

ESTUDIOS GEOELÉCTRICOS DE SUBSUELO SOBRE ESTRUCTURAS VINCULADAS A LA FALLA EL TIGRE, SAN JUAN

Gisel PERI, Sabrina FAZZITO, Gonzalo BELLO CAMILLETI, Augusto RAPALINI y José M. CORTÉS

¹ Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA), Universidad de Buenos Aires

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires

RESUMEN

La Precordillera Argentina constituye la región con mayor actividad sísmológica del país. En el margen occidental de la Precordillera Occidental sanjuanina se localiza la falla El Tigre. Es una falla regional de rumbo N-S de desplazamiento oblicuo con componente dextral y constituye una estructura muy singular que preserva significativos marcadores geomórficos de desplazamiento. En la parte central de la falla El Tigre se destacan estructuras con dirección ~NO-SE que controlan el acomodamiento de la deformación y que responden a estructuras del basamento. En el presente trabajo se realizaron dos perfiles geoelectricos sobre lineamientos oblicuos y sobre estructuras secundarias asociadas. Los lineamientos están vinculados a fallas subverticales que afectan al basamento neógeno y reafirman una posible cinemática de rumbo sinistral como demuestran recientes estudios paleomagnéticos en rocas neógenas y depósitos pleistocenos de la zona, así como estructuras homólogas regionales de la Precordillera. Esta deformación sería pliocena a pleistocena temprana. En el bloque bajo oriental de la falla del Tigre se identificaron lomadas escalonadas y sigmoidales que exponen basamento neógeno y depósitos pleistocenos y que están vinculadas a fallas subverticales que ascienden y flexuran el sustrato. En su conjunto, estas estructuras constituyen una faja de cizalla dextral limitada por la falla El Tigre al oeste y por un frente oriental NNO-SSE al este y habrían estado activas hasta el Pleistoceno tardío. Las evidencias geofísicas y geológicas presentadas confirman la complejidad de la deformación por rotación de múltiples bloques menores asociada a la falla El Tigre y la importancia de estructuras oblicuas que controlan la cinemática de la deformación.

Palabras clave: Tomografía eléctrica resistiva, neotectónica, Precordillera.

ABSTRACT

Geoelectrical study on structures associated to El Tigre fault, San Juan.

The Precordillera Argentina is the region with the greatest seismic activity in the country. El Tigre fault extends through the western margin of the San Juan Precordillera and it is an N-S trend regional strike-slip fault with dextral heading component that constitutes a unique structure due to a good preservation of geomorphic displacement markers. The central part of the El Tigre fault shows several ~ NO-SE structures that seem to control the deformation related to accommodation in response to basement structures. This work presents two geoelectric profiles through oblique lineaments and on associated secondary structures. The lineaments related to subvertical faults affect the Neogene basement with no apparent tilt displacement and the kinematics was inferred by comparison with homologous structures of the Precordillera. This deformation would be Pliocene to early Pleistocene, according with recent paleomagnetic results in neogene and pleistocene rocks. Right-step sigmoidal folds at the eastern lower block of the El Tigre fault expose Neogene basement and Pleistocene deposits, due to an uplift and flexure of the substrate. The geoelectric profiles suggest that the folds are in response to subvertical faults activity. These structures are consistent with a dextral shear band bounded to the west and to the east by the El Tigre fault and a NNO-SSE fault, respectively. This deformation would be active until the late Pleistocene. The presented geophysical and geological evidences confirm the complexity of the deformation by rotation of multiple smaller blocks associated to the El Tigre fault and the importance of oblique structures that control the kinematics of the deformation.

Keywords: Electrical resistivity tomography, neotectonics, Precordillera.

INTRODUCCIÓN

La tomografía eléctrica es un método geofísico aplicado al modelado del subsuelo, que permite caracterizar la distribución de la re-

sistividad hasta profundidades máximas de aproximadamente cien metros. Particularmente, la geología utiliza esta técnica para la identificación de horizontes geoelectricos correspondientes a niveles geológicos, de

superficies interstratales y principalmente, de estructuras como fallas, su distribución, geometría y en ocasiones el rechazo vertical aparente. A pesar de que el relevamiento de un perfil geoelectrico y obtención del mo-

delo final, son procesos expeditivos, esta técnica ha sido escasamente aprovechada en el estudio de fallas cuaternarias (Caputo *et al.* 2003, Colella *et al.* 2004, Nguyen *et al.* 2005, Bufford *et al.* 2012). Sin embargo, fue exitosamente aplicada para el estudio de estructuras neotectónicas tanto en la Precordillera Sur (Terrizzano 2010, Terrizzano *et al.* 2008, 2010, 2012) como en el margen occidental de la Precordillera, particularmente en la falla El Tigre (Fazzitto *et al.* 2009, 2013, Fazzitto 2011, Bello Camilletti 2012), estructura principal del área de estudio del presente trabajo.

La falla El Tigre se extiende en el margen occidental de la Precordillera, provincia de San Juan, y se ubica en una región con la mayor actividad sísmológica de Argentina (INPRES, 1977) (Fig. 1). Es una falla cuaternaria de desplazamiento oblicuo con una componente de rumbo dextral (INPRES, 1982, Bastías *et al.* 1984, 1990, Bastías y Uliarte 1988, Siame *et al.* 1997a, b, 2006, Cortés *et al.* 1999, Pérez y Costa 2011, Fazzitto *et al.* 2013, 2016), de carácter regional y un rumbo aproximado N-S. La falla El Tigre manifiesta transcurrencia dextral en su segmento sur (Fig. 1b) mediante canales desviados (*offset drainage channels*) (Siame *et al.* 1997a, b) y en su segmento central (Fig. 1b), mediante curvaturas transtensivas que originan ciénagas de falla (*sag ponds*) y curvaturas transpresivas que originan dorsos de presión (*pressure ridges*) (Bastías *et al.* 1984, Fazzitto *et al.* 2013). El origen transtensivo y transpresivo de estos rasgos geomórficos fue comprobado por Fazzitto *et al.* (2013) mediante estudios de subsuelo que demostraron su vinculación con fallas de alto ángulo. La falla El Tigre jugaría un importante rol en la evolución sismotectónica de la zona en estas latitudes. Varios modelos, aún en discusión, proponen que la falla El Tigre acomodaría gran parte de la componente de rumbo dextral causada por el vector de convergencia oblicua entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana (Siame *et al.* 1997b, 2006). Un rasgo notable regional en la parte central de la falla El Tigre, es la presencia de varios lineamientos y fallas inferidas oblicuas a la falla principal, de dirección ~NO-SE, que parecen controlar el acomodamiento de la deformación y la segmentación de la misma, y serían la expresión en superficie de estructuras del basamento (Fazzitto *et al.* 2013) (Figs. 1 y 2). En esa misma dirección

~NO-SE, en el centro de la Precordillera, se describe la zona de falla Hualilán (Fig. 1b) con componente de desplazamiento sinistral (Cortés *et al.* 2014, Oriolo *et al.* 2014, 2015) que coincide con cambios geométricos de la falla El Tigre. Otras fajas oblicuas transpresionales y transtensionales regionales descritas en la Precordillera, parecen haber controlado parte de la migración de la deformación y rotaciones tectónicas hacia el interior del continente durante el Neógeno, principalmente desde el Plioceno (Japas 1988, Ré *et al.* 2001, Japas *et al.* 2002, 2015).

El presente trabajo presenta los resultados de la aplicación de tomografía eléctrica en dos dimensiones, para el estudio de estructuras inferidas por rasgos geomórficos, vinculadas a la falla El Tigre en su segmento central (Fig. 1b). Dos perfiles geoeléctricos fueron realizados con el objetivo de identificar las estructuras del subsuelo que originan dos de los lineamientos oblicuos a la falla principal, elegidos por su significancia geológica. Adicionalmente, se evaluó en los modelos obtenidos la presencia de estructuras asociadas a geoformas menores relevadas en los perfiles geoeléctricos. El estudio de la falla El Tigre y de las estructuras transversales vinculadas que posiblemente controlen su segmentación, posee una trascendencia significativa para la mejor comprensión del peligro sísmico en esta región del país.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La subducción en el margen Pacífico de América del Sur actúa bajo un régimen tectónico compresivo desde el Cretácico Tardío (Ramos *et al.* 2002, 2009). La dorsal de Juan Fernández (Pilger 1981, Gutscher *et al.* 2000) (Fig. 1a) subducta en este margen y produce la somerización de la losa y configuración del segmento de subducción subhorizontal pampeano entre los 28° y 33° LS (Barazangi e Isacks 1976, Isacks *et al.* 1982, Cahill and Isacks, 1992, Gutscher *et al.* 2000, Anderson *et al.* 2007, Alvarado y Ramos 2011). Este fenómeno ocurre desde hace aproximadamente 18 Ma y origina la migración del frente de la deformación hacia el antepaís (Gutscher *et al.* 2000, Ramos *et al.* 2002) conformándose unidades morfoestructónicas de primer orden: Cordillera Frontal, valle Calingasta-Iglesia, Pre-

cordillera y Sierras Pampeanas (Fig. 1b). A escala cortical, el segmento pampeano posee anisotropías mayores (Alvarado *et al.* 2007, Gans *et al.* 2011, Ammirati *et al.* 2013) resultado de antiguas acreciones y amalgamaciones de diferentes terrenos (Pampia, Cuyania, Chilenia; Ramos 1999, Ramos *et al.* 2002).

El área de estudio se enmarca entre la Precordillera y el valle Calingasta-Iglesia (Fig. 1b), provincia de San Juan, en donde la primera unidad es considerada como parte del terreno alóctono Cuyania (Ramos *et al.* 1996) acretado al margen continental sudoccidental de Gondwana durante el Ordovícico Medio (Astini *et al.* 1996). Esta unidad morfoestructónica representa el antepaís andino durante el Neógeno y registra la historia deformacional y depositacional de los últimos 18 Ma (Baldis y Chebli, 1969, Ortiz y Zambrano 1981, Allmendinger *et al.* 1990, Jordan *et al.* 1993, Kay y Abbruzzi 1996, Cristallini y Ramos 2000, Alonso 2011). La Precordillera constituye una faja plegada y corrida (400 km de longitud, 80 km de ancho) ascendida durante el Neógeno hace 18 Ma y subdividida en tres subunidades morfoestructónicas de segundo orden (30° - 32° LS): Precordillera Occidental, Central y Oriental (Ortiz y Zambrano 1981, Baldis *et al.* 1982). La Precordillera Occidental y Central conforman una faja plegada y corrida de piel fina ~NNE con vergencia al este y despegue a los 10-15 km de profundidad (Allmendinger *et al.* 1990, von Gosen 1992, Jordan *et al.* 1993, Cristallini y Ramos 2000). La Precordillera Occidental presenta además retrocorrimientos de vergencia occidental y una secuencia ofiolítica asociada a la acreción de Chilenia (Ramos *et al.* 1984, von Gosen 1992).

Las rupturas cuaternarias en el centro de la Precordillera (30° - 31° 30' LS), resultan por la reactivación de corrimientos oblicuos a las fallas de los frentes montañosos. Escarpas de falla y pliegues afectan el piedemonte y son comunes en las cuencas intermontanas (Bastías *et al.* 1990, Cortés *et al.* 1999, Costa *et al.* 2000). Si bien, el sector oriental de la Precordillera concentra la mayor parte de la deformación activa (Costa *et al.* 2006) también se registra neotectónica en el sector occidental (Cortés y Cegarra 2004, Cortés *et al.* 2005a, b, c, 2006, Basile 2004, Vallejo 2004, Yamin 2007, Terrizzano 2010) como en la falla El Tigre (Bastías y Bastías

1987, Siame *et al.* 1997a, b, 2006, Cortés *et al.* 1999, Fazzito *et al.* 2013). Esta falla se extiende al oeste de la Precordillera, en el valle Calingasta-Iglesia de unos 300 km de longitud entre las provincias de San Juan y Mendoza, y limitado al oeste por la Cordillera Frontal (Fig. 1b). La cuenca Calingasta-Iglesia (Fig. 1b) en el área de estudio, tiene 30 km de ancho (Beer *et al.* 1990) y está rellena por rocas piroclásticas, andesitas y sedimentos clásticos neógenos, coronada por abanicos aluviales cuaternarios (Bastías 1985, Siame *et al.* 1997b, Perucca y Martos 2009). Las sucesiones neógenas continentales son sinorogénicas asociadas al levantamiento de la Cordillera Frontal y la Precordillera (Beer *et al.* 1990).

Por otro lado, en el centro de la Precordillera se observan estructuras oblicuas como la zona de falla Hualilán NO-SE (Fig. 1b), con componente de desplazamiento sinistral (Cortés *et al.* 2014, Oriolo *et al.* 2014, 2015), que coincide con los cambios geométricos de la falla El Tigre entre su segmento central y norte (Fig. 1b). Otras megazonas oblicuas transpresionales y transtensionales parecen haber controlado la migración de la deformación y las rotaciones tectónicas hacia el interior del continente durante el Neógeno (Japas 1988, Japas *et al.* 2002, 2015). Las sedimentitas neógenas del subsuelo de la cuenca Calingasta-Iglesia evidencian una estructura en flor positiva (Álvarez-Marrón *et al.* 2006) que refuerza la presencia de zonas transpresivas. Según Japas *et al.* (2015) la Precordillera Occidental y Central portan evidencias de una etapa de deformación entre los 18 y 2,75 Ma, con un frente orogénico NNE y engrosamiento cortical y, una segunda etapa transpresiva sinistral en fajas oblicuas NNO.

ESTRUCTURA PRINCIPAL

Las estructuras de esta zona se desarrollan en un esquema general que permite reconocer dos unidades geomorfológicas de primer orden: 1) Sector Montañoso: Sierra del Tigre y, 2) Piedemonte occidental de la Sierra del Tigre: dividido por la falla El Tigre en un bloque elevado occidental de altura uniforme, presencia de geformas de abanicos aluviales disectados, valles y terrazas fluviales elevados por la falla (Fig. 2), y un bloque bajo oriental con menor altitud, relieve homogéneo por depósitos aluviales no

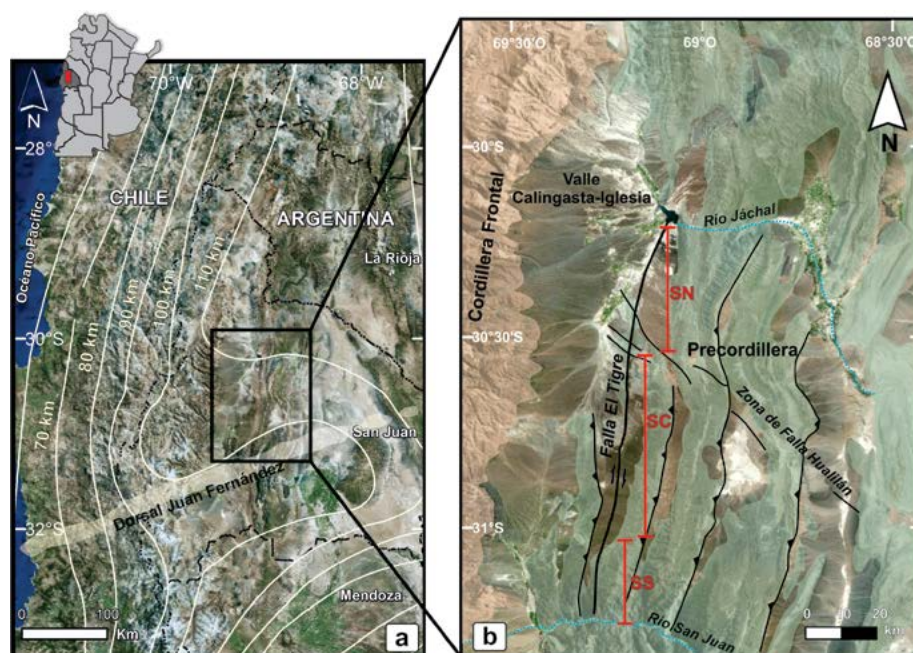


Figura 1: a) Ubicación del segmento de subducción subhorizontal pampeano y la dorsal de Juan Fernández. Las líneas claras representan la profundidad del techo de la losa pacífica determinada por sismicidad según Anderson *et al.* 2007, Alvarado y Ramos 2011. El recuadro negro ubica la figura 1b; b) Unidades morfoestructurales de primer orden. Ubicación de la falla El Tigre con indicación de sus segmentos en líneas rojas (SS: Segmento Sur, SC: Segmento Central, SN: Segmento Norte) y zona de falla Hualilán (modificado de Cortés *et al.* 2014, Oriolo *et al.* 2014, 2015).

disectados y abanicos aluviales disectados antiguos menores, con evidencias neotectónicas. Ambos bloques muestran leves diferencias al norte y al sur de un lineamiento importante descripto más adelante.

Falla El Tigre

La falla El Tigre está flanqueada al este por la sierra del Tigre y al oeste, por la sierra La Crucecita, y se extiende en dirección N-S (\sim N7°E) por unos 120 km (Fig. 2). La actividad cuaternaria de esta falla es evidenciada por marcadores geomórficos (escarpas de falla, ciénagas de falla, dorsos de presión y desvío de canales) y superficies aluviales pleistocenas afectadas por deformación (INPRES 1982, Bastías y Bastías 1987, Bastías y Uliarte 1988, Bastías *et al.* 1990, 1993, Pérez y Costa 2011, Siame *et al.* 1996, 1997b, 2006, Cortés *et al.* 1999, Fazzito *et al.* 2013) (Figs. 1 y 2). Estos marcadores geomórficos confirmaron su origen tectónico por: a) observación directa de la estructura principal en una trinchera (Siame 1998), b) observación indirecta de estructuras asociadas en geoelectrónica de subsuelo (Fazzito *et al.* 2013), y c) estudio detallado de los canales desviados mediante datacio-

nes de los depósitos aluviales involucrados y estimación de tasas de desplazamiento de la falla El Tigre (Siame *et al.* 1997a, b). En el segmento sur de la falla (Fig. 1b), la deformación cenozoica expone el basamento paleozoico de la Sierra del Tigre mientras que en el sector central, afecta a la Formación Rodeo de edad neógena y a unidades pleistocenas. Otras estructuras principales regionales son la falla La Crucecita, hacia el oeste, de tipo inversa con vergencia al este y las fallas inversas con vergencia al este, en el margen oriental de la Sierra del Tigre (Cardó y Díaz 2005) (Fig. 2). Las evidencias geológicas sugieren que la falla El Tigre evolucionó previamente a la acumulación de sedimentos del Pleistoceno tardío y la geomorfología tectónica evidencia su posterior reactivación y crecimiento. Estas evidencias son sustentadas por recientes resultados obtenidos por Fazzito *et al.* (2016) que demuestran mayor rotación en rocas miocenas que en sedimentitas pleistocenas.

La falla El Tigre está subdividida en tres segmentos mayores: el norte, el central y el sur (Fig. 1b), según la modificación de Fazzito (2011) y Fazzito *et al.* (2013) sobre la segmentación original de Siame *et al.* (1997b).

El segmento norte está caracterizado por una terminación tipo “cola de caballo” (Siame *et al.* 1997b). El segmento sur está caracterizado por significativa componente de rumbo dextral, notoria en los desvíos de canales atrincherados de los abanicos aluviales que la atraviesan. En este segmento, las tasas de desplazamiento horizontal y vertical de 1 y 0,3 mm/año, respectivamente, desde el Pleistoceno tardío, fueron estimadas por mediciones de desplazamiento acumulado y dataciones, donde el desplazamiento horizontal acumulado por desvíos de canales fue estimado en 260 ± 20 m durante el Cuaternario tardío (Siame *et al.* 1997a, b, 2006). En el segmento central ($30^{\circ}47'07''$ - $30^{\circ}49'08''$ LS) (Fig. 2) se evidencia el ascenso relativo del bloque occidental con su margen oriental formado por escarpas de falla pedemontanas y rocosas y el hundimiento relativo del bloque oriental, con abundante desarrollo de abanicos aluviales producto de la descarga de la Sierra del Tigre (Bastías y Bastías 1987, Bastías *et al.* 1990, Siame *et al.* 1996, 1997b, 2006, Cortés *et al.* 1999, Fazzito 2011) (Fig. 2). En este segmento, la componente vertical de desplazamiento expone a la Formación Rodeo y a los depósitos aluviales del Pleistoceno inferior. La escarpa de falla erosionada tiene una pendiente empinada al este (18° - 24° , Bastías *et al.* 1984) y una altura máxima de ~ 85 m (Siame *et al.* 1997b, Siame 1998). Asimismo, dorsos de presión, sugeridos por la presencia de fallas inversas de alto ángulo en estudios geoeléctricos de subsuelo (Fazzito *et al.* 2013), y ciénagas de falla, ambos con dominante forma elongada, indican la componente de rumbo del desplazamiento a lo largo de este segmento (Fig. 2). Las tomografías eléctricas resistivas de Fazzito *et al.* (2013) son consistentes con un alto ángulo de inclinación de la falla El Tigre, similar al modelo de Siame *et al.* (1997a, b). Curvaturas derechas e izquierdas del plano de falla, definen en el segmento central secciones transtensivas y transpresivas (Fig. 2), respectivamente.

Estructuras regionales y secundarias asociadas

Estructuras regionales vinculadas a la falla El Tigre se observan en el segmento central e incluyen lineamientos y fallas inferidas oblicuos a la traza principal con dirección NO-SE a NNO-SSE (Fazzito *et al.* 2013) (Fig. 2). Están evidenciadas por rasgos geo-

mórficos y cambios geológicos y serían la expresión en superficie de estructuras más antiguas del basamento precordillerano que han controlado en parte la evolución tectónica y cinemática de la falla El Tigre (Fazzito 2011). En particular, el lineamiento 3 (Fig. 3) fue postulado como un límite estructural mayor (Fazzito *et al.* 2013). Al norte del lineamiento, el desplazamiento evidencia mayor componente horizontal, afloran rocas neógenas plegadas en el bloque bajo y alto, el sentido del drenaje es SE-NO y se observa una curvatura de dirección $\sim N 5^{\circ} E$ en la traza de la falla (Fazzito 2011, Fazzito *et al.* 2013) (Fig 3). Al sur del lineamiento, el desplazamiento vertical aparente es mayor y el bloque oriental se muestra como una sección más hundida, afloran unidades neógenas no deformadas o con leves basculamientos, el sentido del drenaje es ESE-ONO y se observa una curvatura de dirección $\sim N 18^{\circ} E$ (Fazzito 2011, Fazzito *et al.* 2013) (Figs. 2 y 3). Fazzito (2011) sugiere deformación transpresiva al norte del lineamiento y deformación transtensional al sur. Las estructuras secundarias locales, de menor extensión, estarían vinculadas a la actividad cuaternaria de la falla El Tigre. Al norte

del lineamiento, el bloque elevado occidental presenta deformación transpresiva con unidades neógenas y depósitos pleistocenos plegados en dirección NO-SE, y basculados, mientras que en el sector sur, se observan basculamientos suaves (Bello Camilletti 2012). En el bloque bajo oriental, al norte del lineamiento, se observa un conjunto de geomorfos positivas; son lomadas escalonadas NNO-SSE, de forma sigmoidal en planta, con disminución de altitud hacia el sudoeste, exposición de rocas neógenas plegadas y depósitos pleistocenos inclinados $25^{\circ}O$ (Figs. 2 y 3). Un conjunto de lineamientos NO-SE es inferido entre las lomadas y un lineamiento NNO-SSE las vincula hacia el este (Figs. 2 y 3). Estos lineamientos podrían corresponder a una faja de cizalla dextral, donde las lomadas representan un arreglo en échelon (Figs. 2 y 3). Al sur del lineamiento, en el bloque bajo oriental, escarpas de fallas y de limbo de pliegues N-S a NE-SO afectan depósitos aluviales pleistocenos y estarían vinculadas a retrocorrimientos de la Sierra del Tigre (Fig. 2). Estudios geoeléctricos sugieren la presencia de fallas ciegas inversas con alto ángulo de inclinación al este a subverticales (Fazzito *et al.* 2013).

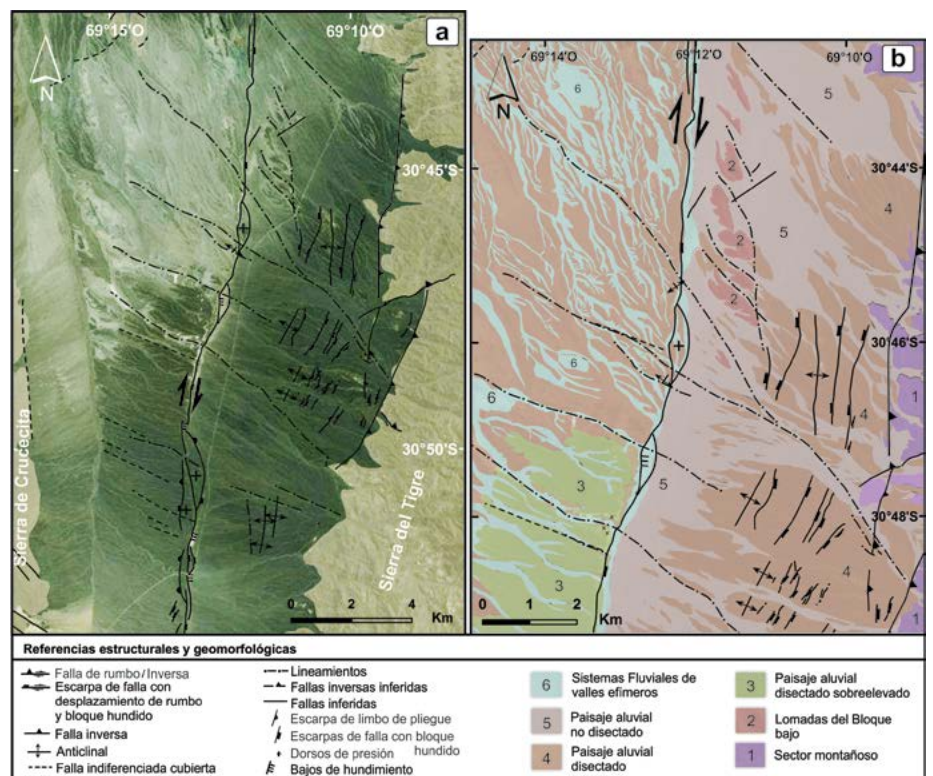


Figura 2: a) Mapa Estructural del segmento central de la falla El Tigre; b) Mapa geomorfológico-estructural de la misma zona (modificado de Fazzito *et al.* 2013, Bello Camilletti 2012).

La importancia cinemática de las estructuras oblicuas ha sido confirmada por el reciente estudio paleomagnético sistemático realizado en el sector central de la falla El Tigre (Fazzito *et al.* 2016) que ha demostrado la existencia de un patrón de rotaciones según ejes verticales complejo y variable a lo largo del bloque elevado de la falla.

Estratigrafía

El basamento pre-neógeno de la cuenca del valle Calingasta-Iglesia en la zona de estudio, aflora en el cerro Alto del Colorado, en la sierra del Tigre y en la sierra de la Crucita mientras que las unidades neógenas están expuestas en afloramientos reducidos en ambos bloques de la falla El Tigre (Fig. 3a). Los depósitos cuaternarios cubren la mayor parte del valle (Fig. 3a) y están representados principalmente por depósitos aluviales discordantes sobre las sucesiones neógenas y paleozoicas. En el cuadro 1 se presenta un resumen litológico-ambiental de las unidades presentes en el área de este trabajo. Las unidades involucradas en los perfiles geoelectrónicos realizados son la Formación Rodeo (Neógeno) y los definidos aquí como Depósitos Q1 (Depósitos Cuaternarios Antiguos), Q2 (Depósitos Aluviales disectados) y Q4 (Depósitos Aluviales jóvenes). Para la Formación Rodeo (Furque 1963, Wetten 1975a, b), se utiliza la reciente configuración estratigráfica propuesta por Alonso (2011) (Cuadro 1). Esta formación se divide en el Miembro inferior Lomas del Campanario, en el que domina el contenido piroclástico vinculado a flujos provenientes de la destrucción de aparatos volcánicos miocenos (cerro Negro) y el Miembro superior Las Flores, con contenido mayormente epiclástico (Fig. 3a). El contacto entre ellos no aflora pero se deduce la presencia de una discordancia angular (Contreras *et al.* 1990) o una posible interdigitación (Gagliardo *et al.* 2001). Algunas dataciones colocan a la Formación Rodeo entre el Mioceno superior y el Plioceno (Johnson *et al.* 1987, Jordan *et al.* 1997) y otros autores, entre el Mioceno medio alto y el Plioceno (Ré y Barredo 1993, Ré 1994). El Neógeno comprende además, unos cuerpos intrusivos andesíticos y dacíticos que afloran en la zona del cerro Negro y Tocota, asignados al Mioceno inferior a medio (Leveratto 1976).

Los depósitos aluviales cuaternarios cubren discordantemente a las sucesiones neógenas

y paleozoicas y conforman una extensa bajada, con llanuras fluviales, escasos barreales y algunos sistemas fluviales canalizados efímeros. La proveniencia del material es desde el borde occidental de la Precordillera, al este. La Formación Iglesia (Furque 1979) agrupaba los depósitos del piedemonte precordillerano, posteriormente subdividida en distintos niveles de agradación separados por discordancias erosivas (Siame *et al.* 1997a, Yamin 2007, Perucca y Martos 2009). Cardó y Díaz (1999) los definen como Depósitos Aluviales Antiguos y Modernos y Fazzito (2011) los redefine como Depósitos Aluviales Cuaternarios Antiguos y Jóvenes. Siame *et al.* (1997a, b) profundizan la subdivisión basada en un análisis geomórfico, relación estratigráfica de corte y relleno, morfología de las superficies, posición topográfica relativa y dataciones cosmogénicas de ^{10}Be , descartándose los rasgos sedimentológicos muy similares, e identifican seis niveles de abanicos aluviales (Fig. 3a, Cuadros 1 y 2). Constituyen abanicos disectados con pavimento desértico que indica, procesos deflacionarios y periglaciares y períodos extensos de abandono del sistema, condiciones que

habrían ocurrido previo a los 700 Ka, y unidades modernas canalizadas entre las más antiguas, con reducido a nulo desarrollo de pavimento desértico. Yamin (2007), Fazzito (2011) y Perucca y Martos (2009) correlacionan las unidades de Siame *et al.* (1997a) con otras presentes en la región (Cuadro 2). Perucca y Martos (2009) postulan su origen por alternancia de épocas frías y húmedas en áreas montañosas y semiáridas y periglaciares en el piedemonte, con épocas más cálidas y secas, similares a la actual, con predominio de erosión vertical de arroyos y neotectónica que controlan la evolución del paisaje cuaternario. Bello Camilletti (2012) subdivide los depósitos cuaternarios en la zona de estudio y están resumidos en los Cuadros 1 y 2. En el presente trabajo, se identificaron tres niveles de agradación (Q1, Q2, Q3), un nivel de canales (Q4) desarrollados sobre los más antiguos y un nivel de depósitos fluviales y aluviales actuales (Q5). A continuación, se describen estas unidades y sus equivalencias, en los Cuadros 1 y 2.

Depósito Q1: Depósito aluvial conformado por un conglomerado fino, matriz y clasto-soportados, consolidación moderada,

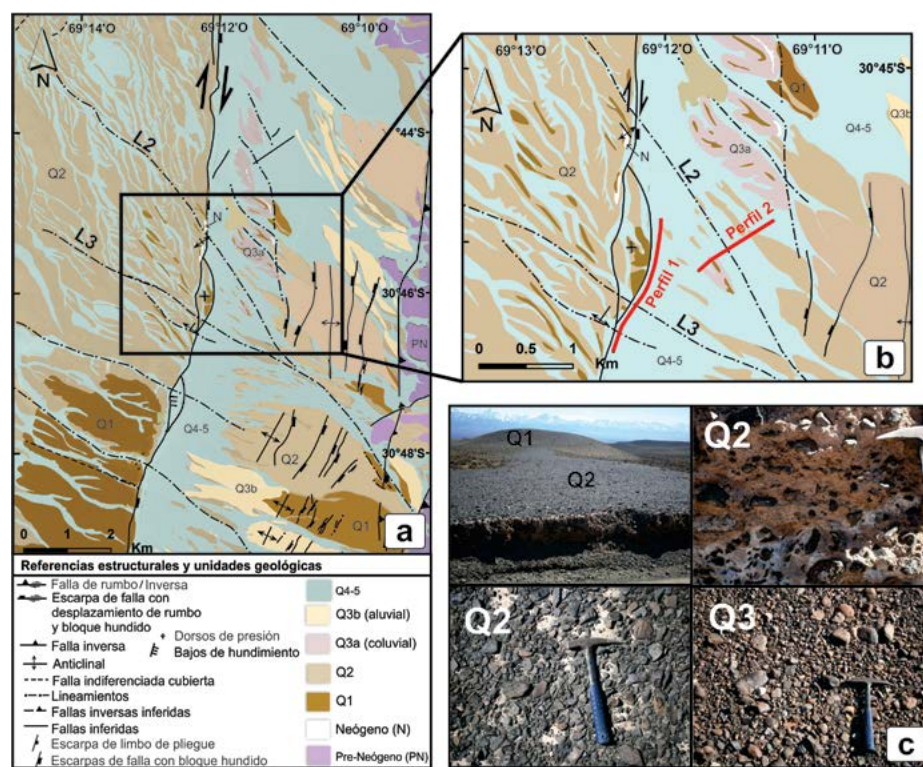


Figura 3: a) Mapa Geológico del segmento central de la falla El Tigre (modificado de Bello Camilletti 2012); b) Detalle del mapa geológico con ubicación de perfiles geoelectrónicos; c) Fotografías ilustrativas de depósitos cuaternarios.

CUADRO 1: Resumen de unidades geológicas y geomorfológicas según Bello Camilletti (2012) y el presente trabajo (ver Figuras 2 y 3). ST: Sierra del Tigre; FET: Falla El Tigre; VCI: Valle Calingasta-Iglesia; CNI: Cerro Negro de Iglesia; FR: Formación Rodeo; FYL: Formación Yerba Loca; DCA: Depósitos Cuaternarios Antiguos; DAJ: Depósitos Aluviales Jóvenes; DADA: Depósitos Aluviales Disectados Antiguos

		Unidades geológicas				Unidades geomorfológicas				
		Sector Occidental		Sector Oriental						
Cenozoico	Cuaternario	Depósitos Fluviales y Aluviales Actuales				Q5	Sistemas de Valles Fluviales Efímeros			
		Base del valle, cauces intra e inter-geoformas, sistemas fluviales efímeros pequeños, movilizan sedimentos finos al centro del valle o pie de la escarpa FET. Drenan S-N a las quebradas transversales a la escarpa hasta el centro del VCI.				En texto	1) Bajada occidental ST: distributario al O, agradación, dendrítico (lomadas tectónicas) y subdendrítico (abanicos aluviales disectados). 2) Bloque elevado y sector montañoso: dendrítico, erosión, colector paralelo a la FET, subsecuente, cursos transversales consecuentes y antecedentes, abras de viento.			
		Depósitos Coluviales		Depósitos Aluviales Jóvenes		Q3-Q4	Planicies Aluviales No Disectadas		Lomadas del Bloque Bajo	
		Sedimentos gruesos a medios, vulcanitas mesosilícicas, cubren laderas de valles del Bloque elevado. Depósitos de erosión y remoción en masa de DCA. Desarrollo con profundización de cauces fluviales efímeros hasta la actualidad.		Bloque bajo FET. Conglomerados finos, clasto-soportados, escaso pavimento y barniz desértico. Rellenan pequeños cauces entre geoformas antiguas. Centro del valle y FET.		En texto	Base del valle en Bloque bajo (DAJ). Escurren al O, NO, N.			
		Depósitos Fluviales Aterrazados		Depósitos Aluviales Disectados Antiguos		Q1-Q2	Paisaje Aluvial Disectado	Paisaje Aluvial Disectado Sobreelevado	Terrazas Fluviales	
		En bloque elevado FET. Dos niveles, similar a DCA.								
	Depósitos Cuaternarios Antiguos		Q1-Q2	Bloque bajo. Geoformas elevadas sobre el sistema sedimentario aluvial pre-actual. Conglomerados finos, clastos vulcanitas y metasedimentitas. Intensos pavimento y barniz desérticos, escasa vegetación. Más bajos que DCA por corte y relleno (en lomadas).		En texto	Relieve irregular y suave, colinas y lomadas labradas sobre los DCA, DADA y FR. Bloque elevado: 30 m h, pendiente 15°, > incisión y actividad tectónica. Bloque bajo: 8 m h, pendientes bajas, agradación. L3: al norte flujo al NNO, al sur flujo al NO	Bloque elevado Sur, mayor altura (DCA). Geoformas de 50-60 m sobre el valle, pendientes 5°.	Entre las colinas del Paisaje aluvial disectado en Bloque elevado. Dos niveles: 10 y 25 m.	
	Bloque elevado y lomadas en Bloque bajo. Conglomerado clasto-soportado, matriz arena fina, andesitas verdes, castaño claro-rojizo, masivo, incipiente imbricación al S. Moderada selección, clastos subredondeados oblatos o prolados, vulcanitas mesosilícicas. Intenso pavimento desértico, pátinas de óxidos.		En texto							
	Neógeno	Mioceno	Mb. Las Flores				Cuerpos intrusivos andesíticos y dacíticos. Mioceno inferior a medio. Cerro Negro y Tocota. (Levaratto 1976)			
			Sucesiones grandecrecientes, numerosos ciclos sedimentarios vinculados a depósitos de abanicos aluviales. Intercalaciones de areniscas y conglomerados de flujos canalizados de sistemas entrelazados, y pelitas arenosas finas de planicies de inundación. Capas de yeso de playa lake. Varias asociaciones de facies (Alonso, 2011). Pequeños afloramientos en las lomadas del Bloque bajo y Bloque elevado. Pelitas laminadas con intercalación de areniscas finas y delgados niveles de yeso (2-3 cm). Contacto neto con el cuaternario.							
PZ	Od Mid-sup.	Fm. Rodeo		Mb. Lomas del Campanario						
		Facies inferior: aglomerado de andesitas, tobas, dacitas y bombas volcánicas. Flujos de bloque y ceniza por destrucción de un aparato volcánico. 19,5-19,1 Ma. Facies superior: conglomerados, clastos de andesitas, grauvacas, filitas y cuarcitas, estructuras de corriente e intercalaciones de diatomitas. Ambiente fluvial con aporte piroclástico, proveniencia CNI por orientación de depósitos tipo lahar al O del mismo, bombas y bloques a < 2 km. Cuatro asociaciones de facies (Alonso 2011). 11,1-9,4 Ma. Aflora en quebradas del Bloque elevado y bajo de FET. Piroclastitas finas, masivas, gris claro, vitroclastos (tamaño lapilli), litoclastos de vulcanitas ácidas y mesosilícicas porfíricas bimodales y cristaloclastos de plagioclasa y biotita. Depositación por agradación capa por capa								
		Fm. Yerba Loca		Fm. La invernada		Sector Montañoso				
		Sedimentitas marinas (lutitas, areniscas, conglomerados) y una secuencia ofiolítica (basaltos y pillow lavas). Od Medio-Sup. (Furque 1963, 1983, Cardó y Díaz 2005).		Sedimentitas marinas (lutitas, areniscas, calizas, conglomerados) a veces metamorfizados (filitas, metapsamitas), por intrusivos de la FYL. Od Sup. (Furque 1983, Banching 1995,1996, Cardó y Díaz 2005).		ST. Rocas paleozoicas, 800 m de altura. Corrimiento en frente montañoso oriental ST, degradado, alta sinuosidad unión piedemonte-montaña (inactividad tectónica), baja al oeste, retrocorrimientos cubiertos, actividad tectónica reciente.				

CUADRO 2: Resumen de unidades geológicas cuaternarias de la región y tentativas correlaciones (ver figura 3).

Siame (1997a, b, 1998)			Yamin (2007)		Fazzito (2011)		Bello Camilletti (2012)			Este trabajo					
Unidad	Edad (Ka)	Área	Unidad	Área	Unidad	Área	Unidad			Área	Unidad	Área			
As	Cursos activos		Actual y reciente		Actual y reciente		Depósitos Aluviales y Fluviales Actuales				Q5				
QF6	Canales entre los abanicos aluviales antiguos. Reducido a nulo pavimento desértico.	21 ± 4 37 ± 8 42 ± 9	Depósitos del 4° nivel de Agradación	Barreal	Depósitos Aluviales Cuaternarios Jóvenes	Segmento Central y Sur FET	Depósitos Aluviales Jóvenes			Segmento Central FET		Q4	Segmento Central FET- Bloque bajo E		
QF5		99 ± 21										Q3			
QF4	Abanicos aluviales antiguos. Pavimento del desierto. Deflación, abandono.	180 ± 38 280 ± 58					Depósitos del 2° nivel de Agradación	Depósitos Aluviales Cuaternarios Antiguos	Depósitos Aluviales Disectados Antiguos		Depósitos Fluviales Aterrazados	Depósitos Cuaternarios Antiguos			Q2
QF3		380 ± 78													Q1
QF2		-					Depósitos del 1° nivel de Agradación								
QF1		670 ± 140													

con clastos subredondeados y subangulosos de hasta 3 cm (moda 1 cm) de vulcanitas (andesitas y basaltos) y metapsamitas paleozoicas probablemente provenientes de la sierra del Tigre, con estructura estratificada granocreciente incipiente. La superficie presenta un barniz del desierto fuertemente desarrollado y de coloración grisácea oscura, con clastos enterrados hasta su mitad inferior (Fig. 3c).

Depósito Q2: Depósito aluvial conformado por un conglomerado/grava fino, matriz-soportado, pobremente consolidado, con clastos angulosos de vulcanitas (andesitas y basaltos) y matriz limosa con cementación carbonática laminar. Estratificación no muestra gradación. La superficie presenta un barniz del desierto fuertemente desarrollado y de coloración gris azulada más oscura que Q1, con clastos enterrados hasta su mitad inferior o un poco menos que la mitad (Fig. 3c).

Depósito Q3: Depósito aluvial conformado por un conglomerado fino de características sedimentológicas similares a Q1 y Q2. Los clastos son más finos, la matriz más blanquecina y presenta pobre consolidación. Los clastos estarían retrabajados, posiblemente provenientes del depósito Q2, y en la superficie, los clastos están más oxidados con un

color anaranjado. Están menos enterrados con barniz del desierto notoriamente menos desarrollado (Fig. 3c).

Depósito Q4: Depósitos fluviales y aluviales, casi nula consolidación, clastos angulosos, clasto-soportado cuando aparece algo consolidado. Escaso desarrollo de barniz del desierto. Se desarrolla en los cursos transitorios entre los depósitos aluviales más antiguos Q1, Q2 y Q3.

Depósito Q5: Depósito actual fluvial y aluvial, muy similar a Q4, material suelto con clastos muy redondeados.

METODOLOGÍA

Tomografía Eléctrica Resistiva

El equipo de medición utilizado en el método de tomografía eléctrica resistiva en dos dimensiones fue un resistivímetro *Syscal R1 Plus Switch 48* (compañía IRIS Instruments) de 600 W de potencia máxima. Éste permite seleccionar el tipo de arreglo geométrico, los parámetros geométricos (niveles de profundidad de investigación, espaciamiento efectivo entre electrodos) y los parámetros de adquisición (duración del ciclo de corriente, intensidad esperada de la señal, cantidad de repeticiones por cuádrupolo). Mediante un microprocesador, el

equipo guía automáticamente todo el proceso de inyección de corriente y mide la diferencia de potencial entre pares de electrodos. Los datos geométricos, de corriente y de potencial asociados a cada cuádrupolo quedan almacenados en su memoria.

Para ambos perfiles de tomografía eléctrica (Fig. 3b) se eligió un arreglo Wenner-Schlumberger, el cual se caracteriza por ofrecer un compromiso adecuado entre la resolución de estructuras horizontales y las verticales, además de proveer una buena relación señal/ruido. Para cada uno de los perfiles de tomografía eléctrica se conectó el resistivímetro a un arreglo lineal básico de 48 electrodos de acero con una separación de 10 m. Una vez terminado el proceso de medición, el arreglo inicial de 470 m, fue extendido mediante reiteradas aplicaciones del método *roll-along*; se añadieron, en forma sucesiva, perfiles geoeléctricos de 24 electrodos espaciados 10 m, hasta cubrir la longitud requerida para el perfil 1 y de 12 electrodos espaciados 10 m para el perfil 2. El perfil 1 se realizó hasta una longitud de 1430 m (Figs. 3b, 4a y 5). Se efectuó un mínimo de 2 y un máximo de 6 mediciones por dipolo de corriente, con un factor de calidad del 5 %; este último ajuste determina que, por cada cuádrupolo, el proceso

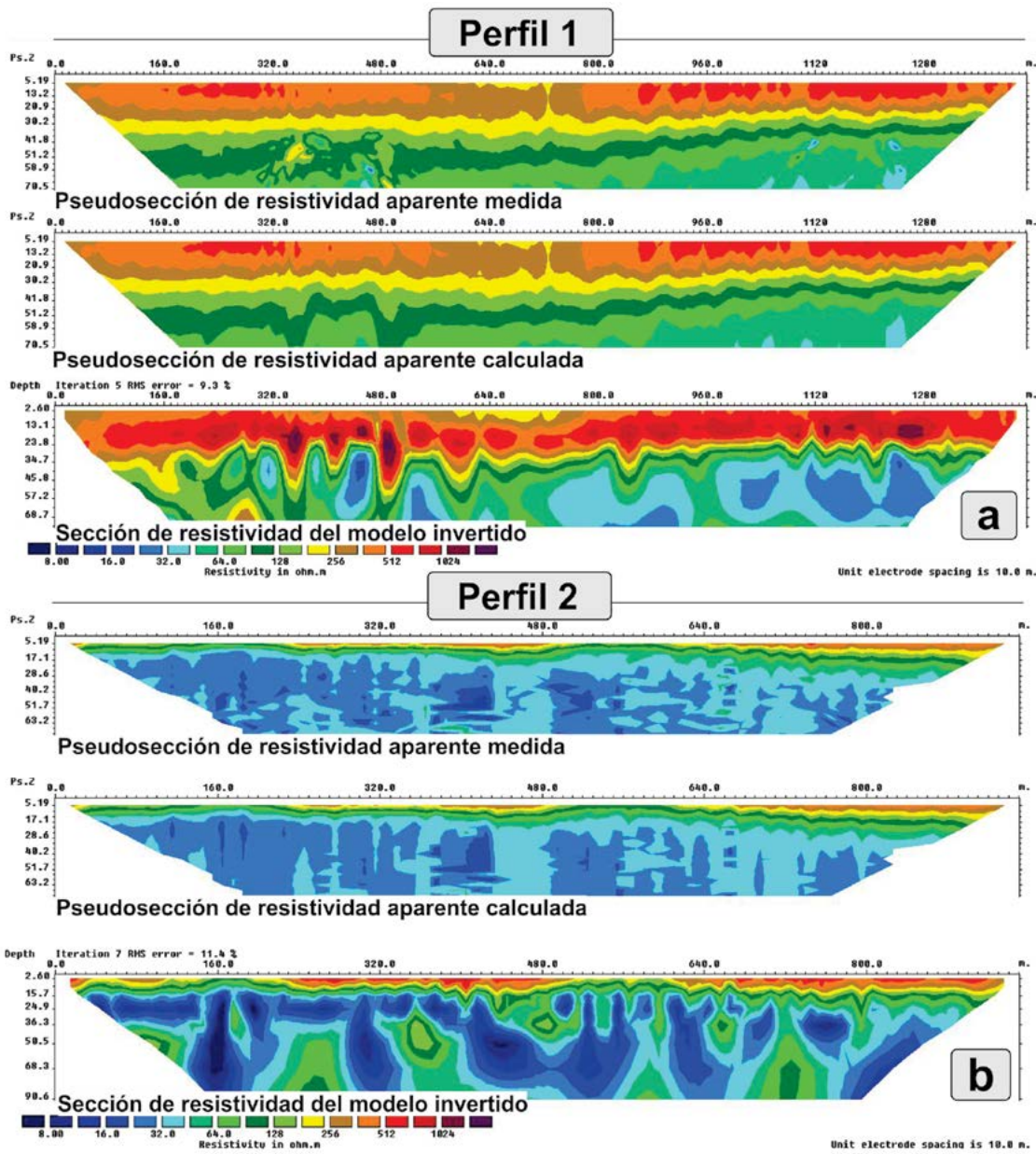


Figura 4: Pseudo-secciones: a) Pseudo-secciones de resistividad aparente medida (arriba), calculada (centro) y modelo invertido (abajo) para el perfil 1; b) Ídem para el perfil 2.

de medición se reitera hasta conseguir una desviación estándar menor al 5 %, pero sin superar nunca la sexta medición. El pulso de corriente eléctrica (onda cuadrada) se eligió con un período de 1 s de duración y un rango de potencial esperado en la recepción de ~ 300 mV (la corriente inyectada por el resistímetro se ajusta en forma automática de acuerdo a este parámetro). Se seleccionaron 7 niveles de profundidad de investigación con una longitud efectiva de dipolos de 10 m, 6 niveles con una longitud efectiva de 20 m y 6 niveles con dipolos separados 30 m. Con estas elecciones quedó conformado un arreglo de 2493 cuadrípolos. El perfil 2 se

desarrolló hasta cubrir una longitud total de 950 m (Figs. 3b, 4b y 6). Se realizó un mínimo de 2 mediciones y un máximo de 6 mediciones por cuadrípolo, con un factor de calidad del 4%. El pulso de corriente eléctrica se estableció en 1 s de duración con un potencial deseado en la recepción también de unos 300 mV. Se seleccionó una longitud efectiva de dipolos de corriente de 10 m y un total de 18 niveles, los cuales constituyeron un arreglo de 1432 cuadrípolos. Las variaciones en topografía a lo largo de los perfiles fueron determinadas por medio de un navegador GPS con altímetro barométrico y las posiciones de los electrodos

fueron utilizadas como referencia en la horizontal. Se seleccionaron varios puntos de control sobre el perfil para realizar correcciones por variaciones temporales de presión atmosférica.

Los modelos de resistividad fueron realizados mediante cálculo numérico iterativo a través del software RES2DINV (*Geotomo Software*). El modelo de subsuelo consiste en celdas rectangulares con bordes en posiciones fijas. Cada una de estas posee una determinada resistividad que se va modificando durante el método de optimización con el fin de reducir la diferencia (*misfit*) entre la resistividad aparente proveniente

de las mediciones y la resistividad aparente calculada sobre la base del modelo. A partir del modelo de celdas se genera finalmente un diagrama de contornos de resistividad. En la figura 4 se presentan las pseudosecciones de resistividad aparente medida y la resistividad aparente calculada para el modelo de inversión seleccionado en cada perfil.

Se seleccionaron mediciones de resistividad aparente cuya desviación estándar no superan el 25%. Además, con el método sugerido por Loke (1996-2006), que consiste esencialmente en rechazar mediciones que poseen un desajuste (*misfit*) muy elevado luego de una inversión preliminar, se realizó una segunda selección de mediciones. Estos dos criterios de selección de datos permitieron elegir, para el perfil 1, un 94 % de las mediciones iniciales de resistividad aparente y, para el perfil 2, un 80 % de las mediciones originales.

El ancho de las celdas del modelo de subsuelo se seleccionó en 10 m, igual a la separación mínima entre los electrodos. La altura de las celdas se incrementó con la profundidad para tener en cuenta la pérdida de resolución del método, en un 10 % por capa para el perfil 1, y en un 25 % por capa para el perfil 2. La diferencia en los incrementos de la altura de las celdas en cada perfil se debe a la selección de los modelos invertidos, entre más de una docena realizados para cada perfil, que fueron los más representativos y homogéneos geoméricamente. La diferencia en ese porcentaje no representa cambios importantes en los modelos. Esto determinó que el modelo correspondiente al perfil 1 sea de 14 capas y 1774 celdas, mientras que el modelo asociado al perfil 2 quedó conformado por 8 capas y 660 celdas. Para la optimización se utilizó un método de cuadrados mínimos con restricción suave sobre el vector de perturbación y también sobre los valores de resistividad. La matriz jacobiana se recalculó para cada iteración. El modelo directo se determina en cada iteración por el método de elementos finitos con la malla más fina, con 4 nodos entre electrodos adyacentes. La topografía fue incorporada por medio de una malla moderadamente distorsionada para el perfil 1 y una malla uniformemente distorsionada para el perfil 2. Los ajustes fueron confiables: para el perfil 1 se obtuvo un error cuadrático medio de 9.3 % en 5 iteraciones, mientras que para el perfil 2 se logró un error cuadrático medio de 11.4 % en 7 iteraciones.

RESULTADOS

Perfil 1

Descripción: Esta tomografía eléctrica resistiva fue realizada en el bloque bajo oriental de la falla El Tigre, con una dirección NNE-SSO, con el objetivo de apreciar la expresión del subsuelo del lineamiento 3 (Fig. 5). Se definen niveles geoelectricos según rangos de valores de resistividad, continuidad lateral geométrica y configuración de los contornos de resistividad. En este perfil (Figs. 5b, c), se observa la presencia de tres niveles geoelectricos subhorizontales, con algunos sectores con disposición suavemente curvilinear y de resistividades contrastantes. El nivel superior (A) presenta resistividad elevada ($>400 \Omega/m$), su techo aflora o aparece 5 a 10 m por debajo la superficie, y evidencia un espesor de 20 a 30 m. El nivel intermedio (B) es más conductivo ($100-250 \Omega/m$), su techo aparece a 20 a 30 m por debajo la superficie, con un espesor de 5 a 10 m. El nivel inferior (C) es el más conductivo ($<100 \Omega/m$) con un sector asociado (D) más resistivo ($100-400 \Omega/m$) hacia el extremo sur del perfil ($x=250m$). El nivel A aloja un sector superficial más conductivo ($150-250 \Omega/m$) con forma de cubeta que alcanza unos 10 m de profundidad y se ubica en el centro del perfil (E).

La geometría de los niveles A, B y C, más notoria en los dos primeros, evidencia una disposición curvilinear amplia y negativa rellena por el nivel E, en el centro del perfil ($X=480-800 m$), que llamativamente es contraria a la topografía más elevada en este sector, y pasa a una geometría curvilinear amplia y positiva, hacia el extremo sur del perfil ($X=480-0m$). Estas curvaturas están asociadas con tres discontinuidades subverticales definidas como fallas 1, 2 y 3. La falla 1 es la de mayor dimensión y consiste en una anomalía subvertical de alta resistividad ($>1000-250 \Omega/m$) que inclina entre $80^\circ S$ a 90° , ubicado en el límite sur de la curvatura negativa superficial ($x=480 m$). Se destaca porque tanto en el nivel A, B y C es un sector más resistivo que su entorno. La falla 2, contigua a la falla 1 hacia el sur, también manifiesta mayor resistividad que su entorno, es vertical, de menor dimensión pero afecta los tres niveles (A, B y C). Más al sur, se identifica la falla 3, destacada por un contraste lateral de resistividades, entre los niveles C y D y registra una inclinación del orden de $60^\circ N$.

Interpretación: El modelo geológico (Fig. 5c) está basado en la interpretación del perfil geoelectrico y su posible correlación con unidades geológicas (descritas en la sección "Estratigrafía"). Esta correspondencia entre los datos geoelectricos y geológicos se analizó en base a la localización de la transecta que permitió identificar la unidad geológica en superficie y aquellas aflorantes en sus inmediaciones, y en base a los rasgos geométricos y profundidad de yacencia de los niveles geoelectricos definidos en la descripción del modelo. Si bien no existe una correlación lineal entre los niveles geoelectricos y las unidades geológicas, esta interpretación permitió sugerir la presencia de al menos cinco de ellas. El nivel geoelectrico A correspondería a los Depósitos Q4 definidos en el presente trabajo y equivalentes a los Depósitos aluviales jóvenes. Estos depósitos dominan en la superficie de la zona del perfil, conformada por la extensa bajada aluvial (no disectada) occidental de la Sierra del Tigre (Fig. 3, Cuadro 1). El nivel geoelectrico B correspondería a los Depósitos Q1 equivalentes a los Depósitos cuaternarios antiguos de Bello Camilletti (2012). Están cubiertos a lo largo de todo el perfil sin embargo, se interpreta su presencia porque afloran inmediatamente al oeste en el dorso de presión desarrollado en la falla principal, donde aparecen desplazados a mayor altura (10 a 20 m por encima del bloque bajo) en donde los Depósitos Q4 no están presentes (Figs. 2 y 3). Los niveles geoelectricos C y D corresponderían a la Formación Rodeo. El cambio de resistividades coincide con un cambio en las rocas aflorantes de esta formación en las cercanías, donde el Miembro Lomas del Campanario se expone al sur y correspondería al nivel D y el Miembro Las Flores se expone al norte y correspondería al nivel C. A pesar de que el contacto entre ambos miembros no aflora, la geoelectrica lo registraría en el subsuelo del bloque bajo oriental de la falla El Tigre, a través de una falla de alto ángulo (falla 3) transversal a la principal. La diferencia de conductividades entre ambos niveles podría explicarse por la presencia de un acuífero local en el nivel C, consistente con resultados de Fazzito (2011). La profundidad de la Formación Rodeo en el modelo geoelectrico sería consistente con un rechazo vertical menor a los 60 m como fue estimado en el sector norte del segmento central de la falla. El nivel geoelectrico E

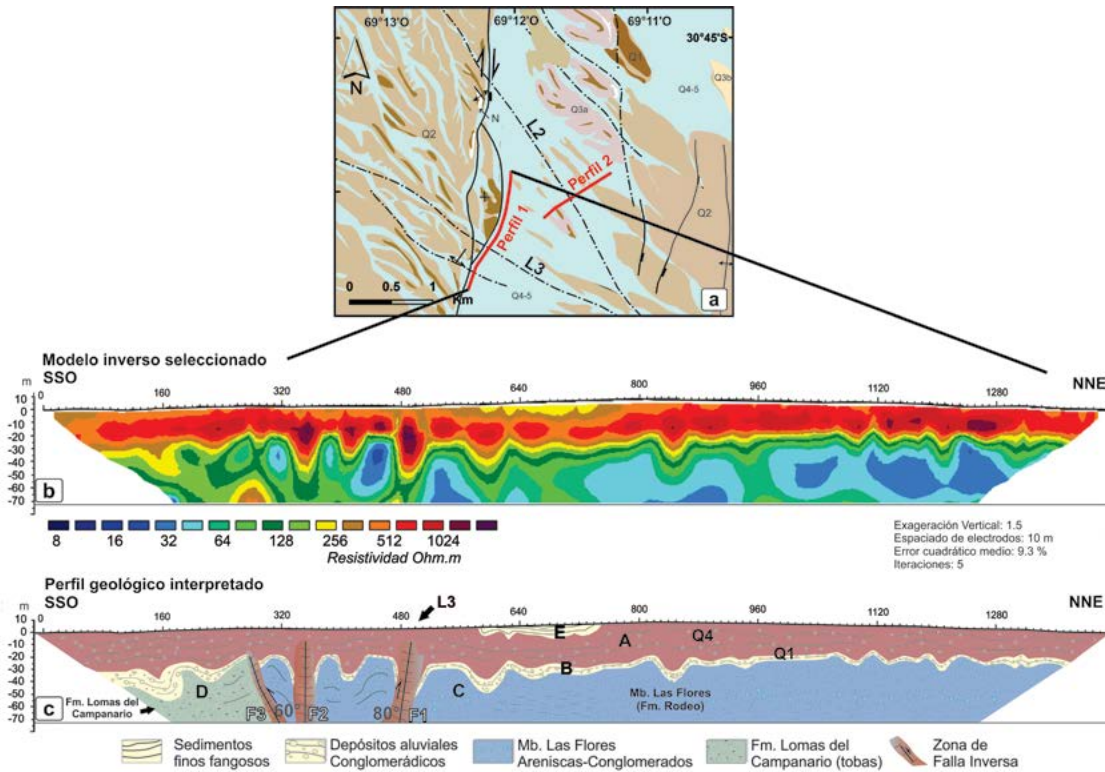


Figura 5: Perfil 1: a) Mapa geológico de ubicación; b) Modelo inverso seleccionado; c) Perfil geológico interpretado. A, B, C, D y E: niveles geoelectricos. Q1, Q4: depósitos cuaternarios. F1, F2, F3: Fallas 1, 2 y 3 con ángulos de inclinación. L3: Lineamiento 3.

correspondería a sedimentos finos fangosos que aparece en una cuenca restringida producto de un episodio de endicamiento localizado y corto, generado por la presencia de un obstáculo al escurrimiento del drenaje. En este caso, el obstáculo es morfotectónico y está dado por el dorso de presión y la escarpa de la falla inmediatamente al oeste del perfil geoelectrico, que actúan como barreras y ejercen un control estructural en el drenaje con flujo divergente. Un conjunto de cursos escurre en sentido paralelo a la traza de la falla y otro conjunto de cursos escurre en forma transversal y antecedente a la escarpa (Fig. 2b).

En cuanto a estructuras, en los depósitos Q4 y Q1 se observa una flexura amplia y suave que forma un bajo, llamativamente en la zona topográfica más elevada del perfil, relleno por los sedimentos finos (E) en el centro del perfil, que se invierte a una forma positiva hacia el sur. Asociadas a estas flexuras someras aparecen tres discontinuidades. La falla 1 sería la de mayor dimensión y consiste en una anomalía resistiva subvertical que inclina 80° SO a 90° que apenas desplazaría unos 10 m en su componente de inclinación de forma inversa al Miembro Las Flores y afectaría, sin desplazamiento evidente, a los depósitos Q4 y Q1. Esta

falla coincidiría con el punto de inflexión entre la flexura negativa y positiva, en perfil, y con el lineamiento 3 (Figs. 3b y 5a) oblicuo a la falla El Tigre, en planta. La falla 2 sería vertical, similar a la anterior, de menor dimensión y afectaría a los mismos niveles sin evidente desplazamiento de inclinación. La falla 3 está caracterizada por contraste de resistividades, pondría en contacto a ambos miembros de la Formación Rodeo e inclinaría aproximadamente 60° NE y apenas desplazaría < 5 m de forma inversa al Miembro Las Flores sobre el Miembro Lomas del Campanario. Los depósitos Q4 serían flexurados por esta falla que afecta también a los depósitos Q1 y se interrumpe allí (Fig. 5c). Las fallas 1 y 3 coincidirían en superficie con lineamientos definidos en planta.

Perfil 2

Descripción: Esta tomografía eléctrica resistiva se realizó en el bloque bajo oriental de la falla El Tigre, con dirección NE-SO, a unos 500 m al noreste del perfil 1 y fue realizada con el objetivo de distinguir en subsuelo el lineamiento 2 transversal a la falla (Figs. 3b y 6). En este perfil se observa la presencia de tres niveles subhorizontales, con algunos sectores con disposición suavemente curvilinear y de resistividades contrastantes. El

nivel geoelectrico superior (A) presenta resistividad elevada (> 300 Ω/m) y aparece en la superficie del perfil con un espesor variable entre 5 y 15 m (Fig. 6c). Esta variación es debida a la geometría discontinua del horizonte, que principalmente rellena dos bajos mayores y uno menor ubicado hacia el sudoeste, con forma de cubetas y separados por dos altos sutiles, en donde el nivel A desaparece y afloran unidades inferiores. El nivel geoelectrico inferior (B) es más conductivo (60-250 Ω/m) y presenta entre 5 y 10 m de espesor, con un máximo de unos 20 m al noreste. Su geometría es subhorizontal y se dispone suavemente curvilinear en los altos del sustrato mencionados (x= 160 m y 560 m) hasta aflorar en superficie, donde el nivel geoelectrico A desaparece. El nivel geoelectrico (C) subyace al B, es más conductivo (<40 Ω/m), posee un espesor de unos 25 m, es subhorizontal a suavemente curvilinear en el sector suroeste y más heterogéneo en el centro del perfil. Debajo del nivel geoelectrico C, varias discontinuidades conductivas generan un aspecto más complejo sin embargo, el entorno más resistivo (60-250 Ω/m) hasta la base del perfil es definido como nivel geoelectrico (D). La geometría de los niveles A, B y C, más notoria en el B, parece poseer una dispo-

sición curviplana amplia conformado por tres zonas de relleno, bajos 1, 2 y 3, y tres zonas positivas, altos 1, 2 y 3 (Fig. 6c). Estas disposiciones curviplanas son evidentes en el nivel B, apenas en el nivel C, y los bajos están rellenos por el nivel A, y están claramente asociadas a tres discontinuidades subverticales definidas como fallas 1, 2 y 3. Las discontinuidades fueron identificadas por la presencia de zonas conductivas típicamente observadas en zonas de fracturas por la presencia de fluidos canalizados o minerales arcillosos. En este caso, la presencia

de fluidos podría ser la principal causa que origina este rasgo geoelectrico. La falla 1 es la más conductiva de las tres ($< 40 \Omega/m$) y consiste en una anomalía subvertical de inclinación del orden de 85° NE. Esta falla está asociada al alto 2 y afecta a los niveles B, C y D. Las fallas 2 y 3 son conductivas ($15-40 \Omega/m$), inclinan en el orden de 85° y 80° NE, respectivamente. Están asociadas al alto 3 y afectan a los niveles B, C y D. La falla 4 es conductiva ($15-40 \Omega/m$), inclina unos 80° NE, está ubicada debajo del bajo 2, afecta a los niveles C y D y coincide con

el lineamiento 2 (Figs. 3b y 6a).

Interpretación: El modelo geológico está basado en la interpretación del perfil geoelectrico y su posible correlación con unidades geológicas (descriptas en la sección “Estratigrafía”). Esta correspondencia entre los datos geoelectricos y geológicos se analizó en base a la localización de la transecta que permitió identificar la unidad geológica en superficie y aquellas aflorantes en sus inmediaciones, y en base a los rasgos geométricos y profundidad de yacencia de los niveles geoelectricos definidos en la descripción del modelo. Si

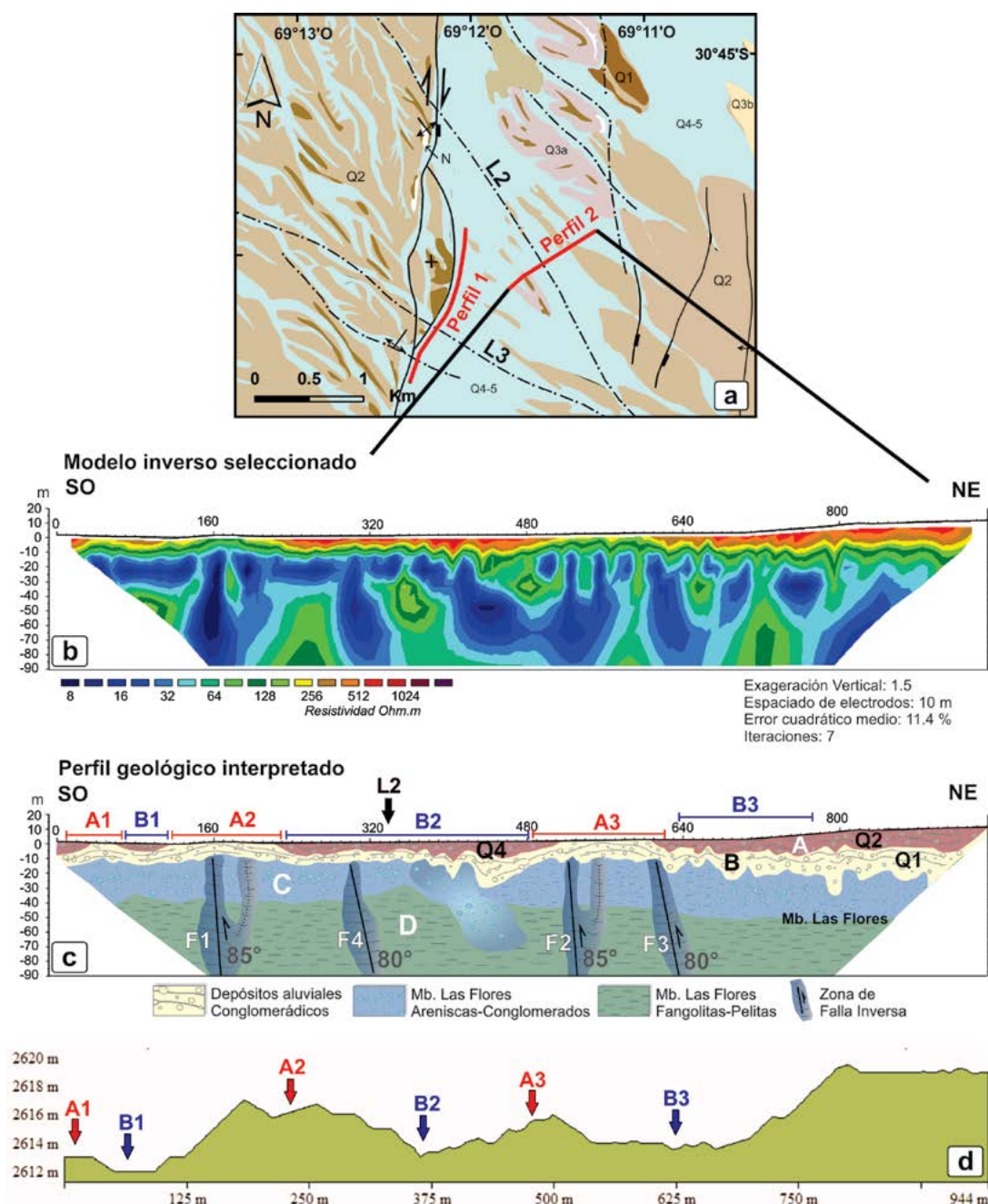


Figura 6: Perfil 2: a) Mapa geológico de ubicación; b) Modelo inverso seleccionado; c) Perfil geológico interpretado. A, B, C y D: niveles geoelectricos. Q1, Q2, Q4: depósitos cuaternarios. F1, F2, F3, F4: Fallas 1, 2, 3 y 4 con ángulos de inclinación. A1, A2, A4: Altos 1, 2, 3. B1, B2, B3: Bajos 1, 2, 3. L2: Lineamiento 2; d) Perfil topográfico de detalle a partir de un modelo de elevación digital (resolución 12.5 m) en donde se identifican los altos y bajos interpretados en el modelo c).

bien no existe una correlación lineal entre los niveles geoeléctricos y las unidades geológicas, esta interpretación permitió sugerir la presencia de al menos cuatro de ellas. El nivel geoeléctrico A correspondería a los depósitos Q2, en el noreste, y a los depósitos Q4, en el sudoeste, o Depósitos aluviales disectados antiguos y aluviales jóvenes, respectivamente. De igual forma que en el perfil 1, estos depósitos dominan en la superficie por la presencia de la bajada aluvial no disectada (Q4) y disectada (Q2) occidental de la Sierra del Tigre (Fig. 3a, Cuadro 1). El nivel geoeléctrico B correspondería a los depósitos Q1 o depósitos cuaternarios antiguos, y estaría cubierto en la mayor parte del perfil, excepto en el alto 2 asociado a una lomada del bloque bajo de la falla El Tigre (Cuadro 1), al sudoeste. Los niveles geoeléctricos C y D corresponderían al Miembro Las Flores de la Formación Rodeo (Figs. 3a, b y 5), por su posición estratigráfica y geográfica. Son bastante heterogéneos lateralmente por la presencia de discontinuidades subverticales y lentes o bolsones conductivos, donde particularmente el nivel C presentaría un acuífero localizado hacia el extremo suroeste. La profundidad de la Formación Rodeo en este modelo geoeléctrico, cercano a los 40 m, es consistente con un rechazo vertical inferior a los 60 m, estimado en el sector norte del segmento central de la falla.

En cuanto a estructuras, en los depósitos Q1, principalmente, y la parte superior del Miembro Las Flores (nivel C) se observa un flexuramiento amplio y suave que evidencia tres altos sutiles del sustrato (A1, A2, A3) y tres bajos entre ellos (B1, B2, B3) (Figs. 6c, d). Las inclinaciones de las unidades serían bajas entre 8 y 15°, con ángulos de apertura entre 155° y 159°, que los clasificaría como pliegues suaves. Los contornos de valores de resistividad de los niveles geoeléctricos que podrían correlacionarse a los depósitos cuaternarios, así como sus contactos estratigráficos interpretados, expresarían este flexuramiento. Los bajos estarían rellenos por los depósitos Q2 y Q4. Los altos del sustrato 1 y 2 se expresarían en superficie con una lomada del bloque bajo oriental de la falla, que incluso permite aflorar al depósito Q1, mientras que el alto 3 es un rasgo más incipiente (Fig. 6d). Asociadas a estos altos del sustrato aparecen tres discontinuidades subverticales: falla 1, 2 y 3. La falla 1 sería la de mayor conductividad e inclinaría cerca

de 85° NE y está vinculada con el alto 2 en subsuelo o Lomada en superficie y apenas ascendería y curvaría al Depósito Q1 y parte superior del Miembro Las Flores. Las fallas 2 y 3 son conductivas e inclinarían cercano a los 85° y 80° NE, respectivamente, similares a la anterior. Ambas yacen debajo el alto 3 y ascenderían y curvarían las mismas unidades. El nivel geoeléctrico B relacionado aquí con el depósito Q1, es el nivel guía que permite detectar las suaves inclinaciones de 8 a 15° del flexuramiento y un rechazo de unos 10 m en la vertical (Figs. 6b, c). La falla 4, también zona conductiva, inclina unos 80° NE y no mostraría un desplazamiento en la vertical aunque coincidiría con el lineamiento 2 (Figs. 3a y 6a) en superficie. Parece ser una estructura más antigua que las anteriores ya que únicamente afectaría los niveles geoeléctricos más profundos, interpretados como Miembro Las Flores, y podría estar vinculada a fracturas y lineamientos preexistentes y de extensión mayor, que no afectarían de forma activa a los niveles de agradación cuaternarios. Las demás estructuras interpretadas serían posteriores con una mayor expresión superficial en las lomas y flexuramiento de los niveles interpretados como Cuaternarios.

MODELO ESTRUCTURAL Y EDAD RELATIVA DE LA DEFORMACIÓN

La falla El Tigre es una falla de desplazamiento de rumbo dextral con componente inclinación, según lo demostrado en trincheras realizadas sobre la misma (INPRES 1982, Bastías *et al.* 1984, Bastías 1985, Siame 1998) y en los estudios geofísicos de subsuelo de Fazzito *et al.* (2013). Esta falla es intersectada sin desplazamiento evidente por la presencia de lineamientos transversales en sentido general ~NO-SE. Estos lineamientos, están definidos por rasgos geomorfológicos y podrían representar estructuras más profundas y antiguas heredadas del basamento precordillerano que habrían controlado la evolución tectónica y cinemática de la falla El Tigre (Fazzito 2011, Fazzito *et al.*, 2016). Particularmente, los lineamientos 2 y 3, objetos de estudio de este trabajo, han sido jerarquizados como estructuras relevantes tanto por rasgos geomorfológicos continuos, como por cambios estructurales que evidencian deformación transpresiva al

norte de los lineamientos y transtensiva al sur, presencia de rocas neógenas aflorantes al norte y ausencia de las mismas al sur, y cambios del sentido del drenaje SE-NO al norte y ESE-ONO al sur, tanto en el bloque oriental como en el occidental de la falla El Tigre. Los modelos geológicos obtenidos en este trabajo (Figs. 5c, 6c y 7) a partir de las tomografías eléctricas resistivas en dos dimensiones realizadas sobre lineamientos de escala regional permitieron comprobar la presencia de estructuras en subsuelo y caracterizar su geometría.

El lineamiento 3 (Figs. 5 y 7) fue identificado en subsuelo como una falla (1) subvertical (80° SO - 90°) que apenas desplazaría unos 10 m en su componente de inclinación de forma inversa al basamento neógeno (Miembro Las Flores de la Formación Rodeo) y afecta los depósitos agradacionales cuaternarios (Q4 y Q1) interrumpiendo y modificando sus geometrías, sin desplazamiento. La relación observada entre la falla 1 subvertical y los depósitos modernos demostraría que la primera ejerce un control pasivo sobre la deposición de los abanicos o bien presenta una mínima reactivación durante el Cuaternario. Esta falla estaría asociada con otras dos fallas menores a unos 100-200 m al sur, la primera (falla 2) subvertical que afectaría a los mismos niveles sin rechazo vertical evidente y la segunda (falla 3), inclina en el orden de 60° NE y desplazaría de forma inversa unos 5 m al Miembro Las Flores sobre el Miembro Lomas del Campanario, aunque el contacto lateral entre ambos miembros hace pensar que el rechazo vertical podría ser mayor. El lineamiento 2 (Figs. 6 y 7) que estaría asociado a una falla en subsuelo que inclina en el orden de 80° NE (falla 4), no evidenciaría desplazamiento de inclinación, afectaría al basamento neógeno pero no a los depósitos agradacionales cuaternarios, lo que permitiría inferir su origen pre-Cuaternario sin descartar reactivaciones posteriores.

Los rasgos subverticales detectados en los modelos geofísicos asociados a los lineamientos, identificados como estructuras mayores por cambios geológicos y geomorfológicos al norte y al sur de los mismos, permiten concluir que conformarían fallas subverticales con desplazamiento de rumbo principalmente, que afectan al basamento neógeno sin evidencias de deformación en los depósitos cuaternarios. Por lo tanto, co-

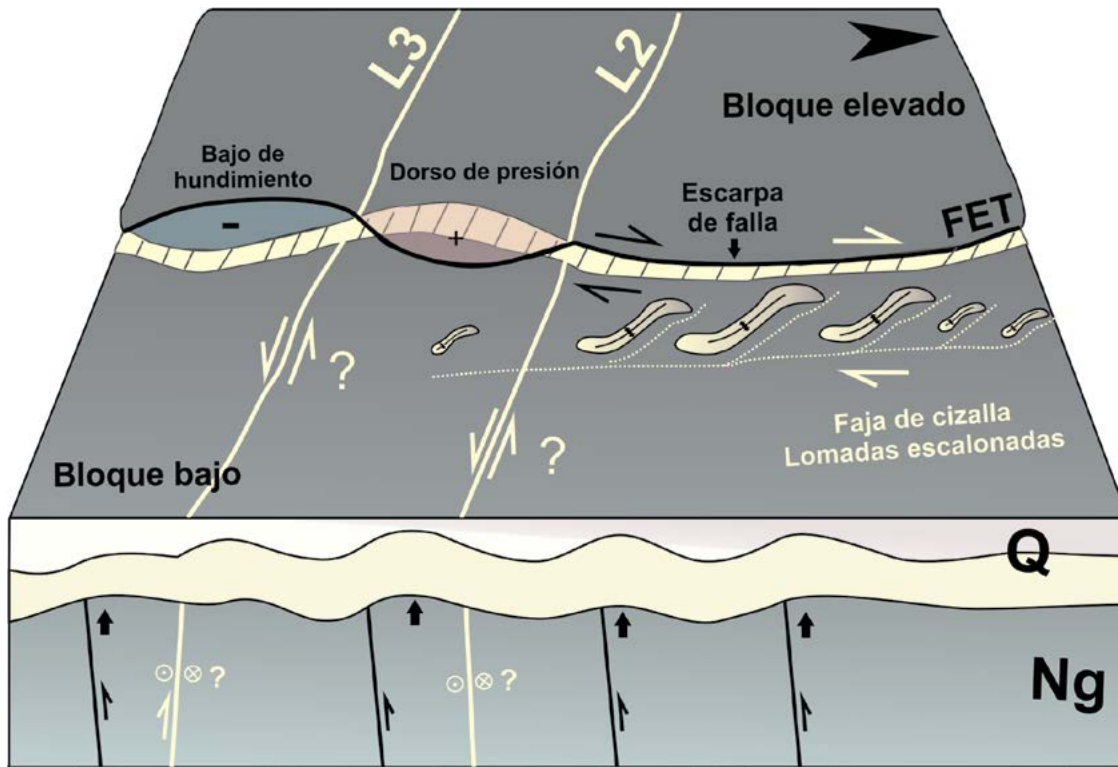


Figura 7: Modelo estructural en 3D. FET: falla El Tigre; L2-L3: Lineamientos 2 y 3; Ng: unidades neógenas; Q: unidades cuaternarias.

responderían a un fallamiento preexistente que controló de manera pasiva la evolución del paisaje y deposición de sedimentos asociados, sin actividad durante el Cuaternario. La cinemática de este sistema de fallas subverticales sólo puede inferirse por resultados paleomagnéticos previos (Fazzito *et al.* 2016) y por la presencia de otras fallas regionales en la Precordillera con la misma orientación, en este caso la zona de falla Hualilán, que indicarían desplazamiento de rumbo sinistral (Cortés *et al.* 2014, Oriolo *et al.* 2014, 2015).

Las lomadas del bloque bajo están conformadas esencialmente por afloramientos de unidades neógenas del Miembro Las Flores cubiertos parcialmente por niveles de agradación cuaternarios antiguos (Q1) (Fig. 3). El Neógeno en estas lomadas está deformado, con orientaciones muy variables donde se lo observa. Los depósitos cuaternarios están levemente basculados con inclinaciones de hasta 25°. En planta, las lomadas presentan una dirección general NO-SE así como una serie de lineamientos entre ellas y están ordenadas en una faja de dirección NNO-SSE (Figs. 3, 6 y 7). Tienen formas sigmoidales y están dispuestas en escalón o en *échelon*; pierden su expresión topográfica hacia el sudoeste, en donde se realizó el

segundo perfil geológico presentado en este trabajo. Los perfiles obtenidos permiten interpretar la presencia de un flexuramiento suave, coincidente con la lomada que atraviesa el perfil 2, que sería ascendida por desplazamientos verticales relativos de una falla subvertical (falla 1) y afecta al basamento neógeno y lo curva suavemente junto a los depósitos cuaternarios pleistocenos (Q1) (Fig. 6c). El desplazamiento vertical relativo de la lomada sería de unos 10 m en subsuelo y se evidencia por dos altos del sustrato (A1, A2) con inclinaciones bajas de 8 a 14°. Otro desplazamiento vertical relativo del sustrato aparece hacia el noreste, vinculado a dos fallas de 80°-85° NE subyacentes (fallas 2 y 3), aunque este alto (A3) es incipiente superficialmente, probablemente obliterado por los niveles de agradación cuaternarios (Q4, Q5). Esta flexura podría ser la raíz somera de otro alto estructural. Entonces, las lomadas escalonadas evidenciarían en subsuelo su desplazamiento vertical relativo por falla y flexuramiento lo que permite sospechar la presencia de una faja de cizalla dextral menor, entre el frente oriental que las vincula en dirección NNO-SSE y la traza principal de la falla El Tigre (Figs. 2 y 7). Estas estructuras se suman a las evidencias paleomagnéticas (Fazzito *et al.* 2016) sobre

el bloque elevado de la falla El Tigre que indican una estructuración e historia cinemática compleja con rotación de bloques según ejes verticales.

La deformación asociada a los lineamientos 2 y 3 estaría vinculada, según la interpretación realizada a partir de la geoelectrónica, a las fallas subverticales posiblemente de desplazamiento de rumbo con cinemática sinistral, y sería de edad pliocena (post-miocena) a pleistocena temprana ya que afectaría a ambos miembros de la Formación Rodeo (Mioceno) y no a los depósitos cuaternarios, ejerciendo un control pasivo sobre su deposición. Esta deformación constituiría una reactivación de estructuras transversales antiguas, que se incrementa hacia el segmento norte de la falla El Tigre (Fig. 1b), como se observa en la zona de falla Hualilán (Cortés *et al.* 2014, Oriolo *et al.* 2014, 2015). Durante la evolución cuaternaria de la falla El Tigre, estos lineamientos sufren reactivaciones que afectarían al basamento neógeno y controlan la distribución de la deformación cuaternaria que involucra tanto a la falla principal como a las estructuras secundarias menores. Posteriormente, otro evento de deformación originaría las fallas que ascenderían por desplazamiento vertical a las lomadas en *échelon* y curvan suavemen-

te al neógeno y a los depósitos cuaternarios antiguos (Q1), según los datos geológicos e interpretación geofísica. Esta deformación sería de edad pleistocena superior ya que afecta depósitos Pleistocenos y no parecería deformar a los depósitos aluviales jóvenes (Q4) que yacen en los bajos.

CONCLUSIONES

Los resultados de los estudios descriptos permiten concluir:

a) Dos perfiles geoeléctricos obtenidos en este trabajo alcanzaron una profundidad de hasta 90 m y permitieron distinguir unidades y estructuras geológicas vinculadas con rasgos observados previamente en superficie. Particularmente, se pudo caracterizar la geometría de estructuras en subsuelo conectadas a lineamientos regionales oblicuos a la falla El Tigre y a las lomadas del bloque bajo oriental de la misma.

b) Los lineamientos definidos previamente en planta por rasgos geomorfológicos continuos y cambios geológicos al norte y sur de los mismos, estarían vinculados a fallas subverticales de desplazamiento de rumbo que afectan esencialmente al basamento neógeno sin desplazamiento de inclinación evidente en los perfiles. Por comparación con trabajos previos (datos paleomagnéticos, zona de falla Hualilán Precordillera) se reafirma una posible cinemática que responde a un desplazamiento de rumbo sinistral.

c) La edad de la deformación vinculada a los lineamientos o fallas subverticales, sería pliocena a pleistocena temprana ya que afecta a ambos miembros de la Formación Rodeo (Mioceno) y ejerce un control pasivo en la deposición cuaternaria (Figs. 5 y 6). Esta deformación podría homologarse a la actividad que ocurre al menos desde el Plioceno en la falla El Tigre, tal como fuera determinado por estudios geofísicos de Fazzito *et al.* (2016). El pasaje entre el segmento central y norte de la falla El Tigre coincide con la abundancia de estos lineamientos que parecen controlar la distribución de la deformación.

d) Las lomadas escalonadas y sigmoidales del bloque bajo oriental de la falla El Tigre, exponen basamento neógeno y depósitos pleistocenos (Q1) en superficie, debido a un desplazamiento relativo vertical y flexuramiento del sustrato originado por fallas subverticales con rechazos verticales de

magnitud baja pero apreciable. Constituyen una faja de cizalla dextral limitada por la falla El Tigre al oeste, y un frente oriental NNO-SSE al este, comprobándose su origen estructural en subsuelo con los perfiles geoeléctricos del presente trabajo (Fig. 6).

e) La edad de la deformación que origina la faja de cizalla dextral habría estado activa hasta el Pleistoceno tardío ya que afecta a los depósitos pleistocenos antiguos (Q1) y no a los depósitos aluviales jóvenes (Q4).

f) Las evidencias geofísicas y geológicas presentadas confirman la complejidad de la deformación asociada a la falla El Tigre, según un modelo de múltiples bloques menores de distinta escala, tal como fue postulado por Fazzito *et al.* (2016), y la importancia que han tenido diferentes estructuras oblicuas durante la deformación, lo cual incide en la peligrosidad sísmica regional.

c) La tomografía eléctrica resistiva en dos dimensiones resultó una técnica geofísica satisfactoria para la caracterización de las estructuras neotectónicas a escala muy somera (100 m) y evidencia las discontinuidades frágiles y flexuramientos mediante zonas conductivas principalmente y disposiciones curvilineales de los niveles geoeléctricos, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), por medio del proyecto PIP (2012-2014) 112-201101-00294. Se agradece el apoyo en el trabajo de campo por parte del Lic. Pablo Franceschini y el estudiante Pablo Pérez. Se agradece la contribución a los revisores Dres. Carlos Costa y Alicia Favetto cuyos comentarios han mejorado sustancialmente este manuscrito.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

Allmendinger, R.W., Figueroa, D., Snyder, D., Beer, J., Mpodozis, C. y Isacks, B.L. 1990. Foreland shortening and crustal balancing in the Andes at 30°S latitude. *Tectonics* 9: 789-809.

Alonso, M.S. 2011. Estratigrafía, sistemas deposicionales y aspectos composicionales del relleno neógeno de la cuenca Rodeo-Iglesia, San Juan, Argentina. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 316 p., Buenos Aires.

Alvarado, P., Beck, S. y Zandt, G. 2007. Crustal

structure of the south-central Andes Cordillera and backarc region from regional waveform modeling. *Geophysical Journal International* 170: 858-875

Alvarado, P. y Ramos, V.A. 2011. Earthquake deformation in the northwestern Sierras Pampeanas of Argentina based on seismic waveform modeling. *Journal of Geodynamics* 51: 205-218.

Álvarez-Marrón, Rodríguez-Ferández, R., Heredia, N., Busquets, P., Colombo, F. y Brown, D. 2006. Neogene structures overprinting Palaeozoic thrust systems in the Andean Precordillera at 30° S latitude. *Journal of the Geological Society of London* 163: 949-64.

Ammirati, J.B., Alvarado, P., Perarnau, M., Sáez, M. y Monsalvo, G. 2013. Crustal structure of the Central Precordillera of San Juan, Argentina (31° S) using teleseismic receiver functions. *Journal of South American Earth Sciences* 46: 100-109.

Anderson, M., Alvarado, P., Zandt, G. y Beck, S. 2007. Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca plate, central Chile and Argentina. *Geophysical Journal International* 171: 419-434.

Astini, R.A., Ramos, V.A., Benedetto, J.L., Vaccari, N.E. y Cañas, F.L. 1996. La Precordillera: un terreno exótico a Gondwana. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploraciones e Hidrocarburos, Actas 5: 293-324, Buenos Aires.

Baldis, B.A. y Chebli, G. 1969. Estructura profunda del área central de la Precordillera sanjuanina. 4° Jornadas Geológicas Argentinas 1: 47-66, Mendoza.

Baldis, B.A., Beresi, M., Bordonaro, L.O. y Vaca, A. 1982. Síntesis evolutiva de la Precordillera Argentina. 5° Congreso Latinoamericano de Geología Argentina, Actas 4: 399-445, Buenos Aires.

Baranzagi, M. y Isacks, B.L. 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate under South America. *Geology*: 686-692.

Basile, Y.A. 2004. Estudio geológico y geofísico del sector sur de las Lomas del Inca, provincia de San Juan. Trabajo final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires (inédita), 118 p., Buenos Aires.

Bastías, H., Uliarte, E., Paredes, J., Sanchez, A., Bastías, J., Ruzicki, L. y Perucca, L. 1990. Neotectónica de la provincia de San Juan: 11° Congreso Geológico Argentino Relatorio: 228-244, San Juan.

Bastías, H.E. 1985. Fallamiento cuaternario en la

- región sismotectónica de Precordillera. Tesis Doctoral (inédita), Universidad Nacional de San Juan, 160 p., San Juan.
- Bastías, H. y Uliarte, E. 1988. Neotectonic of El Tigre fault system, Quaternary activity and geologic hazard relationship. 35° Congreso Brasileiro de Geología.
- Bastías, H.E. y Bastías, J.A. 1987. Fallamiento rumbo-deslizante en el borde oriental de los Andes entre los 32 y 26 grados de latitud sur. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 207-210, Tucumán.
- Bastías, H.E., Weidmann, N.E. y Pérez, A.M. 1984. Dos zonas de fallamiento Pliocuaternario en la Precordillera de San Juan. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 329-341, San Carlos de Bariloche.
- Bastías, H.E., Uliarte, E., Paredes, J.de D., Sanchez, A., Bastías, J.A., Ruzzycki, L. y Perucca, P. 1990. Neotectónica de la provincia de San Juan. 11° Congreso Geológico Argentino, Relatorio de geología y recursos naturales de la Provincia de San Juan: 228-244, San Juan.
- Bastías, H.E., Tello, G.E., Perucca, L.P. y de Paredes, J.D. 1993. Peligro sísmico y neotectónica. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos. En: Ramos, V.A. (ed), Geología y Recursos Naturales de Mendoza 6: 645-658, Mendoza.
- Bello Camilletti, G. 2012. Estudio geológico y geofísico del segmento central de la falla El Tigre, San Juan, Argentina. Tesis de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires, 99 p., Buenos Aires.
- Beer, J.A., Allmendinger, R.W., Figueroa, D.A. y Jordan T.E. 1990. Seismic stratigraphy of a Neogene piggy-back basin, Argentina. American Association of Petroleum Geology Bulletin 74: 1183-1202.
- Bercowski, F. 1993. Facies piroclásticas en el terciario del Valle de Iglesia, Provincia de San Juan, Argentina. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos 4: 206-215, Mendoza.
- Bufford, K.M., Atekwana, E.A., Abdelsalam, M.G., Shemang, E., Atekwana, E.A., Mickus y K., Molwalefhe, L. 2012. Geometry and faults tectonic activity of the Okavango Rift Zone, Botswana: Evidence from magnetotelluric and electrical resistivity tomography imaging. Journal of African Earth Sciences 65: 61-71.
- Cahill, T.A. y Isacks, B.L. 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca Plate. Journal of Geophysical Research 97: 17503-17529.
- Caputo, R., Piscitelli, S., Oliveto, A., Rizzo, E. y Lapenna, V. 2003. The use of electrical resistivity tomographies in active tectonics: examples from Tyrnavos Basin, Greece. Journal of Geodynamics 36: 19-35.
- Cardó, R. y Díaz, I.N. 2005. Memoria Hoja Geológica 3169-I, Rodeo. Servicio Geológico Minero Argentino, 52 p., Buenos Aires.
- Colella, A., Lapenna, V. y Rizzo, E. 2004. High-resolution imaging of the High Agri Valley Basin (Southern Italy) with electrical resistivity tomography. Tectonophysics 386: 29-40.
- Contreras, V.H., Damiani O., Milana, J.P., Bracco A.I. y Barrera, O.M. 1990. Paleógeno y Neógeno de San Juan. 11° Congreso Geológico Argentino, Actas: 154-185, San Juan.
- Cortés, J.M., Vinciguerra, P., Yamín, M. y Pasini, M.M. 1999. Tectónica Cuaternaria de la Región Andina del Nuevo Cuyo (28°- 38° LS). En: Caminos, R. (ed.), Geología Argentina. Subsecretaría de Minería de la Nación, Servicio Geológico Minero Argentino, Anales 29: 760-778, Buenos Aires.
- Cortés, J.M. y Cegarra, M. 2004. Plegamiento cuaternario transpresivo en el piedemonte suroccidental de la Precordillera sanjuanina. En: Cortés, J.M., Rossello, E.A., Dalla Salda, L.H. (eds), Avances en Microtectónica. Asociación Geológica Argentina, Serie D, Publicación Especial 7: 68-75, Buenos Aires.
- Cortés, J.M., Pasini, M. y Yamin, M. 2005a. Paleotectonic controls on the distribution of Quaternary deformation in the southern Precordillera, Central Andes (31°30'-33° SL). 6th International Symposium on Andean Geodynamics: 186-189, Barcelona.
- Cortés, J.M., Yamín, M.G. y Pasini, M.M. 2005b. La Precordillera Sur, Provincias de Mendoza y San Juan. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 395-402, La Plata.
- Cortés, J.M., Casa, A., Pasini, M.M. y Yamin, M.G. 2005c. Fajas de estructuras neotectónicas asociadas a rasgos paleotectónicos en Precordillera y Cordillera Frontal (31°30'-33°30'LS). 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 463-466, La Plata.
- Cortés, J.M., Casa, A., Pasini, M.M., Yamin, M.G. y 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.
- Cortés, J.M., Casa, A.L., Yamin, M.G., Pasini, M. y Terrizzano, C.M. 2014. Unidades morfotectónicas, estructuras oblicuas y patrones de distribución de la deformación cuaternarias en la Precordillera de Cuyo (28°-33°S). 19° Congreso Geológico Argentino, Actas: S20-14, Córdoba.
- Costa, C., Machette, M.N., Dart, R.L., Bastías, E., Paredes, N.D., Perucca, L.P., Tello, G.E. y Haller, K.M. 2000. Map and database of Quaternary Faults and Folds in Argentina. United States Geological Survey Open-File Reports 00-108, 75p.
- Costa, C.H., Audemard M., F.A., Bezerra, F.H.R., Lavenu, A., Machette, M.N. y París, G. 2006. An Overview of the Main Quaternary Deformation of South America. Revista de la Asociación Geológica Argentina 61: 461-479.
- Cristallini, E.O. y Ramos, V.A. 2000. Thick-skinned and thin-skinned thrusting in La Ramada fold and thrust belt: crustal evolution of the high Andes of San Juan, Argentina (32° SL). Tectonophysics 317: 205-235.
- Fazzito, S.Y. 2011. Estudios geofísicos aplicados a la neotectónica de la falla El Tigre, Precordillera de San Juan. Tesis doctoral (inédita). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Fazzito, S.Y., Rapalini, A.E., Cortés, J.M. y Terrizzano, C.M. 2009. Characterization of Quaternary Faults by Electric Resistivity Tomography in the Andean Precordillera of Western Argentina. Journal of South American Earth Sciences 28: 217-228.
- Fazzito, S. Y., Cortés, J. M., Rapalini, A. E. y Terrizzano, C.M. 2013. The geometry of the active strike-slip El Tigre Fault, Precordillera of San Juan, Central-Western Argentina: integrating resistivity surveys with structural and geomorphological data. International Journal of Earth Sciences 102: 1447-1466.
- Fazzito, S.Y., Rapalini, A.E., Cortés, J.M. y Terrizzano, C.M. 2016. Vertical-axis rotations and deformation along the active strike-slip El Tigre Fault (Precordillera of San Juan, Argentina) assessed through palaeomagnetism and anisotropy of magnetic susceptibility. International Journal of Earth Sciences: doi: 10.1007/s00531-016-1332-1.
- Furque, G. 1963. Descripción Geológica de la Hoja 17b-Guandacol. Servicio Geológico Nacional, Boletín 92, 104 p., Buenos Aires.
- Gagliardo, M., Caselli A., Limarino O., Colombo Piñol, F. y Tripaldi, A. 2001. Las unidades terciarias de la Cuenca Rodeo-Iglesia: validez y correlación de las unidades formacionales. Revista de la Asociación Geológica Argentina 5: 121-125.
- Gans, C.R., Beck, S.L., Zandt, G., Gilbert, H., Alvarado, P., Anderson, M. y Linkimer, L. 2011. Continental and oceanic crustal structure of the Pampean flat slab region, western Argentina, using receiver function analysis: new high-reso-

- lution results. *Geophysical Journal International* 186: 45-58.
- Gutscher, M.A., Spakman, W., Bijwaard, H. y Engdahl, E.R. 2000. Geodynamics of flat slab subduction: seismicity and tomographic constraints from the Andean margin. *Tectonics* 19: 814-833.
- INPRES 1977. Zonificación sísmica de la República Argentina. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Publicación Técnica n°5, 41 p., San Juan.
- INPRES 1982. Microzonificación sísmica del valle de Tulúm, provincia de San Juan. Instituto Nacional de Prevención Sísmica. Resumen Ejecutivo, San Juan.
- Isacks, B., Jordan, T., Allmendinger, R. y Ramos, V.A. 1982. La segmentación tectónica de los Andes Centrales y su relación con la placa de Nazca subductada. 5° Congreso Latinoamericano de Geología, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Japas, M.S. 1998. Aporte del análisis de fábrica deformacional al estudio de la faja orogénica andina. Homenaje al Dr. Arturo J. Amos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 53: 15.
- Japas, M.S., Ré, G.H. y Barredo, S.P. 2002. Lineamientos andinos oblicuos (entre 22° S y 33° S) definidos a partir de fábricas tectónicas. I. Fábricas deformacionales y de sismicidad. 15° Congreso Geológico Argentino 1: 326-331, El Calafate.
- Japas, M.S., Ré, G.H., Oriolo, S. y Vilas, J.F. 2015. Palaeomagnetic data from the Precordillera fold and thrust belt constraining Neogene foreland evolution of the Pampean flat-slab segment (Central Andes, Argentina). *Geological Society of London, Special Publications* 425: SP425-9.
- Johnson, A.T., Jordan, T.E., Johnson, N.M. y Naeser, C. 1987. Cronología y velocidad de sedimentación en una secuencia volcánoclastica, Rodeo, Provincia de San Juan, República Argentina. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 2:87-90, Tucumán.
- Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Damanti, J.F. y Drake, R. 1993. Chronology of motion in a complete thrust belt: the Precordillera, 30–31° S, Andes Mountains. *Journal of Geology* 101: 135-156.
- Kay, S.M., Orrell, S. y Abruzzi, J.M. 1996. Zircon and whole rock Nd-Pb isotopic evidence for a Grenville age and Laurentia origin for the basement of the Precordillera terrane in Argentina. *Journal of Geology* 104: 637-648.
- Leveratto, M.A. 1976. Edad de intrusivos cenozoicos en la Precordillera de San Juan y su implicancia estratigráfica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 31: 53-58.
- Loke, M.H. 1996-2006. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomo Software.
- Nguyen, F., Garambois, S., Jongmans, D., Pirard, E. y Loke, M.H. 2005. Image processing of 2D resistivity data for imaging faults. *Journal of Applied Geophysics* 57: 260-277.
- Oriolo, S., Japas, M.S., Cristallini, E.O. y Giménez, M. 2014. Cross-strike structures controlling magmatism emplacement in a flat-slab setting (Precordillera, Central Andes of Argentina). En: Llana-Fúnez, S., Marcos, A. y Bastida, F. (eds) *Deformation Structures and Processes within the Continental Crust*. Geological Society of London, Special Publications 394: 113-127.
- Oriolo, S., Cristallini, E.O., Japas, M.S. y Yagupsky, D. 2015. Neogene structure of the Andean Precordillera, Argentina: insights from analogue models. *Andean Geology* 42: 20-35.
- Ortiz, A. y Zambrano, J. 1981. La provincia geológica de Precordillera Oriental. 8° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 59-74, San Luis.
- Pérez, I. y Costa, C. 2011. El braquianticlinal del Cerro Negro de Iglesia y su relación con el Sistema de Fallamiento El Tigre, provincia de San Juan, Argentina. 18° Congreso Geológico Argentino, Actas en CD. doi: 10.13140/RG.2.1.3337.8409.
- Perucca, L.P. y Martos, L.M. 2009. Análisis preliminar de la evolución del paisaje cuaternario en el valle de Iglesia, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 624-637.
- Pilger, R.H. 1981. Plate reconstructions, aseismic ridges, and low angle subduction beneath the Andes. *Geological Society of America Bulletin* 92: 448-456.
- Ramos, V.A. 1999. Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes* 22: 183-190.
- Ramos, V.A. 2009. Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. *Geological Society of America, Memoir* 204: 31-65.
- Ramos, V.A., Jordan, T.E., Allmendinger, R.W., Kay, S.M., Cortés, J.M. y Palma, M. 1984. Un terreno alóctono en la evolución paleozoica de los Andes Centrales. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 84-106, San Carlos de Bariloche.
- Ramos, V.A., Vujovich, G.I. y Dallmeyer, R.D. 1996. Los klippen y ventanas tectónicas de la estructura peránica de la Sierra de Pie de Palo (San Juan): edad e implicaciones tectónicas. 18° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso Exploración de Hidrocarburos, Actas 5: 377-392, Buenos Aires.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O. y Perez, D.J. 2002. The Pampean flat-slab of the central Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 15: 59-78.
- Ré, G.H., Japas, M.S. y Barredo, S.P. 2001. Análisis de fábrica deformacional (AFD): El concepto fractal cualitativo aplicado a la definición de lineamientos cinemáticos neógenos en el Noroeste Argentino. En: Cortés, J.M., Rossetto, E.A. y Dalla Salda, L.H. (eds) *Avances en Microtectónica*. Asociación Geológica Argentina, Serie D: Publicación Especial 5: 75-82, Buenos Aires.
- Re G. 1994. Magnetoestratigrafía de la secuencia neogénica aflorante en arroyo Chaleta (Angualasto, San Juan), sus implicancias tectosedimentarias. 5° Jornadas Argentinas de Sedimentología, Abstracts: 205-209, Tucumán.
- Re, G. y Barredo, S. 1993. Estudio magnetoestratigráfico y tasa de sedimentación del Grupo Iglesia en sus afloramientos aledaños a la localidad de Angualasto (Prov. de San Juan). 12° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 148-155, Mendoza.
- Siame, L.L. 1998. Cosmonucléide produit in-situ (10Be) et quantification de la déformation active dans les Andes centrales. Thèse de doctorat. Université de Paris-Sud, Orsay, France.
- Siame, L.L., Sébrier, M., Bellier, O., Bourles, D.L., Castano, J.C., Araujo, M., Yiou, F. y Raisbeck, G.M. 1996. Segmentation and horizontal slip rate estimation of the El Tigre Fault Zone, San Juan Province (Argentina) from SPOT images analysis. 3° ISAG, Abstracts: 239-241, St Malo, France.
- Siame, L.L., Bourles, D.L., Sébrier, M., Bellier, O., Castano, J.C., Araujo, M., Perez, M., Raisbeck, G.M. y Yiou, F. 1997a. Cosmogenic dating ranging from 20 to 700 ka of a series of alluvial fan surfaces affected by the El Tigre Fault, Argentina. *Geology* 25: 975-978.
- Siame, L.L., Sébrier, M., Bellier, O., Bourles, D.L., Castaño, J.C. y Araujo, M. 1997b. Geometry, segmentation and displacement rates of the El Tigre Fault, San Juan Province (Argentina) from SPOT image analysis and 10Be datings. *Annales Tectonicae* 1: 3-26.
- Siame, L.L., Bellier, O., Sébrier, M. y Araujo, M. 2005. Deformation partitioning in fan subduction setting: case of the Andean foreland of western Argentina (28°S–33° S). *Tectonics* 24: 1-24.
- Siame, L.L., Bellier, O. y Sébrier, 2006. Active tectonics in the Argentine Precordillera and western Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61: 604-619.

- Terrizzano, C.M. 2010. Neotectónica del extremo noroccidental del cinturón Barreal -Las Peñas, Precordillera Sur. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 292 p., Buenos Aires.
- Terrizzano, C.M., Cortés, J.M., Fazzito, S.Y. y Rapalini, A.E. 2008. Neotectonic transpressive zones in Precordillera Sur, Central Andes of Argentina: a structural and geophysical investigation. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen* 253: 103-114.
- Terrizzano, C.M., Fazzito, S.Y., Cortés, J.M. y Rapalini, A.E. 2010. Studies of Quaternary deformation zones through geomorphic and geophysical evidence: A case in the Precordillera Sur, Central Andes of Argentina. *Tectonophysics* 490: 184-196.
- Terrizzano, C.M., Fazzito, S.Y., Cortés, J.M. y Rapalini, A.E. 2012. Electrical resistivity tomography applied to the study of neotectonic structures, northwestern Precordillera Sur, Central Andes of Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 34: 47-60.
- Vallejo, M.D. 2004. Estudio geológico y geofísico del sector norte de Lomas del Inca, Barreal del Leoncito, San Juan. Trabajo final de Licenciatura, Universidad de Buenos Aires (inédito), 120 p., Buenos Aires.
- von Gosen, W. 1992. Structural evolution of the Argentine Precordillera: the Río San Juan section. *Journal of Structural Geology* 14: 643-667.
- Wetten, C. 1975a. Geología del valle de Iglesia, su relación con los yacimientos de diatomita de Lomas del Campanario e importancia económica. Trabajo final de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan.
- Wetten, C. 1975. Estudio geológico económico de un yacimiento de diatomita y análisis de mercado. 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 5: 513-529, Buenos Aires.
- Yamin, M.G. 2007. Neotectónica del bloque Barreal, margen noroccidental de la Precordillera Sur. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 230 p., Buenos Aires.

Recibido: 15 de diciembre, 2016

Aceptado: 26 de abril, 2017