles, K.A., Holbrook, J.M., Jordan, R., Kendall, C., Marcurda, B., Martinsen, O.J., Miall, A.D., Neal, J.E., Nnmedal, D., Pomar, L., Posamentier, H.W. Pratt, B.R., Sarg, J.F., Shanley, K.W., Steel,

- R.J., Strasser, A., Tucker, M.E. y Winker, C. 2009. Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews* 92: 1-33.
- Ciccioli, P.L. 2008. Evolución paleoambiental, estratigrafía y petrología sedimentaria de la Formación Toro Negro, Sierras Pampeanas Noroccidentales, provincia de La Rioja. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (inédita), 336 p., Buenos Aires.
- Ciccioli, P.L. y Marensi, S.A. 2012. Paleoambientes sedimentarios la Formación Toro Negro (Neógeno), antepaís fracturado andino, noroeste argentino. *Andean Geology* 39: 406-440.
- Ciccioli, P.L., Limarino, C.O. y Marensi, S.A. 2005. Nuevas edades radiométricas para la Formación Toro Negro en la Sierra de los Colorados, Sierras Pampeanas Noroccidentales, prov. La Rioja. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60: 251-254.
- Ciccioli, P.L., Limarino, C.O., Marensi, S.A., Tedesco, A.M. y Tripaldi, A. 2010a. Estratigrafía de La Cuenca de Vinchina, Sierras Pampeanas Noroccidentales, Noroeste de La Provincia de La Rioja. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66: 146-155.
- Ciccioli, P.L., Limarino, C.O. y Marensi, S.A. 2010b. The Vinchina Broken-Foreland Basin: Tectonic Controls in the evolution of the fluvial systems of the Toro Negro Formation (Neogene), NW Argentina. 18th International Sedimentology Congress, Mendoza, Argentina Abstract 248.
- Ciccioli, P.L., Limarino, C.O., Marensi, S.A., Tedesco, A.M. y Tripaldi, A. 2011. Tectosedimentary evolution of the La Troya-Vinchina depocenters (northern Bermejo Basin, Tertiary), La Rioja Province, Argentina. En: Salfity, J.A. y Marquillas, R.A. (eds.) *Cenozoic Geology of the Central Andes of Argentina*, SCS Publisher: 91-110, Salta.
- Ciccioli, P.L., Marensi, S.A., Rossello, E. y Limarino, C.O. 2013. Sedimentary patterns in the Vinchina Basin: interplay between compressional and transcurrent tectonism during the Andean Orogeny. *Bollettino di Geofisica teorica et applicata* 54 Supplement 2: 217-220.
- Ciccioli, P.L., Marensi, S.A. y Limarino, C.O. 2014a. Petrology and provenance of the Toro Negro Formation (Neogene) of the Vinchina broken foreland basin (central Andes of Argentina). *Journal of South American Earth Science* 49: 15-38.
- Ciccioli, P.L., Limarino, C.O., Friedman, R. y Marensi, S.A. 2014b. New high precision U-Pb ages for the Vinchina Formation: Implications for the stratigraphy of the Bermejo Andean Foreland Basin (La Rioja Province, Western Argentina). *Journal of South American Earth Sciences* 56: 200-213.
- Ciccioli, P.L., Marensi, S.A., Amidon, W.H., Limarino, C.O. y Klander-Clark, A. 2018. Alluvial to lacustrine sedimentation in an endorheic basin during the Mio-Pliocene: the Toro Negro Formation, Central Andes of Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 84: 69-87.
- Collo, G., Dávila, F.M., Nóbile, J., Astini, R.A. y Gehrels, G. 2011. Clay mineralogy and thermal history of the Neogene Vinchina Basin, central Andes of Argentina: analysis of factors controlling the heating conditions. *Tectonics* 30: TC4012.
- Collo, G., Dávila, F.M., Teixeira, W., Nóbile, J.C., Sant' Anna, L.G. y Carter, A. 2017. Isotopic and thermochronologic evidence of extremely cold lithosphere associated with a slab flattening in the Central Andes of Argentina. *Basin Research* 29: 16-40.
- Dalrymple, M., Prosser, J. y Williams, B. 1998. A dynamic systems approach to the regional controls on deposition and architecture of alluvial sequences, illustrated in the Staffjord Formation (United Kingdom, Northern North Sea). En: Shanley, K.W., McCabe, P.J. (eds.), *Relative Role of Eustasy, Climate and Tectonism in Continental Rocks*. SEPM Special Publication 59: 65-81, Tulsa.
- De Iullis, G., Re, G.H. y Vizcaíno, S.F. 2004. The Toro Negro Megatheriine (Mammalia, Xenarthra): A new species of *Pyramiodontherium* and a review of *Plesiomegatherium*. *Journal of Vertebrate Paleontology* 24(1): 214-227.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D. y Ogg, G.M. 2012. *The Geological Time Scale 2012*, Vol. 1-2. Elsevier 1114 p., Oxford.
- Japas, M.S., Re, G.H., Oriolo, S. y Vilas, J.F. 2016. Palaeomagnetic data from the Precordillera fold and thrust belt constraining Neogene foreland evolution of the Pampean flat slab segment (Central Andes, Argentina). En: Pueyo, E. L., Cifelli, F., Sussman, A.J. y Oliva-Urcia, B. (eds.), *Palaeomagnetism in Fold and Thrust Belts: New Perspectives*. Geological Society, London, Special Publications, 425 p., London.
- Japas, M.S., Re, G.H., Oriolo, S. y Vilas, J.F. 2016. Basement-involved deformation overprinting thin-skinned deformation in the Pampean flat-slab segment of the southern Central Andes, Argentina. *Geological Magazine*: 1042-1065.
- Krapovickas V., Ciccioli, P.L., Mángano, M.G., Marsicano, C.A. y Limarino, C.O. 2009. Paleobiological and paleoecological significance of a Miocene South American ichnofauna in anastomosed fluvial deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 284: 129-152.
- Limarino, C.O., Ciccioli, P.L. y Marensi, S.A. 2010. Análisis del contacto entre las formaciones Vinchina y Toro Negro, sus implicancias tectónicas (Sierra de Los Colorados, provincia de La Rioja). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 17: 113-132.
- Martínez, L.C.A. y Rodríguez-Brizuela, R. 2011. *Gleditisiioxylon riojana* nov. sp. en el Neógeno de Argentina: sus relaciones paleoambientales y biogeográficas. *Geobios* 44: 461-472.
- Ramos, V.A. 1970. Estratigrafía y estructura del Terciario en la Sierra de los Colorados (Provincia de La Rioja), República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 25: 359-382.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.C. y Pérez, D.J. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Re, G.H. 2008. *Magnetoestratigrafías del NO argentino (entre 27° y 31°S) aplicadas al análisis de la deformación andina, y su relación con la subducción de la Placa de Nazca durante el Cenozoico tardío*. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 283 p., Buenos Aires.
- Re, G.H. y Barredo, S.P. 1993. Esquema de correlación magnetoestrati-

- gráfica de formaciones terciarias aflorantes en las provincias de San Juan, La Rioja y Catamarca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 48: 241-246.
- Re, G. H. y Rapalini, A.E. 1997. Rotaciones de bloques corticales en el entorno de Sierras Pampeanas y Precordillera: sus implicancias tectónicas. 2° Jornadas de Geología de Precordillera, Actas: 198-203, San Juan.
- Re, G.H. y Vilas, J.F. 1990. Análisis de los cambios paleogeográficos ocurridos durante el Cenozoico tardío, en la región de Vinchina (provincia de La Rioja), a partir de estudios magnetoestratigráficos. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 267-270, San Juan.
- Reynolds, J.H. 1987. Chronology of Neogene tectonics in the Central Andean (27° - 33° S) of western Argentina, based on the magnetic polarity stratigraphy of foreland basin sediments, PhD Thesis, Dartmouth College (inédito), 353 p., New Hampshire.
- Rodríguez Brizuela, R. y Tauber, A. 2006. Estratigrafía y mamíferos fósiles de la Formación Toro Negro (Neógeno), departamento Vinchina, noroeste de la provincia de La Rioja, Argentina. *Ameghiniana* 43: 257-272.
- Rossello, E.A., Mozetic, M.E., Cobbold, P.R., de Urreiztieta, M. y Gapais, D. 1996. El espolón Umango-Maz y la conjugación sintaxial de los lineamientos Tucumán y Valle Fértil (La Rioja, Argentina). 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2: 187-194, Buenos Aires.
- Stevens Goddard, A.L. y Carrapa, B. 2018a. Using basin thermal history to evaluate the role of Miocene–Pliocene flat-slab subduction in the southern Central Andes (27° S–30° S). *Basin Research* 30: 564-585.
- Stevens Goddard, A.L. y Carrapa, B. 2018b. Effects of Miocene–Pliocene global climate changes on continental sedimentation: A case study from the southern Central Andes. *Geology* 46: 647-650.
- Tabbutt, K.D., Naeser, Ch.W., Jordan, T.E. y Cervený, P.F. 1989. New fission-track ages of Mio-Pliocene tuffs in the Sierras Pampeanas and Precordillera of Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 44(1-4): 408-419.
- Turner, J.C.M. 1964. Descripción geológica de la Hoja 15c. Vinchina (Provincia de La Rioja). Dirección Nacional de Geología y Minería. Boletín 100, 81 p., Buenos Aires.