

Neotectónica del extremo austral de la falla La Rinconada, Precordillera Oriental, provincia de San Juan

Andrés D. RICHARD^{1,2}, Carlos H. COSTA², Laura B. GIAMBIAGI³, Carlos A. MORENO Marcó², Emilio A. AHUMADA² y Fabricio R. VÁZQUEZ²

¹CONICET

²Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, San Luis.

³IANIGLA, Mendoza

Email: adrichard@unsl.edu.ar

Editor: Fernando Hongn

RESUMEN

La neotectónica del piedemonte oriental de la Sierra Chica de Zonda (Precordillera Oriental, 31°47'S -31°55'S) está caracterizada por escarpas de rumbo submeridiano y suaves plegamientos que afectan a los niveles aluviales cuaternarios. La principal estructura del área corresponde a la falla inversa La Rinconada, de vergencia occidental. Escarpas y pliegues cuaternarios de menor expresión morfológica aparecen distribuidos en una faja de deformación de ~ 8 km de ancho al este de la misma, en la que son frecuentes las exposiciones del basamento cenozoico. Dichas estructuras se encuentran mayormente controladas por desplazamientos interestratales en los estratos precuaternarios, previamente deformados. La exhumación de unidades paleozoicas en el bloque colgante de la falla La Rinconada, permite especular sobre la profundidad del despegue y realizar estimaciones acerca de su potencial sismogénico.

Palabras clave: *deformaciones cuaternarias; falla La Rinconada; implicancias sismogénicas; Frente orogénico andino.*

ABSTRACT

Neotectonics of the southern end of the La Rinconada fault, Eastern Precordillera, province of San Juan.

Neotectonics of the eastern piedmont of the Sierra Chica de Zonda range (Eastern Precordillera, 31°47'S -31°55'S) is characterized by west-facing N-S trending scarps and gentle folding affecting the Quaternary alluvial deposits. The reverse west-verging La Rinconada fault is the main neotectonic feature with the most notorious landscape imprint. Fault-related scarps and Quaternary folding with less geomorphic expression are distributed across a ~ 8 km-wide belt parallel to this main structure, where pre-Quaternary rocks crop-out. These structures are controlled by the bedding attitude of previously deformed underlying strata. The La Rinconada fault exposes Paleozoic strata in its hanging wall, which allow us to speculate about the detachment depth and the seismogenic potential of this structure.

Keywords: *Quaternary deformation; La Rinconada fault; seismogenic implications; Andean orogenic front.*

INTRODUCCIÓN

La zona de deformación cuaternaria en la Precordillera de San Juan (31°-32° S) (Fig. 1) está representada por retrocorrimientos de vergencia occidental, localizados principalmente en el piedemonte

oriental de la Precordillera Oriental (Bas-tías *et al.* 1984, Cortés *et al.* 1999, Costa *et al.* 2000, 2006a, Siame *et al.* 2002, 2005, 2006, Meigs *et al.* 2006, Vergés *et al.* 2007, Rockwell *et al.* 2014, entre otros). La distribución de la sismicidad instrumental y de sismos históricos destructivos

también muestra una importante concentración en este sector (INPRES 1977, Alvarado y Beck 2006, Costa *et al.* 2006a). No obstante, existen algunas evidencias de acortamiento cuaternario en la zona triangular desarrolladas entre las precordilleras Oriental y Central (Costa *et al.* 1999,

Paredes y Perucca 2000, Perucca y Onorato 2011, Perucca *et al.* 2012, Lara *et al.* 2018, entre otros).

La Precordillera Oriental es objeto de debate en lo que respecta a la geometría profunda de fallas morfogénicas y su conexión estructural con el antepaís. Algunos trabajos consideran que los corrimientos principales de la Precordillera Oriental están controlados por fábricas del basamento pampeano y vinculados a zonas de despegue en la corteza media (Rolleri 1969, Ortiz y Zambrano 1981, Baldis *et al.* 1982, Comínguez y Ramos 1991, von Gosen 1992, Zapata y Allmendinger 1996, Siame *et al.* 2002, Alvarado *et al.* 2009) (Fig. 2a). Otras contribuciones interpretan en cambio que esta morfoestructura es la expresión superficial de retrocorrimientos relacionados con cuñas corticales (Meigs *et al.* 2006, Vergés *et al.* 2007, Meigs y Nabelek 2010, Rockwell *et al.* 2014) (Fig. 2c). Dichas visiones no solo implican diferentes modelos para la evolución reciente del frente orogénico, sino que también impactan en la caracterización como fuentes sismogénicas de las estructuras cuaternarias principales, como la falla La Rinconada (FLR) (Fig. 2b y 2d). La ocurrencia del sismo Mw 6.8 (1952) en cercanías del trazo de esta estructura, también ha contribuido a especular respecto a los vínculos del mismo con la Falla La Rinconada (Bastías *et al.* 1984, Tello y Perucca 1993, Alvarado y Beck 2006). Las escarpas y pliegues cuaternarios del sector analizado exhiben un marcado control estructural por parte del basamento neotectónico y han sido vinculadas a mecanismos flexodeslizantes que plegaron la cubierta neógena (Costa *et al.* 1999, Meigs *et al.* 2006, Vergés *et al.* 2007, Rockwell *et al.* 2014) o más genéricamente al efecto del acortamiento de limbo dorsal (*back-limb tightening structures*) (Costa *et al.* 2006b). Sin embargo, en el extremo sur de la falla La Rinconada fueron reconocidos estratos paleozoicos exhumados asociados a la zona de falla, lo que permitiría inferir un nivel de despegue por debajo de la cobertura neógena.

El presente estudio pretende mejorar la caracterización geométrica y cinemática de la falla La Rinconada y sus estructuras asociadas entre los 31°47' y 31°55'S. Dicha caracterización se considera un aporte

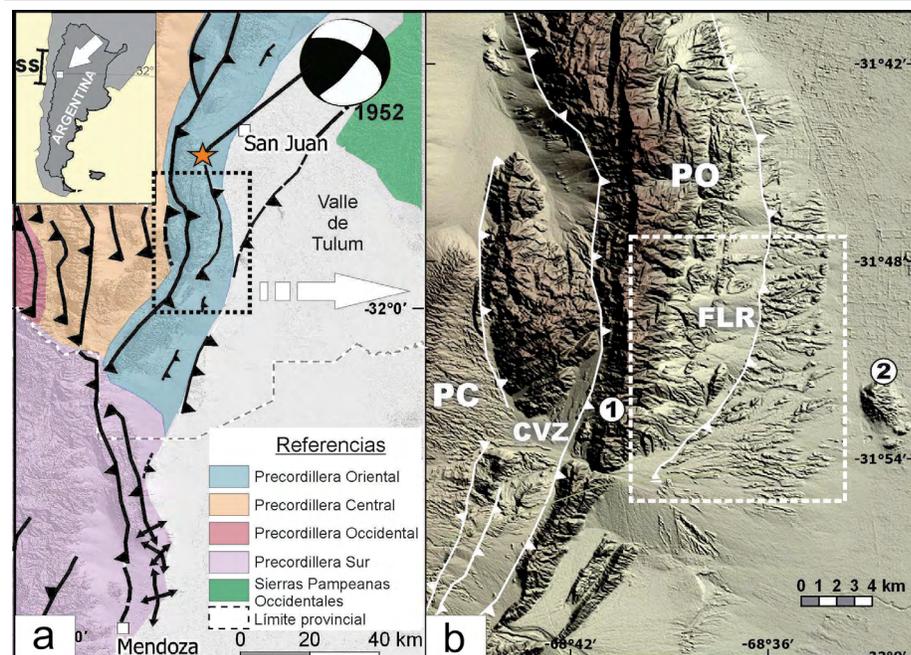


Figura 1. a) Contexto geológico regional, mostrando la ubicación de la zona de estudio (en línea punteada) y la ubicación del área epicentral del terremoto de 1952 (Modificado de Ragona *et al.* 1995, Siame *et al.* 2005, Cortés *et al.* 2006, Alvarado y Beck 2006). Las soluciones del mecanismo focal se muestran mediante proyecciones del hemisferio inferior con los colores oscuros indicando cuadrantes de compresión (Alvarado y Beck 2006). En el recuadro superior se muestra la ubicación general y el segmento de subducción subhorizontal (SS); b) Mapa mostrando los dominios morfoestructurales y estructuras más importantes del sector. PC: Precordillera Central, PO: Precordillera Oriental. Corrimientos neógenos en líneas blancas: CVZ: Corrimiento Villicum Zonda, FLR: Falla La Rinconada. Unidades morfológicas: (1) Sierra Chica del Zonda, (2) Cerro Valdivia.

al avance del conocimiento de la evolución neógena del frente orogénico andino y de la capacidad sismogénica de la falla La Rinconada.

En este trabajo el concepto de deformación cuaternaria *s.l.* es considerado equivalente al de deformación neotectónica (*sensu* Costa *et al.* 2006a).

MARCO TECTÓNICO

El área de estudio se encuentra localizada en el piedemonte oriental de la Precordillera Oriental, sector del retroarco andino perteneciente al segmento de subducción subhorizontal Pampeano (28°-33°S) (Ramos *et al.* 2002) (Fig. 1). Esta unidad morfoestructural se encuentra limitada al sur de los 31° S por el sistema de corrimientos Villicum-Zonda-Pedernal (CVZ) el cual posee vergencia occidental y se extiende por 145 km con rumbo submeridiano, limitando las sierras homónimas (Bastías *et al.* 1984, 1990, Siame *et al.* 2002, Perucca y Vargas 2014). Este sistema de corrimientos yuxtapone las rocas paleozoicas sobre sedimentitas continentales neógenas (Or-

tiz y Zambrano 1981, Uliarte *et al.* 1987, von Gosen 1992, Gardini 1993, Ramos *et al.* 1997, Siame *et al.* 2002, Meigs *et al.* 2006, Ahumada y Costa 2009, entre otros). Ortiz y Zambrano (1981) identificaron a la Precordillera Oriental como una morfoestructura con diferentes características que la faja plegada y corrida de Precordillera Central y Occidental, en parte por la afinidad de sus estructuras con las fábricas predominantes del basamento cristalino de las Sierras Pampeanas. Al norte de 31°S, Zapata y Allmendinger (1993, 1996) indicaron un estilo estructural tipo faja plegada y corrida de piel gruesa para Precordillera Oriental controlada por anisotropías del basamento igneo-metamórfico subyacente. Siame *et al.* (2002, 2005, 2006, 2015) y Alvarado y Beck (2006) también proponen un modelo de fallas propagantes desde el basamento con vergencia occidental. Por otro lado, Meigs *et al.* (2006), Vergés *et al.* (2007), Meigs y Nabelek (2010) y Bellahsen *et al.* (2016) interpretan que la vergencia occidental de la Precordillera Oriental es producto de retrocorrimientos asociados a la manifestación superficial de un acu-

fiamiento en la corteza superior, donde el basamento cristalino no está involucrado en el levantamiento andino de bloques. Independientemente de la geometría profunda de estas interpretaciones, las morfoestructuras de la Precordillera Oriental representadas en la Fig. 1a, corresponden a láminas de corrimientos con vergencia al oeste. En este contexto, las principales evidencias de deformación cuaternaria con mejor exposición en el terreno se encuentran asociadas al acortamiento localizado en el limbo dorsal de dichas láminas de corrimiento (Costa *et al.* 2006b, Rockwell *et al.* 2014). Morfológicamente éstas evidencias se reconocen en el piedemonte oriental de las sierras de Villicum, Chica del Zonda y Pedernal como escarpas rectilíneas o curvilineares, producidas por fallas inversas, cuyos planos de deslizamiento son coincidentes con la estratificación del basamento pre-Cuaternario (Figs. 1 y 3). Las fallas La Laja, Marquesado, La Rinconada y Los Berros (Bastías *et al.* 1984, 1990, Martos 1987a) son las principales estructuras que muestran estas características geomorfológicas. La falla La Rinconada fue reconocida en

los estudios pioneros de Groeber (1944) y Heim (1948) y luego diversos trabajos aportaron descripciones de las deformaciones neotectónicas (INPRES 1982, Bastías *et al.* 1984, Martos 1987a, 1987b, 1995, 1999a, 1999b, Costa 2009).

METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se analizaron imágenes satelitales, modelos digitales de elevación de 30 m de resolución ASTER GDEM (www.earthexplorer.usgs.gov) y 12 m de resolución ALOS WORLD (www.eorc.jaxa.jp), y se realizaron vuelos de reconocimiento junto con observaciones de campo. Para la determinación de actividad neotectónica de las estructuras se procedió a la utilización los depósitos aluviales cuaternarios como marcadores de la deformación. El resultado fue un mapa geológico de las deformaciones cuaternarias tanto principales como secundarias y la diferenciación de 5 superficies aluviales cuaternarias en base a sus características morfoestratigráficas (ordenadas de mayor a menor antigüe-

dad en Q_4 , Q_3 , Q_2 , Q_1 y Q_0). Se realizó un análisis geomorfológico y determinación de la estratigrafía del Cuaternario basado principalmente en criterios comparativos del grado de degradación de superficies aluviales y en su altimetría conjuntamente con los rasgos fotogeológicos (textura, color, grado de disección). En el presente trabajo se utilizaron multiparámetros sensibles a la degradación y tiempo de exposición de las superficies aluviales a los agentes atmosféricos. Los parámetros utilizados en campo fueron: la distribución granulométrica, la angulosidad de los clastos, disolución diferencial en clastos de caliza, *parting*/profundidad de *parting* y la presencia de barniz del desierto. Las unidades Q_0 , Q_1 y el material coluvial han sido agrupados en los sectores donde su diferenciación acarrearía confusión y poca claridad visual por la escala de representación.

En las estructuras relevadas se midieron parámetros tales como rumbo, buzamiento, rechazo y características físicas de la zona de falla, atendiendo especialmente a la relación con el basamento neotectónico (rocas precuaternarias).

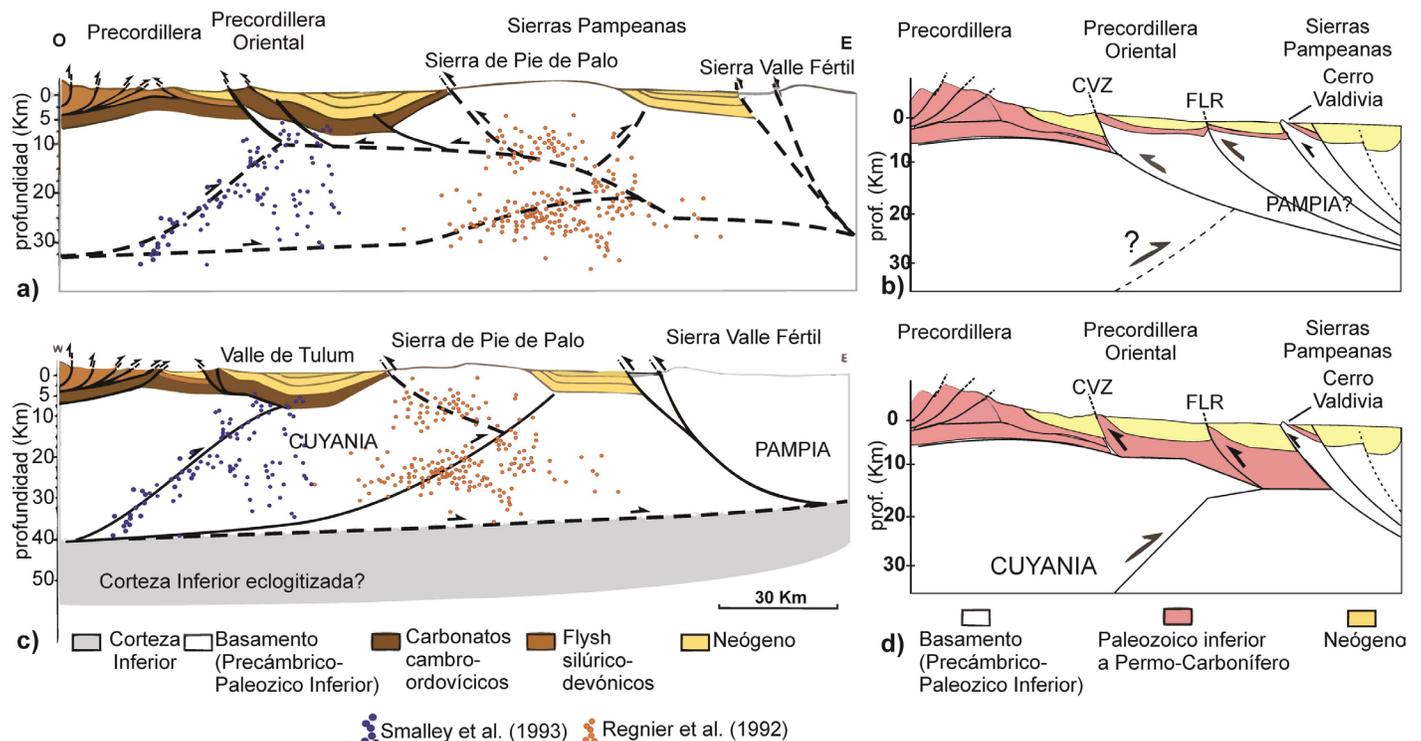


Figura 2. Cortes estructurales a la latitud de las sierras de Pie de Palo y Valle Fértil mostrando las diferentes interpretaciones de la estructura cortical realizadas en base a datos sísmicos (Regnier *et al.* 1992, Smalley *et al.* 1993, modificado de Bellahsen *et al.* 2016): a-b) Modelo de fallas con vergencia occidental, propagantes desde antepaís (en Siame *et al.* 2015) y propuesta para la falla La Laja, adaptada al contexto de La Rinconada (modificado de Alvarado y Beck 2006, Zambrano y Suvires 2008); c-d) Modelo de cuña cortical y retro-corrimiento de piel fina, (en Bellahsen *et al.* 2016) y propuesta para la falla La Laja, adaptada al contexto de La Rinconada (modificado de Meigs *et al.* 2006, Zambrano y Suvires, 2008). CVZ: Corrimiento Villicum-Zonda-Pedernal. FLR: Falla La Rinconada.

En base a los datos relevados se realizó un modelado *forward* en el software 2D Move para reflejar una interpretación de la falla La Rinconada en profundidad. En el modelado se integraron los datos obtenidos del mapeo estructural de ubicación y disposición en el espacio de bancos y estructuras geológicas, datos geométricos de las fallas, y contactos entre unidades.

ESTRATIGRAFÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La columna estratigráfica del sector incluye unidades paleozoicas y neógenas, que en su conjunto constituyen el basamento neotectónico. Las secuencias cambro-ordovícicas corresponden a calizas y dolomías agrupadas dentro del Grupo Marquesado (Bordonaro 1980) y la Formación San Juan (Heim 1948, Amos 1954, Amos y Fernández 1977, Harrington 1971). En discordancia angular se encuentran la Formación Rinconada (Amos 1954), o bien la Formación Jejenes (Amos 1954). La Formación Rinconada, de edad silúrica (Keidel 1938, Heim 1948, Cueda *et al.* 1981, Peralta 1987), está compuesta por lutitas, limolitas y areniscas de coloración verdosa con presencia de olistolitos calcáreos. La Formación Jejenes abarca desde el Carbonífero al Pérmico temprano (Heim 1948, Bercowski *et al.* 1986, Archangelsky *et al.* 1987) y está compuesta por una sección inferior psamo-pelítica, asociada a ambientes glaciares, y una sección superior caracterizada por conglomerados cuarzcíticos, vinculada a sistemas fluvio-glaciares. La parte basal de los estratos neógenos sobreyace en discordancia sobre la Formación Jejenes y está representada por la Formación Loma de Las Tapias (Serafini *et al.* 1986), compuesta por conglomerados areniscas y pelitas de coloración pardo rojiza atribuibles al Mioceno superior (Berkowski *et al.* 1986). Los conglomerados gruesos del Plioceno tardío -Pleistoceno de la Formación Mogna (Kelly 1962, Milana 1990a y b) sobreyacen a la Formación Loma de Las Tapias en suave discordancia angular. Desde el Pleistoceno tardío hasta la actualidad los depósitos están caracterizados por niveles agradacionales pede-

montanos aterrazados (Martos 1987a, 1987b, 1999a, Hedrick *et al.* 2013), conformados por fanglomerados matriz soportados a clasto-soportados con estratificación en mantos y geometría tabular. En su composición predominan clastos de caliza (~70%), grauvaca (~25%) y escasos contenidos de volcanitas (~5%), estos porcentajes varían según la zona, siendo mayores los contenidos de grauvaca y volcanitas hacia el sur de la zona de estudio en detrimento de los clastos de caliza. El material coluvial es producto de los procesos gravitacionales y se presenta asociado a conos coluviales en inmediaciones de los frentes montañosos y a depósitos de caída en las laderas. Los rodados son angulosos y sin selección y sus tamaños son heterogéneos, composicionalmente varían en relación a las unidades aflorantes en el sector.

En el presente trabajo, la denominación de los diferentes niveles ha sido realizada en relación directa con su altura y edad relativa, nominándose como Q_0 a los depósitos aluviales de los cauces activos y Q_4 al nivel de mayor altitud y edad relativa interpretado. Del total de los niveles aluviales cartografiados, la unidad Q_4 es la que presenta menor representatividad areal, con afloramientos puntuales en diferentes sectores sin llegar a alcanzar un 5% de la cobertura aluvial cuaternaria (Fig. 3). Las unidades Q_3 y Q_2 , totalizan entre ambas un 75% de las superficies preservadas y se encuentran distribuidas en ambos lados de la falla La Rinconada, con predominio de la primera unidad hacia el sector oriental y de la segunda hacia el sur de la zona estudiada. La unidad Q_1 presenta su mayor expresión areal en el norte de la zona de estudio, en las inmediaciones del trazo de la falla La Rinconada, en tanto que en el sector sur gran parte ha sido agrupada con la unidad Q_0 debido a las dificultades cartográficas que presenta su diferenciación. La unidad Q_0 se restringe a los cauces activos y representa un 7% de los niveles preservados. Hedrick *et al.* (2013) obtuvieron edades 10Be en la quebrada de los Jejenes para niveles equivalentes a Q_4 de 212 ± 37 ka, en tanto que los niveles equivalentes a Q_1 varían entre 5 ± 5 ka y 25 ± 12 ka. Las características particulares de cada nivel han sido resumidas en el cuadro 1.

ESTRUCTURAS NEOTECTÓNICAS PRINCIPALES

Las evidencias morfológicas más notorias se corresponden con el trazo de la falla La Rinconada (Figs. 1 y 3). Sin embargo, otras evidencias de deformaciones cuaternarias aparecen distribuidas entre la falla La Rinconada y el límite este de la zona de estudio (Fig. 3). A los efectos descriptivos, se han diferenciado los rasgos neotectónicos circunscriptos al trazo principal de la falla La Rinconada y de las estructuras distribuidas en el bloque colgante de la misma, donde se exponen frecuentemente rocas precuaternarias.

Deformaciones cuaternarias asociadas al trazo de la falla La Rinconada

La falla La Rinconada corresponde a una falla inversa con rumbo general N-S y diseño ligeramente cóncavo hacia el oeste, que presenta evidencias de deformación en el terreno a lo largo de ~26 Km (Fig. 1). Las observaciones realizadas en el presente estudio corresponden al sector austral, comprendido entre las quebradas de Jejenes y La Flecha (Figs. 1 y 3). En este sector, la falla La Rinconada se destaca en el terreno como una escarpa contrapendiente en el piedemonte serrano, con trazo continuo de al menos 13 km y con amplitudes que oscilan entre ~1 m y 40 m (Figs. 4 y 5). Los niveles aluviales cuaternarios más jóvenes afectados por la actividad corresponden a la unidad Q_1 (Fig. 4a), con escarpas que varían entre ~0,75 y 1 m de altura, mientras que la escarpa en los niveles aluviales más antiguos (Q_4) alcanza alturas de 40 m (Fig. 5b). En algunos sectores, la deflexión de los cauces fluviales resalta la impronta morfológica de la traza de la falla La Rinconada. Sin embargo, la caracterización estructural de la misma se encuentra limitada debido a la frecuente presencia de derrubios cubriendo la zona de escarpa. En aquellos sectores con exposiciones de la falla La Rinconada se verifica que la misma presenta inclinaciones variables entre 30° E y 45° E conforme a la inclinación de los estratos neógenos (Bastías *et al.* 1984, Martos 1987b, 1995, Costa 2009), aunque pueden observarse inclinaciones locales

CUADRO 1. Cuadro resumen de las características reconocidas en los niveles aluviales cuaternarios en la zona de estudio.

	Indicador	Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁	Q ₀
Rasgos fotoeológicos	Textura	Suave a levemente rugosa. Ondulaciones frecuentes	Rugosa a ondulosa	Lisa	Rugosa suave. Patrón moteado producto de la vegetación	Suave a muy suave
	Color	Gris oscuro	Gris oscuro predominante	Gris oscuro	Gris claro	Blanquecino
	Grado de disección	Alto	Alto	Moderado a alto	Bajo	-
	Área que representa de los niveles aluviales	3%	20%	55%	15%	7%
Parámetros de la superficie aluvial	Máximo desnivel en relación al cauce activo	40 m	15 m	15 m	1,5 m	-
	Distribución granulométrica promedio	70 % 1-3 cm	60% 1-3 cm	36% 1-3 cm	30% 1-3 cm	30% 1-3 cm
		21 % 3-7 cm	30% 3-7 cm	40% 3-7 cm	40% 3-7 cm	35% 3-7 cm
		8 % 7-15 cm	9 % 7-15 cm	20% 7-15 cm	20% 7-15 cm	20% 7-15 cm
		1 % >15 cm	1% >15 cm	4% >15 cm	10% >15 cm	10% >15 cm
	Angulosidad de clastos	Angulosos a subangulosos	Angulosos a subangulosos	Subredondeados a subangulosos	Subredondeados a subangulosos	Redondeados a subredondeados
Disolución diferencial	Incisión de planos de clivaje, hasta 7/1.	Incisión de planos de clivaje= 4/1	Incisión de planos de clivaje= 4/1.	No se observan fuertes rasgos de disolución.	No se observan fuertes rasgos de disolución.	
Parting/ Profundidad del perfil de parting	Frecuente en clastos mayores (>15 cm) y menores (<15 cm)	Frecuente en clastos mayores (>15 cm). Hasta 75 cm de profundidad	Frecuente en clastos mayores (>15 cm). Hasta 45 cm de profundidad	Escaso solo en clastos mayores (>15 cm).	No se observa.	
Barniz del desierto	Fuerte tonalidad grisácea en superficie, casi dominante.	Gris oscuro muy notorio, 50%.	Presencia notoria de tonalidades oscuras, 30%.	Escaso barniz del desierto, dominan coloraciones originales.	No se observa.	

sub-horizontales en los lugares donde interactúa con niveles cuaternarios no consolidados (Costa *et al.* 2009).

A los efectos descriptivos, se han diferenciado cuatro secciones a lo largo del trazo de la falla La Rinconada, conforme a las características morfológicas de las escarpas y otros rasgos asociados (Fig. 3).

Sección A: La sección comprendida entre las quebradas de Jejenes y de Las Minas exhibe una escarpa rectilínea bien desarrollada en los niveles Q₁ y Q₂, y enfatizada por la deflexión de cauces paralelos al trazo de la falla (Figs. 3 y 4a). La rectilinearidad de la escarpa se pierde cuando en el bloque colgante son exhumados sedimentos neógenos friables. En estos casos, la amplitud de la escarpa es de ~ 30 m, con remanentes de Q₄ sobreyaciendo en discordancia angular sobre las rocas neógenas.

Las evidencias neotectónicas más destacables de este segmento se reconocen entre las quebradas Jejenes y de Las Minas. En la quebrada Jejenes el nivel aluvial Q₁ se encuentra desplazado ~ 1m por dos trazos paralelos de la falla La Rinconada (Costa, 2009), en tanto que 1 km más al sur, el desnivel topográfico entre el nivel Q₃ preservado en el bloque colgante en relación al nivel Q₁ en el bloque yacente es de 7m (Fig. 4a). Hacia el sur, la escarpa es gradualmente cubierta por los depósitos aluviales de Q₁ y Q₀. El plano de falla en los sedimentos neógenos inclina 45°E en promedio, aunque su propagación en los sedimentos cuaternarios presenta inclinaciones <15° (Costa *et al.* 2009) (Fig. 5a).

Sección B: Entre las quebradas de Las Minas y La Tranquera (Fig. 3), el trazo de la falla La Rinconada en planta presenta geo-

metría más lobulada y menor continuidad en la escarpa que en la sección A, debido a la mayor actividad erosiva de los cauces efímeros que la atraviesan (Fig. 4b). La falla La Rinconada exhuma rocas paleozoicas y neógenas en el bloque colgante de esta sección (Fig. 5b). La escarpa principal alcanza hasta 40 m en el nivel aluvial Q₄, mientras que en el bloque yacente se reconocen otras escarpas submétricas discontinuas en los niveles aluviales más jóvenes (Q₃ y Q₂) con disposición paralela a la escarpa principal (Fig. 5c).

En la quebrada de Calizas (sector central de la sección), la escarpa principal está asociada a un anticlinal asimétrico en el basamento neotectónico (Stappenbeck 1910, Heim 1948), plegando sutilmente el nivel aluvial Q₄ (Richard 2013) (Fig. 5b). La Formación Jejenes exhibe la presencia aislada de pliegues antiformes isoclinales

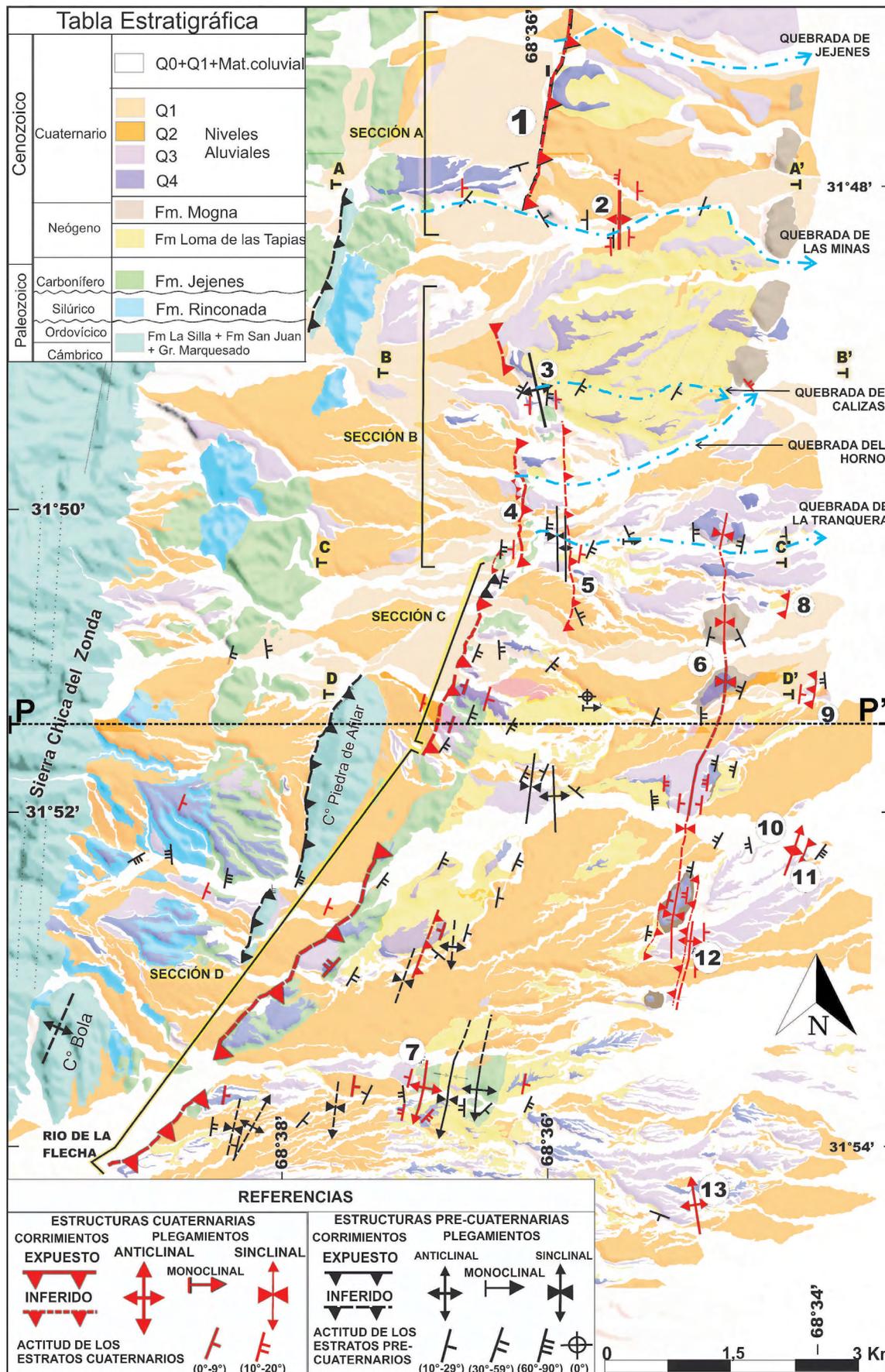


Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de Heim 1948, Martos 1995, Graña 2008, Moreno Marcó 2013, Richard 2013). Referencias estructuras: Falla La Rinconada (1), Anticlinal de la Quebrada de Las Minas (2), Anticlinal de la quebrada de Calizas (3), Falla Las Huellas (4), Falla Árbol Quemado (5), Sinclinal del Este (6), Anticlinales del Morrito (7), Falla Cerro Colgado (8), Falla Carpintería (9), Anticlinal La Señal (10), Fallas La Señal (11), Anticlinal Romo (12), Anticlinal Esquinado (13).

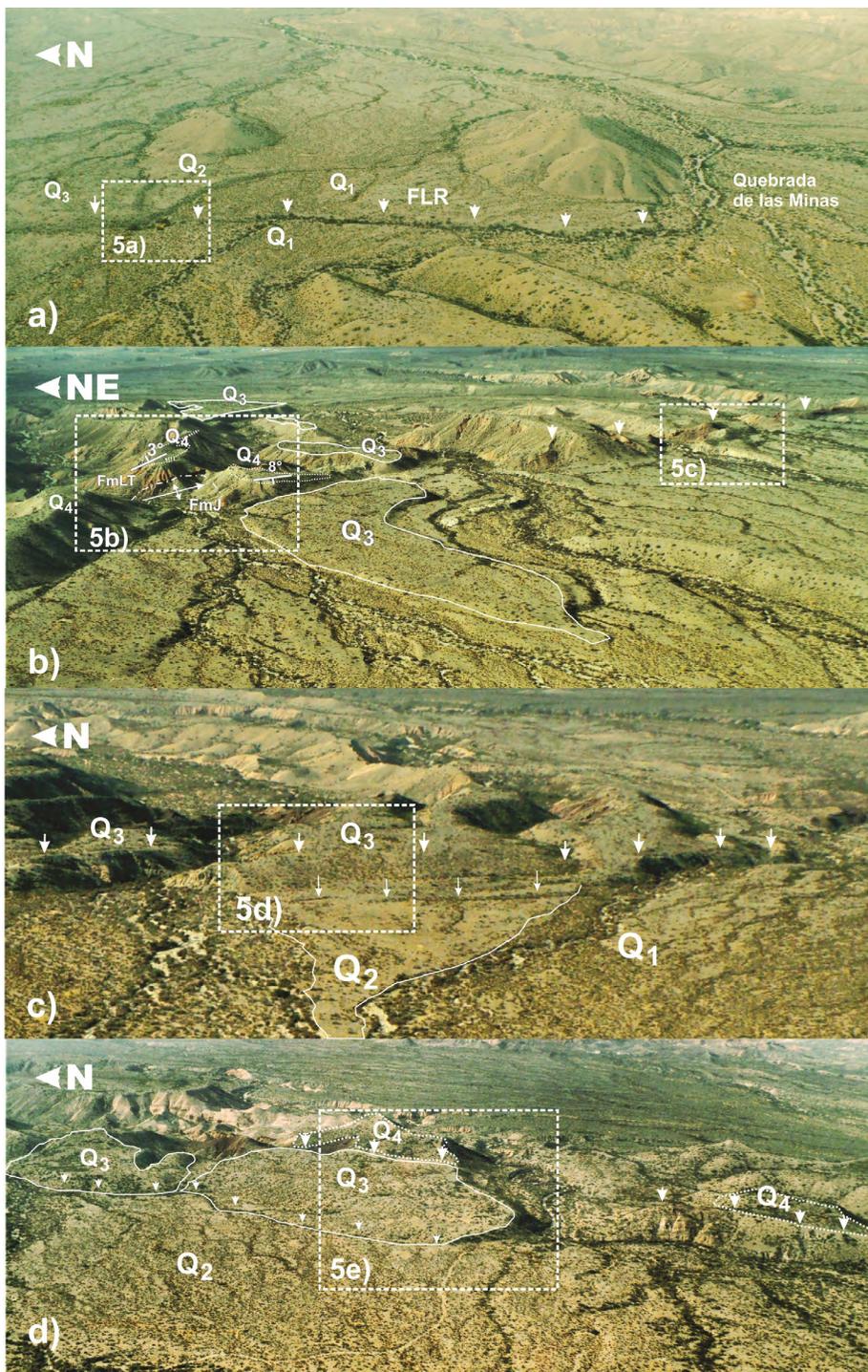


Figura 4. Fotos aéreas oblicuas de las escarpas de la falla La Rinconada: a) Sección A al norte de la quebrada de Las Minas. Nótese el desarrollo de la escarpa en el nivel aluvial Q_1 y niveles más antiguos; b) Sección B entre la quebrada de Las Minas y la quebrada del Horno. Diferencias altimétricas de las unidades Q_4 y Q_3 en el bloque colgante de la falla La Rinconada; c) Sección C a la latitud del extremo norte del cerro Piedras de Afilar. Se indica la presencia del nivel Q_3 en el bloque colgante y de los niveles aluviales Q_1 y Q_2 en el bloque yaciente; d) Sección D a la latitud del extremo sur del cerro Piedras de Afilar. Se observa el rumbo NNE de la estructura y la presencia de los niveles Q_3 y Q_4 basculando a contrapendiente. Las flechas blancas señalan la escarpa. FmJ: Fm. Jejenes, FmLT: Fm. Loma de las Tapias. Las descripciones de los recuadros se muestran en la figura 5.

discordancia angular a las rocas paleozoicas, describiendo un pliegue con un eje de rumbo N-S y flancos con buzamientos de 38° O y 5° E. En concordancia con la estructura infrayacente, el abovedamiento reconocido en el nivel aluvial Q_4 posee un flanco occidental que inclina 8° O y un flanco más tendido hacia el este (3° E) (Fig. 4b).

Hacia el sur de la quebrada de Calizas la amplitud de la escarpa es de ~ 25 m, preservándose remanentes de las superficies aluviales Q_4 y Q_3 en el bloque colgante. Una intensa degradación, posiblemente relacionada con procesos de remoción en masa, alteró la geometría original de la escarpa, eliminando las morfologías primarias asociadas a fallamiento. Los planos de falla reconocidos en las rocas paleozoicas presentan inclinaciones de 56° E.

En las cercanías de la quebrada de La Tranquera (Fig. 3) se expone un plano principal de la falla La Rinconada con una actitud de $20^\circ/45^\circ$ E asociado a una escarpa de tipo colapso de pared colgante. La zona de cizalla frágil alcanza los 2 m de potencia y se desarrolla dentro de la Formación Jejenes, alterando las propiedades mecánicas de la roca hasta casi perder sus características originales. El desnivel reconocido entre la superficie aluvial Q_3 y Q_1 es de ~ 15 m, pudiendo estimarse como un desplazamiento vertical mínimo en este sector.

Al oeste de la escarpa principal de la falla La Rinconada, la falla Las Huellas (referencia 4 Figs. 3, 4b y 5c), produce un escarpe en el nivel Q_3 inclinando contrapendiente con cara libre al oeste y amplitud de ~ 2 m.

Sección C: Entre la quebrada de La Tranquera y el extremo norte del cerro Piedras de Afilar (Fig. 3), el trazo de la falla La Rinconada presenta una dirección NNE, estando representado por escarpas discontinuas con amplitudes aproximadas de 20 m que exponen depósitos aluviales (Q_4 y Q_3) y exhuman estratos de la Formación Jejenes. A la latitud del extremo norte del cerro Piedras de Afilar se han reconocido dos escarpas menores en el nivel aluvial Q_2 , el cual suprayace en discordancia angular a los estratos de la Formación Jejenes ($40^\circ/39^\circ$ SE). Estas escarpas con orientación NNE y cara al poniente presentan una amplitud de $\sim 0,7$ m cada una

de escala submétrica, armónicos con planos axiales inclinados al este. El núcleo de esta estructura está representado por las calizas de la Formación San Juan cuya

deformación interna también muestra pliegues isoclinales apretados inclinados al este.

Las unidades neógenas sobreyacen en

y podrían asociarse a planos secundarios de la falla La Rinconada (Figs. 4c y 5d).

Sección D: Entre el extremo norte del cerro Piedras de Afilar y la quebrada de La Flecha (Fig. 3), la expresión de la escarpa principal y morfologías asociadas es poco evidente. La rectilinearidad de las escarpas reconocidas está resaltada por cauces subsecuentes, posiblemente controlados por las litologías más resistentes expuestas en el labio elevado (Formación Jejenes), antes que por desplazamiento diferencial a ambos lados del trazo interpretado para la falla La Rinconada (Fig. 4d). A la latitud del extremo sur del cerro Piedras de Afilar (Fig. 3) se observa una escarpa de colapso de labio elevado de ~ 20 m de amplitud. El plano de la falla La Rinconada está definido aquí por una zona de cizalla de 1,5 m de potencia y actitud 5°/55° E paralela a la estratificación de estratos de grano fino, intercalados en los conglomerados cuarzosos de la Formación Jejenes. En la proyección hacia el sur de esta estructura se observa el basculamiento a contrapendiente los niveles aluviales Q₃ (~8° NO) y Q₄ (14°O) (Figs. 4d y 5e).

Deformaciones cuaternarias en el bloque colgante de la falla La Rinconada

Anticlinal Quebrada de Las Minas (ref. 2, Fig. 3): Este pliegue ha sido inicialmente descrito por Costa (2009) y corresponde a un abovedamiento del nivel aluvial Q₂ que coincide con un anticlinal en la Formación Loma de Las Tapias, cuyo eje se dispone aproximadamente perpendicular a la quebrada de Las Minas (Fig. 3). El sustrato neógeno en esta estructura describe un anticlinal asimétrico, con mayor inclinación del flanco occidental (0°/21°-0°/31°O) respecto al flanco oriental (0°/15°E-0°/20°E) y plano axial de vergencia al oeste. En concordancia con estos datos, la superficie aluvial Q₂ muestra un flanco oriental más tendido con inclinación de 4°E y un flanco occidental más corto e inclinación de 6°O. En la mencionada superficie pueden reconocerse tres gargantas epigénicas o abras de viento que destacan el crecimiento de esta estructura con posterioridad al desarrollo del nivel Q₂ (Costa 2009, Richard 2013). El abovedamiento descrito está limitado por dos escarpas subparalelas de rumbo NNE.

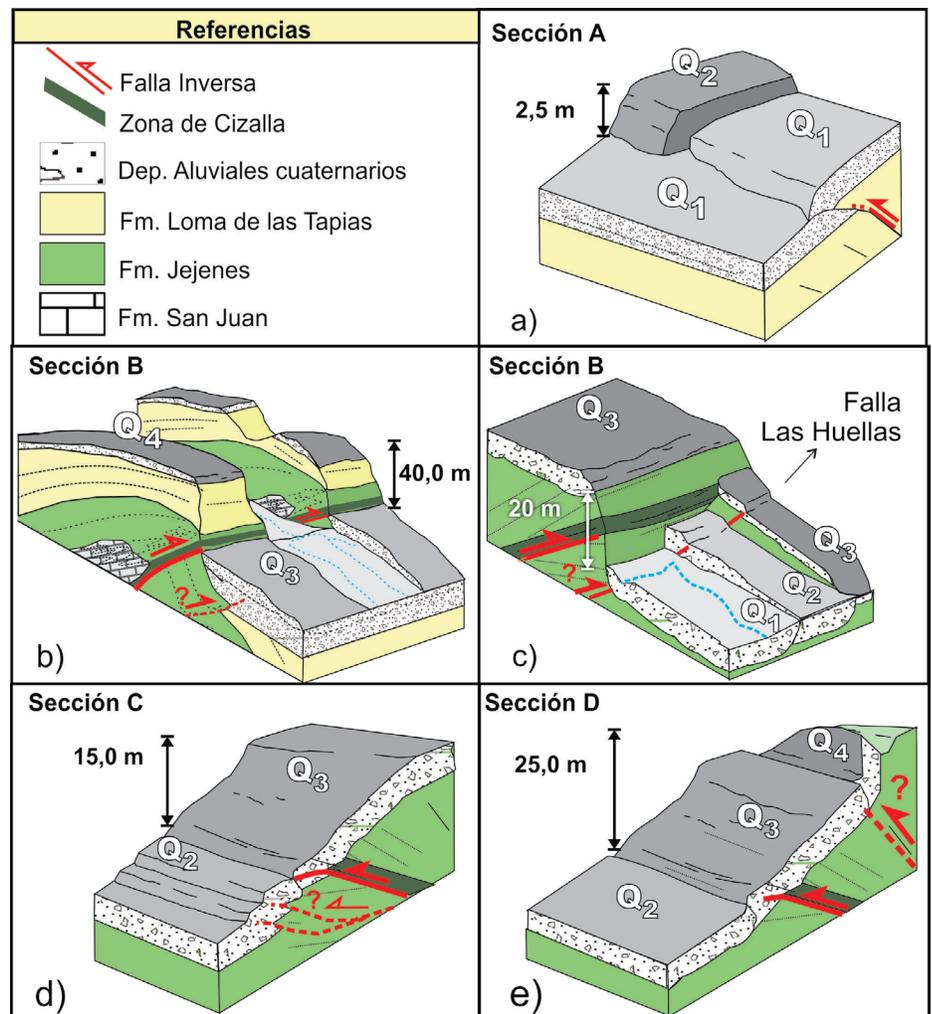


Figura 5. Bloques diagramas esquemáticos de las escarpas asociadas a la falla La Rinconada: a) Propagación de la falla La Rinconada en afloramiento y la relación con los niveles aluviales y el basamento neotectónico; b) Pliegue de la quebrada de Calizas, mostrando la presencia de un anticlinal en estratos paleozoicos y neógenos afectando al nivel Q₄; c) Quebrada del Horno. En el bloque yacente se muestran las morfologías reconocidas en el sector asociada a la falla Las Huellas; d) Propagación de la falla La Rinconada en el sector y su expresión morfológica asociada; e) Propagación de la falla La Rinconada en el sector y la presencia de los niveles Q₃ y Q₄ basculando a contrapendiente. Ver ubicación en la figura 4.

Falla Árbol Quemado (ref. 5, Fig. 3): Corresponde a una estructura de supuesto carácter inverso, con escarpa paralela al trazo de la falla La Rinconada a lo largo de ~ 1 km (Figs. 3 y 6) y localizada en el flanco oriental de una antiforma presente en el sustrato neógeno. Presenta una amplitud promedio de 2 m en el nivel aluvial Q₂ con cara al oeste y diseño en planta levemente cóncavo en dicho sentido. Si bien no se ha logrado reconocer el plano de falla, se interpreta que el mismo es coincidente con la actitud de los estratos neógenos (340°/32° NE). La presencia de depósitos finos al pie de la escarpa, puede sugerir la alteración de los cauces activos en el sector.

Sinclinal del este (ref. 6, Fig. 3): En el sector oriental se reconocieron superficies aluviales (Q₄-Q₃) preservadas a mayores cotas, determinando a una faja discontinua de cerrilladas orientadas con dirección meridional (Fig. 3). Dichos niveles muestran una disposición en batea (Fig. 7) configurando un relieve estructural invertido e indicando una deformación pos-deposicional.

Al norte de la quebrada del Horno (Fig. 3) se han identificado conglomerados atribuíbles a la Formación Mogna, dispuestos sobre una sucesión homoclinal buzante al este de la Formación Loma de las Tapias (Fig. 7, perfiles A y B). Los estratos de la Formación Mogna presentan discordan-

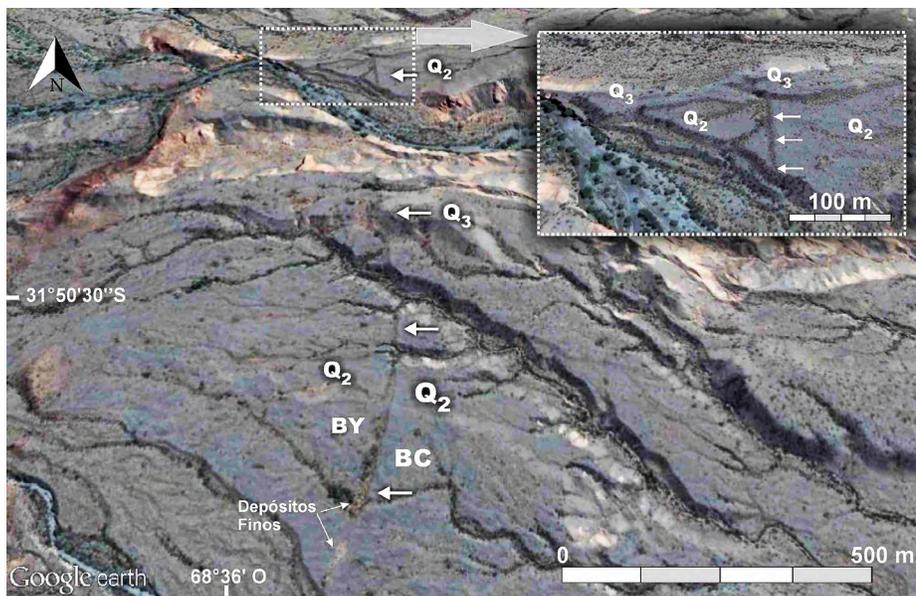


Figura 6. Imagen satelital obtenida de Google Earth de la falla Árbol Quemado. Las flechas blancas indican la escarpa, afectando a los niveles Q_2 y Q_3 . En el sector sur se destaca la acumulación de sedimentos finos. BY: bloque yaciente y BC: bloque colgante.

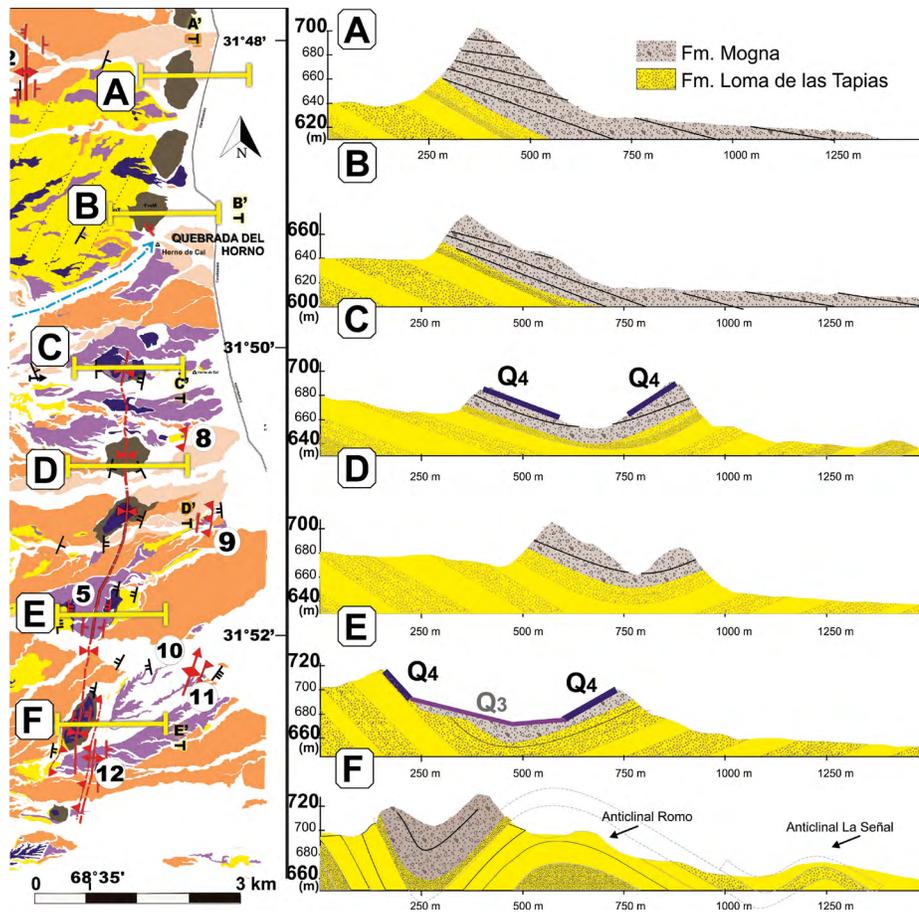


Figura 7. Perfiles seriados del sinclinal del Este, mostrando la variación latitudinal de la estructura. Al norte de la quebrada del Horno se reconoce una sucesión homoclinal buzante al este, en tanto que al sur la deformación acumulada es mayor, mostrando sucesiones de pliegues sinclinales y anticlinales. Para referencias consultar la figura 3.

cias progresivas con inclinaciones variables desde $22^\circ E$ en la base hasta $14^\circ E$ en el techo.

Al sur de la quebrada del Horno, se reconocen sinclinales colgados disconexos que involucran a los niveles cuaternarios Q_3 y Q_4 (Fig. 7, perfiles C, D, E y F). Los mismos suprayacen a un sinclinal asimétrico en los estratos neógenos, cuyas inclinaciones de flancos varían de 15° a $28^\circ E$ y 25° a $34^\circ O$ con rumbos NNE, en las exposiciones más septentrionales. A la latitud del cerro Valdivia (Fig. 1) las medidas reconocidas son de $0^\circ/66^\circ E$ y $13^\circ/47^\circ NO$ (Fig. 7. Perfil F). Según Martos (1995) esta estructura se encuentra asociada a dos fallas inversas que la limitan con vergencias opuestas.

Anticlinales de El Morrito (ref. 7, Fig. 3): Moreno Marcó (2013) describió niveles aluviales cuaternarios abovedados (Q_3 y Q_4) sobrepuestos a anticlinales en rocas neógenas (Figs. 3 y 8). La morfología de estos anticlinales es levemente asimétrica presentando flancos occidentales con mayor inclinación que los orientales y una longitud de onda de 680 m entre las charnelas aflorantes. Presentan planos axiales con orientación NNE y eje con hundimiento hacia el SSO. Esta estructura está también definida en los estratos de las Formaciones Jejenes y Loma de las Tapias, con frecuente aparición de cizalla interestratal en ambas unidades. Junto con la exposición en la quebrada de Calizas, estos son los únicos afloramientos reconocidos de rocas paleozoicas en el labio elevado de la falla La Rinconada. Los flancos de la estructura occidental en el nivel Q_3 presentan inclinaciones de $10^\circ O$ y $7^\circ E$ (Fig. 8), mientras que en el anticlinal oriental se han medido $14^\circ O$ y $5^\circ E$.

Falla Cerro Colgado (ref. 8, Fig. 3): Corresponde a una falla inversa coincidente con la estratificación de los niveles neógenos ($20^\circ/21^\circ NO$). Se estima un rechazo de inclinación de aproximadamente 2 metros en función del desplazamiento del nivel aluvial Q_3 , aunque no se ha reconocido el plano de cizalla debido a la fábrica masiva de las pelitas de la Formación Loma de las Tapias (Fig. 3, Figs. 9a y b).

Falla Carpintería (ref. 9, Fig. 3): Es una falla inversa que afecta al nivel Q_3 y presenta asociada una zona de cizalla de 40 cm de espesor con inclinación de $33^\circ O$, que cor-

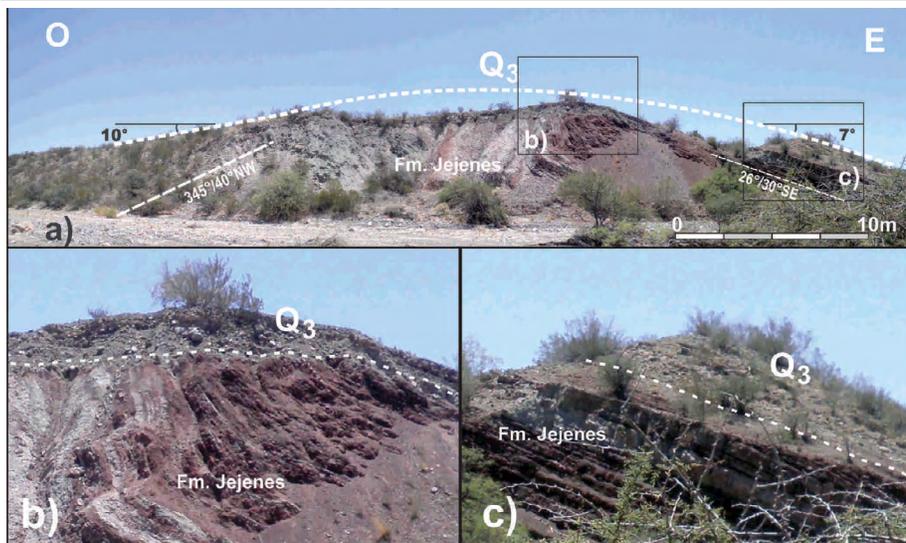


Figura 8. Anticinal occidental en el punto de referencia 7: a) Anticinal occidental, con las inclinaciones medidas en la Formación Jejenes y el nivel aluvial Q₃; b-c) Contacto erosivo (línea punteada) del nivel aluvial Q₃ sobre las pelitas varicolores de la Formación Jejenes.

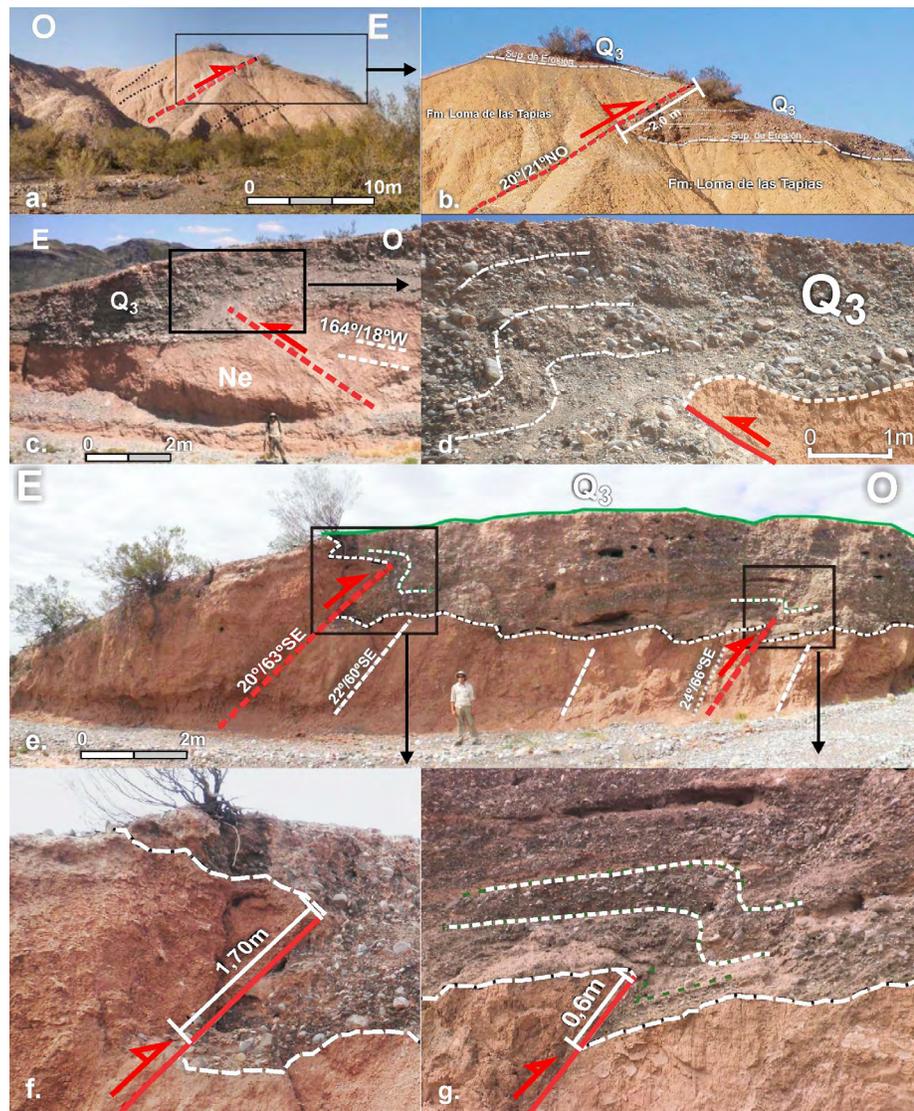


Figura 9. Fotografías de los afloramientos: a-b) Falla Cerro Colgado; c-d) Falla Carpintería; e) Fallas La Señal 1 y 2; f) Falla La Señal 1; g) falla La Señal 2.

ta en relación rampa-rampa la estratificación del sustrato neógeno (344°/18°SO). Presenta un rechazo de inclinación de 1,20 m apreciándose clastos rotados y un pliegue por propagación de falla en Q₃ que pierde expresión hacia la superficie topográfica (Fig. 9c y d).

Anticinal La Señal (ref. 10, Fig. 3): Anticinal abierto desarrollado en estratos neógenos con un eje de rumbo NNE que afecta también al nivel aluvial Q₃ generando una antiforma suave. Las actitudes de los estratos neógenos son 10°/46° NO para el flanco oeste y 32°/43° SE para el flanco este, con un eje con inmersión al SSO.

Fallas La Señal 1 y 2 (ref. 11, Fig. 3): Corresponden a dos fallas inversas sin expresión morfológica que sobreponen sedimentos neógenos sobre el nivel aluvial Q₃, en el flanco oriental del anticinal La Señal (Moreno Marcó 2013) (Fig. 9e, f y g). La actitud de la falla La Señal 1 es de 22°/63° SE con un rechazo de inclinación de 60 cm y genera un plegamiento con limbo frontal hacia el oeste en los estratos cuaternarios (Q₃) que se atenúa hacia la superficie topográfica. La falla La Señal 2 corresponde también a una estructura propagante en los depósitos aluviales cuaternarios (Q₃), con una actitud de 22°/60° SE. Es coincidente con la estratificación de las rocas neógenas y el rechazo de inclinación observado es de 1,70 m.

Anticinal Romo (ref. 12, Fig. 3): Corresponde a un abovedamiento simétrico que afecta a la superficie aluvial Q₃, con inclinaciones de ~4° para ambos flancos. No se han reconocido niveles neógenos aflorando en el sector.

Anticinal Esquinado (ref. 13, Fig. 3): Es un abovedamiento asimétrico de la superficie aluvial Q₄ que sobreyace a una estructura con geometría semejante en la Formación Loma de las Tapias, cuyo eje tiene inmersión hacia el SSE. Las inclinaciones reconocidas en la superficie Q₄ son de 11°O y 10°E.

Modelo estructural a los 31°51'25" S

La deformación pedemontana en el sector de estudio está caracterizada por fallas compresivas con rumbo submeridiano (N-S a NNE-SSW) (Figs. 1 y 3). El modelo cinemático/estructural que mejor ajusta a los datos recopilados en el campo, su-

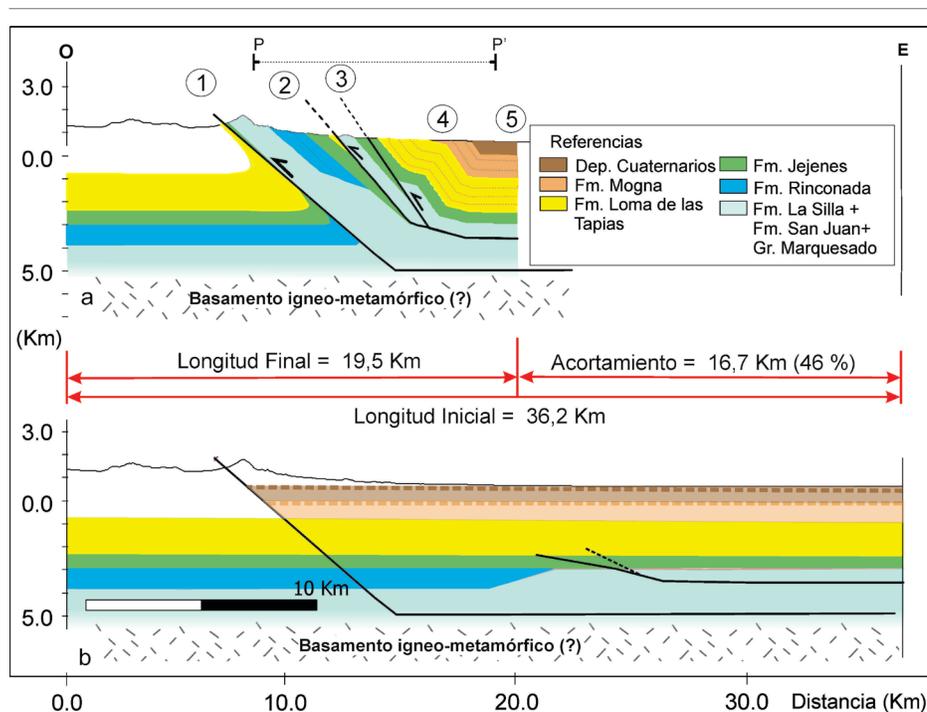


Figura 10. Modelo estructural propuesto para el extremo austral de la falla La Rinconada en la latitud del cerro Piedras de Afilas (ver traza del perfil P-P' en Fig. 3). A) Modelado forward con el software 2D Move en base a observaciones de campo y relaciones estratigráficas y estructurales indicadas en este trabajo. (1) Corrimiento Villicum-Zonda-Pedernal; (2) Falla cerro Piedras de Afilas; (3) Falla La Rinconada; (4) Sinclinal del Este (5) Cerro Valdivia. B) Estado inicial previo a la deformación. Los depósitos cuaternarios y la Formación Mogna aparecen en línea punteada asumiendo que son posteriores al ascenso de la sierra Chica del Zonda, limitada por el corrimiento Villicum Zonda.

giere una superficie de despegue para el corrimiento Villicum Zonda a unos 5 km de profundidad, próximo a la base las secuencias cambro-ordovícicas. La presencia de conglomerados grises con calizas en la Formación Mogna, sugiere que el corrimiento Villicum Zonda habría iniciado su actividad previa al Plioceno superior (Martos 1999a). A partir de geometría tipo rampa-plano producida por el corrimiento Villicum Zonda y la continuación del acortamiento, se generan una serie de corrimientos imbricados en el limbo dorsal con una secuencia de deformación de oeste a este. La falla del cerro Piedras de Afilas (FPA) se genera en la zona de mayor curvatura de la sinforma y explicaría en superficie, el contacto discordante entre las calizas de la Formación San Juan (Ordovícico) y la Formación Jejenes a estas latitudes (Fig. 3 y 11). Posteriormente se inicia la propagación de la falla La Rinconada, con una inclinación de 56° E y generando en superficie una zona de cizalla dentro de los estratos de la Formación Jejenes. En el bloque colgante de la falla La Rinconada se genera una flexura

sinclinal, representada en el sector más oriental de la zona por el Sinclinal de este. El nivel de despegue de la falla del cerro Piedras de Afilas y la falla La Rinconada se ubicaría a unos 3,8 km de profundidad, en una zona de desacople dentro secuencias cambro-ordovícicas y próximo al techo de éstas.

Se asume que las fallas menores en el bloque colgante de la falla La Rinconada probablemente expresen flexodeslizamiento confinado a las secuencias cenozoicas (Fig. 11).

Según el modelo cinemático de la Fig. 10 la falla La Rinconada podría ser el resultado de una estructura secundaria asociada a la propagación del corrimiento Villicum Zonda (Fig. 1), consistente con el modelo de fallas de acomodación en la sinforma dorsal de la sierra de Chica del Zonda (*limb-wedge thrust*, *sensu* Mitra 2002). El acortamiento determinado a partir del modelado, para las secuencias neógenas en el sector estudiado es de 16,2 km (46%). La ausencia de dataciones absolutas en los niveles neógenos involucrados y la falta de marcadores geométricos y estrati-

gráficos en el cerro Valdivia no han permitido hacer estimaciones confiables de las tasas de acortamiento. La fig. 11 muestra perfiles estructurales seriados en diferentes latitudes de la falla La Rinconada que permiten inferir las variaciones que posee esta estructura a lo largo de su trazo.

DISCUSIÓN

Control de las anisotropías preexistentes y mecanismos genéticos de las deformaciones

Según observaciones al norte de la zona de estudio (Martos 1987a, 1987b, 1995, Costa 2009) la superficie de la falla La Rinconada es paralela a la estratificación del sustrato neógeno, siendo controlada por mecanismos de cizalla interestratal. En el sector estudiado, solo han podido reconocerse exposiciones del plano de la falla La Rinconada propagando en niveles cuaternarios mediante excavaciones realizadas en la quebrada Jejenes (Costa *et al.* 2009), donde el sustrato aflorante en el bloque colgante presenta inclinaciones moderadas hacia el este (40° - 55°). Las intercalaciones pelítico-arenosas que caracterizan a la Formación Loma de Las Tapias, constituyen eficientes discontinuidades mecánicas para acomodar deslizamiento interestratal asociado a la falla La Rinconada. Por dicha razón, el predominio de inclinaciones moderadas en este sustrato rocoso explica la rectilinearidad dominante de las escarpas asociadas en el paisaje pedemontano (Fig. 1 y 3), pese a la pobre resistencia a la erosión de los estratos neógenos. Dicha característica no es usual en la impronta morfológica de fallas inversas (McCalpin y Carver 2009). Los rasgos anteriores han llevado a interpretar las deformaciones cuaternarias en diversos sectores de la Precordillera sanjuanina y sectores adyacentes como estructuras controladas por mecanismos flexodeslizantes (Costa *et al.* 1999, Meigs *et al.* 2006, Vergés *et al.* 2007, Cisneros *et al.* 2010), especulando que dichas estructuras expresan el acortamiento de la cubierta neógena, con desacople mecánico en el techo de las unidades paleozoicas (Meigs *et al.* 2006, Rockwell *et al.* 2014). Las observaciones realizadas muestran que al menos en los sectores represen-

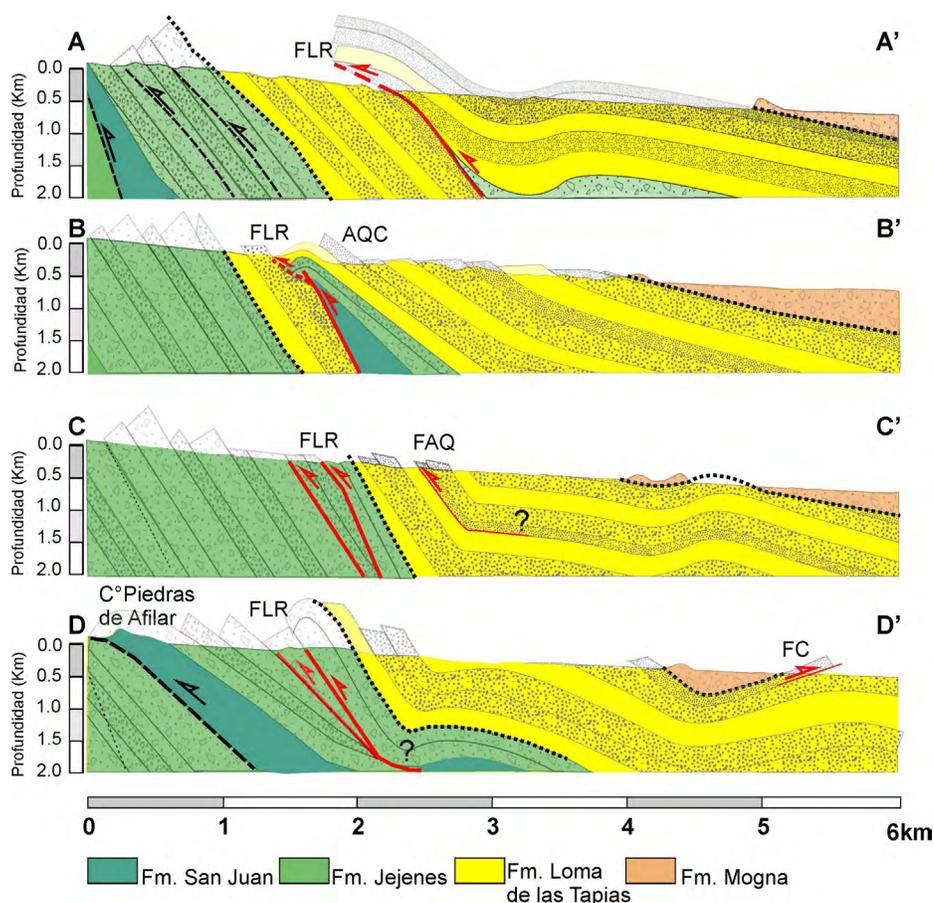


Figura 11. Perfiles estructurales seriados del basamento en la zona de estudio (ver ubicación en la figura 3). (FLR) Falla La Rinconada, (AQC) Anticinal de la quebrada de Calizas, (FAQ) Falla Árbol Quemado, (FC) Falla Carpintería. Interpretación estructural en base a los datos y observaciones de campo del presente trabajo. Fallamientos precuaternarios: líneas a rayas negras. Fallamientos cuaternarios: líneas continuas rojas, discordancias: líneas punteadas.

tados por las secciones B, C y D (Figs. 3 y 5), los estratos paleozoicos dominados por comportamiento frágil (Formación Jejenes y en algunos casos la Formación San Juan) están involucrados en la deformación neotectónica asociada a la falla La Rinconada. La falla La Rinconada se encuentra enraizada en dicho sustrato y posiblemente también en niveles corticales más profundos (Figs. 10 y 11). No se ha reconocido una distribución espacial de la deformación cuaternaria en planos de fallas subparalelos, como es característico de las estructuras flexodeslizantes (Yeats *et al.* 1997), sino que el desplazamiento cuaternario está localizado en cercanías del trazo de la falla La Rinconada donde se exponen núcleos de rocas paleozoicas. Estas características no permiten interpretar a la falla La Rinconada como una estructura flexodeslizante *sensu stricto* o al menos con predominio de este mecanismo.

El flexodeslizamiento podría ser un mecanismo complementario para acomodar la deformación cenozoica distribuida en el bloque colgante la falla La Rinconada, como acortamiento en el limbo dorsal de un corrimiento (*back-limb tightening*) (Fig. 11). Ello guarda semejanza con la deformación cuaternaria descrita en el cerro Salinas (Cisneros *et al.* 2010) y sus relaciones con la estructura causativa principal (Vergés *et al.* 2007). Las estructuras distribuidas al este del trazo de la falla La Rinconada presentan menor continuidad, coinciden con la estratificación neógena y han propagado en las unidades aluviales cuaternarias con desplazamientos generalmente no superiores al metro o sin expresión actual en el relieve. Los suaves plegamientos de la cobertura aluvial cuaternaria y su coincidencia con pliegues abiertos infrayacentes en la Formación Loma de Las Tapias (Figs. 7 y 9) destacan

el control de las estructuras precuaternarias, donde éstas han podido ser observadas. Ello apunta a considerar que el eje de acortamiento principal en esta región no ha experimentado variaciones apreciables durante el Neógeno. El diseño ligeramente cóncavo hacia el oeste del trazo de la falla La Rinconada, también destaca la orientación de los estratos paleozoicos (Fig. 3). Existen otros corrimientos al oeste de la falla La Rinconada, por ejemplo, en el cerro Piedra de Afilor o a la latitud de la quebrada de Las Minas con disposición semejante a la falla La Rinconada. La actividad cuaternaria de estas estructuras en el sector occidental del piedemonte no ha podido documentarse, pero se asume que podrían estar genéticamente vinculadas al corrimiento Villicum Zonda (Figs. 3, 10 y 11).

Implicancias sismogénicas

La falla La Rinconada ha sido indicada como la posible fuente del terremoto Mw 6.8 que afectó esta zona en 1952 (INPRES 1982, Bastías *et al.* 1984, Martos 1987a, Tello y Perucca 1993, Alvarado y Beck 2006) y su importancia como fuente sísmica es materia de debate. Si se tratara de una falla flexodeslizante, su nivel de despegue sería superficial y solo acomodaría el acortamiento de la cobertura neógena, careciendo por lo tanto de importancia sismogénica. Bajo esta interpretación, la falla La Rinconada correspondería a una estructura secundaria que acomoda complementariamente el acortamiento generado por una fuente sísmica primaria como el corrimiento Villicum Zonda (Figs. 1 y 10).

Las observaciones aquí expuestas indican que las rocas paleozoicas se encuentran involucradas en la zona de deformación de la falla La Rinconada, sugiriendo la imposición de esta estructura en rocas con mayor capacidad de almacenamiento de energía elástica y a mayor profundidad que el espesor máximo de la cubierta cenozoica. La figura 10 muestra una interpretación de la posible geometría del subsuelo de la falla La Rinconada, mostrando su vinculación con una superficie de despegue en el sector superior de la secuencia cambro-ordovícica. Sus potenciales áreas de ruptura y capacidad sismogénica serían en consecuencia mayores que una

estructura flexodeslizante con desacople en la interfase Paleozoico-Cenozoico.

Por otra parte, la profundidad hipocentral de 10-12 km asignada al sismo Mw 6.8 de 1952 (Alvarado y Beck 2006) es mayor que la profundidad de la superficie de despegue aquí interpretada para la falla La Rinconada (Fig. 10) Por lo tanto, se considera más probable la asociación de este evento con estructuras localizadas más al oeste y/o despegues más profundos del basamento ígneo-metamórfico (pampeano-cuyano?).

Asimismo, se destaca que la falla La Rinconada no sería necesariamente la única estructura que acomoda la deformación cuaternaria al este del corrimiento morfológico principal (corrimiento Villicum-Zonda-Pederal). Existen otras estructuras ubicadas al oeste de la falla La Rinconada que repiten la secuencia estratigráfica paleozoica (Heim 1948) (Fig. 11) y en las que no ha sido posible documentar deformaciones neotectónicas por falta de marcadores estratigráficos adecuados.

Localización espacio-temporal de las deformaciones neotectónicas en Precordillera Oriental

Zapata y Allmendinger (1997) interpretaron que la secuencia de deformación neógena de la Precordillera Oriental a los 30°S corresponde a un modelo tipo "break-back sequence" (Morley 1986), en la cual la secuencia de deformación es contraria a la vergencia de las estructuras. Al sur de 31°S, numerosos trabajos han coincidido en destacar que las deformaciones cuaternarias más importantes de la Precordillera Oriental se concentran principalmente en el sector dorsal de la lámina de corrimiento que exhuma los cordones serranos de esta morfoestructura (Bastías *et al.* 1984, Perucca y Paredes 2002, Costa *et al.* 1999, 2006b, Krugh y Meigs 2001, Siame *et al.* 2005, Meigs *et al.* 2006, Vergés *et al.* 2007, entre otros). Meigs *et al.* (2006) y Rockwell *et al.* (2014) han postulado además que dichos corrimientos no presentan evidencias de deformación cuaternaria.

La expresión en el paisaje pedemontano del trazo de la falla La Rinconada a lo largo de ~ 26 km sugiere una concentración de la deformación cuaternaria en

esta estructura, aunque de menor importancia morfogénica que el corrimiento marginal de la sierra Chica del Zonda, sugiriendo una migración hacia el este de la actividad más reciente (*break-back sequence*). Dilucidar fehacientemente si existe una polaridad en la migración de la actividad tectónica en Precordillera Oriental o si la lámina de corrimiento se deforma internamente de manera aleatoria, requiere de un estudio comparativo con el corrimiento Villicum Zonda (Fig. 1). En este último las evidencias de deformaciones recientes son difíciles de reconocer y estudiar debido a las importantes tasas de sedimentación-erosión imperantes. Esta cuestión es de importancia para caracterizar la amenaza sísmica del sector, porque las mayores aceleraciones durante un terremoto se concentran en el labio elevado de la fuente activada. El modelo de *break-back sequence* implica suponer que las estructuras potencialmente más capaces podrían migrar hacia el subsuelo del valle de Tulum, donde han sido definidas estructuras no emergentes del Sistema de Fallas de Tulum (Zabrano y Suvires 2008, Rodríguez *et al.* 2016, 2018).

CONCLUSIONES

El trazo de la falla La Rinconada presenta un diseño en planta rectilinear, ligeramente cóncavo al oeste y constituye el rasgo morfológico más notorio en el sector del piedemonte estudiado. Su expresión está destacada por escarpas contrapendiente que afectan a niveles aluviales cuaternarios y presentan amplitudes variables entre 1 y 40 m. En función de los rasgos morfológicos que la caracterizan se han definido cuatro secciones a lo largo de la traza expuesta de la falla La Rinconada. La sección más septentrional (A) presenta las escarpas mejor preservadas y afecta a los niveles aluviales más jóvenes (¿Holoceno?). En las otras secciones, las escarpas son más discontinuas o están menos definidas, desapareciendo la expresión en el terreno de la falla La Rinconada a la latitud de la quebrada de La Flecha.

Deformaciones cuaternarias menores aparecen distribuidas en el bloque colgante de la falla La Rinconada, en un cinturón

elongado según el rumbo de la estratificación (Figs. 3 y 7). Este sector presenta un ancho variable entre 3 km en el norte de la zona de estudio, hasta aproximadamente 8 km a la latitud de la quebrada La Flecha. Dicha variación es concordante con un cambio de rumbo de la falla La Rinconada (de N-S a NE-SO).

La orientación de las escarpas y la actitud de las fallas responsables de su generación se disponen paralelas a los estratos. El control de las discontinuidades mecánicas infrayacentes en la geometría de la falla La Rinconada, explica la continuidad areal y la linearidad de su trazo, atributo poco frecuente en la expresión morfológica de fallas inversas (McCalpin y Carver 2009). Sin embargo, se interpreta que la falla La Rinconada no responde a un mecanismo flexodeslizante *sensu stricto*. La exposición del basamento paleozoico en la zona de falla y la concentración de la deformación cuaternaria en la falla La Rinconada, tornan poco probable el predominio de este mecanismo. Se considera, no obstante, que el flexodeslizamiento ha sido un mecanismo complementario y sincrónico a la deformación de la falla La Rinconada, que ha contribuido a acomodar el acortamiento de la cubierta cenozoica expuesta en el bloque colgante mediante pliegues en su mayoría amplios y fallas de menor continuidad areal o con menores desplazamientos. La geometría subsuperficial interpretada para la falla La Rinconada y deformaciones asociadas, permiten postular que el despegue de esta estructura involucra a niveles paleozoicos (Figs. 10 y 11). Por lo tanto, a diferencia de una estructura flexodeslizante, se concluye que la falla La Rinconada debe ser considerada como una fuente con capacidad sismogénica propia.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado en el marco del proyecto PROICO 03-0318 de la Universidad Nacional de San Luis. Los autores de este trabajo agradecemos al Dr. Víctor H. García y a un revisor anónimo por sus valiosos aportes para mejorar el manuscrito. Agradecemos también al Dr. Fernando Hongn por su cuidadosa guía del proceso editorial.

REFERENCIAS

- Ahumada, E. y Costa, C. 2009. Antithetic linkage between oblique Quaternary thrusts at the Andean front, Argentine Precordillera. *Journal of South American Earth Sciences* 28: 207-216.
- Alvarado, P. y Beck, S. 2006. Source characterization of the San Juan (Argentina) crustal Earthquakes of 15 January 1944 (Mw 7.0) and 11 June 1952 (Mw 6.8): Earth and Planetary Science Letters 243: 615-631.
- Alvarado, P., Pardo, M., Gilbert, H., Miranda, S., Anderson, M., Saez, M. y Beck, S. 2009. Flat-slab subduction and crustal models for the seismically active Sierras Pampeanas region of Argentina. En: Kay, S., Ramos, V. y Dickinson, W. (Eds.), *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. Geological Society of America, Memoir 204: 261-278.
- Amos, A. 1954. Estructura de las Formaciones Paleozoicas de La Rinconada, Pie Oriental de la sierra Chica de Zonda, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 9: 2-35.
- Amos, A. J y Fernández, J. 1977. Estructura del cerro Bola al NE de la Quebrada de La Flecha. San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 32: 241-247.
- Archangelsky, S. Azcuy, C. González, C. R. y Sabatini, N. 1987. Correlación general de biozonas. En: Archangelsky, S. (ed.), *El Sistema Carbonífero en la República Argentina*. Academia Nacional de Ciencias: 293-300, Córdoba.
- Baldis, B., Beresi, M., Bordonaro, O. y Vaca, A. 1982. Síntesis evolutiva de la Precordillera Argentina. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 4: 399-445, Buenos Aires.
- Bastías, H., Weidman, N. y Pérez, M. 1984. Dos zonas de fallamiento plio-cuaternario en la Precordillera de San Juan. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 329-341, San Carlos de Bariloche.
- Bastías, H., Uliarte, E., Paredes, J., Sanchez, A., Bastías, J., Ruzzycki, L. y Perucca L. 1990. Neotectónica de la provincia de San Juan. En: Bordonaro, O.L., *Geología y recursos naturales de la provincia de San Juan*. Asociación Geológica Argentina, 228-245, San Juan.
- Bellahsen, N., Sebrier, M. y Siame, L. 2016. Crustal shortening at the Sierra Pie de Palo (Sierras Pampeanas, Argentina): near-surface basement folding and thrusting. *Geological Magazine* 153: 992-1012.
- Bercowski, F., Berenstein, L., Johnson, N., y Naeser, C.W. 1986. Sedimentología, magnetoestratigrafía y edad isotópica del Terciario en Loma de las Tapias, Ullum, Prov. de San Juan. 1° Reunión Argentina Sedimentología, Actas 1: 169-172, La Plata.
- Bordonaro, O. 1980. El Cámbrico en la quebrada de Zonda, Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 35: 26-40.
- Cisneros, H., Costa, C. y Gardini, C. 2010. Análisis neotectónico del área cerro Salinas, Departamento de Sarmiento, provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67: 439-449.
- Comínguez, H. y Ramos, V. 1991. La estructura profunda entre Precordillera y Sierras Pampeanas de la Argentina: Evidencia de la sísmica de reflexión profunda. *Revista Geológica de Chile* 18: 3-14.
- Cortés, J., Vinciguerra, P., Yamín, M. y Pasini, M. 1999. Tectónica Cuaternaria en la región andina del nuevo Cuyo. En: R. Caminos (ed.), *Geología Argentina*. Subsecretaría de Minería de la Nación, Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 29, 760-778, Buenos Aires.
- Cortés, J., Casa, A., Pasini, M., Yamin, M., Terrizzano, C., 2006. Fajas oblicuas de deformación neotectónica en Precordillera y Cordillera Frontal (31°30'-33° 30' LS). Controles paleotectónicos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61: 639-646.
- Costa, C. 2009. Falla La Rinconada (AR-22). En: Proyecto Multinacional Andino. Geociencia para las comunidades andinas, Atlas de deformaciones cuaternarias de los Andes. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional 7: 104-110. Santiago.
- Costa C., Rockwell, T., Paredes, J. y Gardini, C. 1999. Quaternary deformations and seismic hazard at the Andean Orogenic Front (31°-33°, Argentina): A paleoseismological perspective. 4° International Symposium on Andean Geodynamics, Extended Abstracts: 187-191, Paris.
- Costa, C., Gardini, C., Diederix, H. y Cortes, J. 2000. The Andean thrust front at Sierra de Las Peñas, Mendoza, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 13: 287-292.
- Costa, C., Audemard, F., Bezerra, F., Lavenu, A., Machette, M. y Paris, G. 2006a. An overview of the main Quaternary deformation of South America. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61: 461-479.
- Costa, C., Gardini, C., Diederix, H., Cisneros, H. y Ahumada, E. A. 2006b. The active Andean orogenic front at the Southernmost Pampean flat-slab. *Backbone of the Americas*, Abstract with Programs 15-1, Mendoza.
- Costa, C., Rockwell, T., Gardini, C., Ahumada, E., Meigs, A., Ragona, D., Ricci, W. y Graña, G. 2009. New data on the quaternary activity of the La Rinconada fault, Precordillera of San Juan. 14° Reunión de Tectónica, Resúmenes: 15, Río Cuarto.
- Cuerda, A.J., Cingolani, C., Varela, R. y Schauer, O. 1981. Geología de la Sierra de Mogna, provincia de San Juan. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 139-158, San Luis.
- Gardini, M. 1993. Estructura superficial y profunda del valle de Zonda, Precordillera de San Juan. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 93-99, Mendoza.
- Groeber, P. 1944. Movimientos tectónicos contemporáneos. Universidad Nacional de La Plata, Notas del Museo de La Plata, Geología 9: 263-375.
- Harrington, H. 1971. Descripción geológica de la hoja 22c, Ramblón, Provincia de San Juan y Mendoza. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 114: 1-81.
- Hedrick, K., Owen, L., Rockwell, K., Meigs, A., Costa, C., Ahumada, E., Caffee, M. y Masana, E., 2013. Timing and nature of alluvial fan and strath terrace formation in the Eastern Precordillera of Argentina. *Quaternary Science Reviews* 80: 143-168.
- Heim, A. 1948. Observaciones tectónicas en La Rinconada. Dirección de Minas y Geología. Secretaría de Industria y Comercio de la Nación. Dirección de Minas y Geología, Boletín 64: 1-41.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) 1977. Zonificación sísmica de la República Argentina. Publicación Técnica 5, 38p, San Juan.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). 1982. Microzonificación sísmica del Valle de Tulum, Provincia de San Juan. Resumen ejecutivo 120 p.
- Keidel, J. 1938. Ubre die "Gondwaniden" argentinien. *Geologischen Rundschau* 30 (1/2): 148-249. Stuttgart. En: Ramos, V. y Vujovich, G. (eds.), Hoja Geológica 3169-IV-

- San Juan, provincia de San Juan. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 243: 82 p, Buenos Aires.
- Kelly, J.G. 1962. Geología de las sierras de Moquina y perspectivas petrolíferas, Dto. De Jáchal, Provincia de San Juan. YPF, Gerencia Exploración (inédito), Buenos Aires. En: Ramos, V. y Vujovich, G. (eds.). Hoja Geológica 3169-IV -San Juan, provincia de San Juan. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 243: 82 p, Buenos Aires.
- Krugh, W. y Meigs, A. 2001. Secondary deformation associated with active basement-involved folding, Late Quaternary flexural-slip faulting and kink-band migration, Sierra de Villicum, San Juan, Argentina. Geological Society of America, Abstracts with Programs 33: 393.
- Lara, G., Perucca, L., Rothlis, M., Pantano, A. y Sáez, M. 2018. Quaternary tectonic activity of Maradona Fault System, Central Cordillera, Argentina. *Andean Geology* 45: 145-160.
- Martos, L. 1987a. Evidencia de movimientos neotectónicos en una terraza de edad Holocena, La Rinconada-San Juan. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 263-265, San Miguel de Tucumán.
- Martos, L. 1987b. La neotectónica como control del paisaje cuaternario, Pocito -San Juan. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 275-278, San Miguel de Tucumán.
- Martos, L. 1995. Análisis morfo-estructural de la faja pedemontana oriental de las sierras de Marquesado, Chica de Zonda y Pederal, su aplicación para prevenir riesgos geológicos: provincia de San Juan, Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de San Juan (inédita), 544 p., San Juan.
- Martos, L. 1999a. Dinámica morfoestructural del paisaje cuaternario en el piedemonte oriental de Cordillera Oriental, San Juan. 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 275-278, Salta.
- Martos, L. 1999b. Cronoestratigrafía de los niveles pedemontanos cuaternarios del este de Cordillera Oriental. 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 279-282, Salta.
- Mc Calpin, J. y Carver, G. 2009. Paleoseismology of Compressional Tectonic Environments. En: McCalpin, J. (ed.), *Paleoseismology*. International Geophysics Series 95: 315-421, California.
- Meigs, A. y Nabelek, J. 2010. Crustal-scale pure shear foreland deformation of western Argentina. *Geophysical Research Letters* 37 L11304. doi: 10.1029/2010GL043220
- Meigs, A., Krugh, W., Schiffman, C., Vergés, J. y Ramos, V. 2006. Refolding of thin-skinned thrust sheets by active basement-involved thrust faults in the Eastern Cordillera or western Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61 (4): 589-603.
- Milana, J. 1990a. Facies y paleohidrología de conglomerados aluviales Plio-Pleistocenos (San Juan, Argentina): evidencias de fases climáticas en los Andes a los 31°sur. 2° Simposio sobre el Terciario de Chile: 215-224, Concepción.
- Milana, J. 1990b. Secuencias sedimentarias aluviales, subsidente y tectonismo en la cuenca de antepaís andina de la provincia de San Juan, Argentina. 2° Simposio sobre el Terciario de Chile: 205-214, Concepción.
- Mitra, S. 2002. Fold-Accommodation Faults. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 86: 671-693.
- Moreno Marcó, C. A. 2013. Neotectónica del piedemonte de la Cordillera Oriental entre 31°51' S y 31°55' S, provincia de San Juan. Trabajo final de licenciatura, Universidad Nacional de San Luis (inédito). 116 p., San Luis.
- Morley, C.K. 1986. A classification of thrust fronts. *American Association of Petroleum Geologists* 70: 12-25.
- Ortiz, A. y Zambrano, J. 1981. La Provincia Geológica Cordillera Oriental. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 59-74, San Luis.
- Paredes, J. y Perucca, L. 2000. Fallamiento cuaternario en la depresión de Matagusanos, San Juan, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 55: 23-30.
- Peralta, S. 1987. Graptofaunas del Llanvirniano inferior (Ordovícico) y Ludoviano inferior (Silúrico) en la Formación Rinconada, Cordillera Oriental de San Juan. 4° Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía 1: 50-66.
- Perucca, L. y Onorato, R. 2011. Fallas con actividad cuaternaria en el corredor tectónico Matagusanos -Maradona -Acequión entre los ríos de la flecha y del agua, Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68: 39-52.
- Perucca, L., y Paredes, J. 2002. Peligro sísmico en el departamento Albardón y su relación con el área de fallamiento La Laja, provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57: 45-54.
- Perucca, L. y Vargas, N. 2014. Neotectónica de la provincia de San Juan, centro-oeste de Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66: 291-304.
- Perucca L., Audemard, F., Pantano, A., Vargas, H., Avila, C. y Onorato, M. 2012. Vergencias opuestas cuaternarias en el área de Acequión, Cordillera de San Juan (Argentina). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 25: 5-15.
- Ramos, V. Cegarra, M., Lo Forte, G. y Comín-guez, A. 1997. El frente orogénico en la sierra de Pederal (San Juan, Argentina): su migración a través de los depósitos sinorogénicos. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 3: 1709-1713.
- Ramos, V., Cristallini, E., Pérez, D. 2002. The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Richard, A. 2013. Neotectónica del piedemonte de la Cordillera Oriental entre 31°47'50" S y 31°51'10" S, provincia de San Juan. Trabajo final de licenciatura, Universidad Nacional de San Luis (inédito), 119 p., San Luis.
- Rockwell, T., Ragona, D., Meigs, A., Owen, L., Costa, C. y Ahumada, E. 2014. Inferring a thrust-related earthquake history from secondary faulting: A long rupture record of La Laja Fault, San Juan, Argentina. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 104 (1): 269-284.
- Rodríguez, A., Christiansen, R., Suvires, G., Lince, F. y Martínez, M. 2016. Structural features of the southern Tulum Fault System, western central Argentina, through gravimetric data and geomorphologic analyses. *Journal of South American Earth Sciences* 72: 159-168.
- Rodríguez, A., Martínez, P., Suvires, G. 2018. Water Resource Distribution and Tectonics in the Tulum Valley, Western Central Argentina. *International Journal of Hydrology* 2 (1): 00051.
- Rolleri, E. 1969. Rasgos tectónicos generales del Valle de Matagusanos y de la zona entre San Juan y Jocolí. Provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 24: 498-412.
- Serafini, R., Bustos, N. y Contreras, V. 1986. Geología de la Formación Loma de Las Tapias, Quebrada de Ullum, provincia de San Juan. 1° Jornadas sobre Geología de Cordillera. Asociación Geológica Argentina, Serie A, Memoria y Reunión 2: 77-82, Buenos Aires.

- Siame, L., Bellier, O., Sébrier M., Bourlès, D., Leturmy, P., Perez, M. y Araujo, M. 2002. Seismic hazard reappraisal from combined structural geology, geomorphology and cosmic ray exposure dating analyses: The Eastern Precordillera thrust system (NW-Argentina). *Geophysical Journal International* 150: 241-260.
- Siame, L., Bellier, O., Sebrier, M. y Araujo, M. 2005. Deformation partitioning in flat subduction setting: Case of the Andean Forelands of western Argentina (28°S-33°S). *Tectonics* 24 TC5003.
- Siame, L., Bellier, O. y Sebrier, M. 2006. Active tectonics in the Precordillera Argentine and western Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61: 604-619.
- Siame, L., Sebrier, M., Bellier, O., Bourlès, D., Costa, C., Ahumada, E., Gardini, C., Cisneros, H. 2015. Active basement uplift of Sierra Pie de Palo (Northwestern Argentina): rates and inception from ¹⁰Be cosmogenic nuclide concentrations. *Tectonics* 34: 1129-1153.
- Stappenbeck, R. 1910. La Precordillera de San Juan y Mendoza. *Anales Ministerio de Agricultura. Sección Geología, Mineralogía y Minería* 4: 1-187.
- Tello, G. y Perucca, L. 1993. El sistema de fallamiento Precordillera Oriental y su relación con los sismos históricos de 1944 y 1952, San Juan, Argentina. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 246-251, Mendoza.
- Uliarte, E., Bastías, H. y Ruzycki, L. 1987. Morfología y neotectónica en el cerro La Chilca, Pedernal, Provincia de San Juan, Argentina. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1:227-230.
- Vergés, J., Ramos, V., Meigs, A., Cristallini, E., Bettini, F. y Cortés, J. 2007. Crustal wedging triggering recent deformation in the Andean thrust front between 31°S and 33°S: Sierras Pampeanas-Precordillera interaction. *Journal of Geophysical Research* 112 B03S151: 1-22.
- von Gosen, W. 1992. Structural evolution of the Argentine Precordillera: the Río San Juan section. *Journal of Structural Geology* 14 (6): 643-667.
- Yeats, R. Sieh, K. y Allen, C. 1997. The geology of earthquakes. Oxford University Press, 568 p., Oxford.
- Zambrano, J. y Suvires, G. 2008. Actualización en el límite entre Sierras Pampeanas Occidentales y Precordillera Oriental, en la provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63: 110-116.
- Zapata, T. y Allmendinger, R. 1993. Central and Eastern Precordillera in the Jáchal area: the interaction of two systems of opposing vergence. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3:149-159, Mendoza.
- Zapata, T. y Allmendinger, R. 1996. Thrust front zone of the Precordillera, Argentina: A thick-skinned triangle zone. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 80: 359-381.
- Zapata, T. y Allmendinger, R.W. 1997. Evolución de la deformación del frente de corrimiento de la Precordillera, provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 52: 115-131.

Recibido: 18 de septiembre, 2018

Aceptado: 5 de febrero, 2019