



# Análisis estructural del frente de deformación en el segmento norte de la faja plegada y corrida del Agrio (37°40'S - 70°O), Cuenca Neuquina

**Martín TURIENZO<sup>1,2</sup>, Natalia SÁNCHEZ<sup>1,2</sup>, Fernando LEBINSON<sup>1,2</sup>, Daniel STARCK<sup>3</sup>, Vanesa ARAUJO<sup>1,2</sup>, Ainara IRASTORZA<sup>1,2</sup>, Florencia PERALTA<sup>1</sup> y Luis DIMIERI<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Geológico del Sur (INGEOSUR), UNS-CONICET, Bahía Blanca, Argentina

<sup>2</sup> Dpto. de Geología, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina

<sup>3</sup> Geólogo Independiente. La Plata, Argentina.

Emails: turienzo@uns.edu.ar, natalia.sanchez@uns.edu.ar, fernando.lebinson@uns.edu.ar, daniel@starck.im, vanesa.araujo@uns.edu.ar, airastorza@ingeosur-conicet.gov.ar, mferalta89@gmail.com, ldimieri@uns.edu.ar

**Editor:** José F. Mescua

Recibido: 6 de julio de 2021

Aceptado: 22 de octubre de 2021

## RESUMEN

Se construyeron dos secciones balanceadas, sustentadas por datos de campo y subsuelo, en el frente de deformación de la faja plegada y corrida del Agrio norte (~37°40'S). El sistema de corrimientos Las Yeseras originó estructuras de primer orden en subsuelo, elevando el basamento ~2.3 km, mediante fallas que se insertan en evaporitas jurásicas y cretácicas (Formaciones Auquilco y Huitrín) creando zonas triangulares. Pliegues de segundo orden en la cubierta sedimentaria tienen longitudes de onda de ~4-5 km y despegue basal en la Formación Auquilco. Los anticlinales Veta Neuquén y San Eduardo tienen vergencia al oeste y rumbo N-S, mientras que los anticlinales Maitenes y Las Viseras tienen rumbo NNO, vergencia al oeste y este respectivamente, y se hallan transportados por corrimientos que cortan su limbo frontal. La posible presencia de fallas normales heredadas en el basamento controlaría la localización, rumbo y vergencia de los corrimientos que originaron los anticlinales Maitenes y Las Viseras. Pliegues de tercer orden tienen longitudes de onda de ~2.5 km y despegue en pelitas cretácicas (Miembro Pilmatué). El plegamiento por deslizamiento flexural de capas con diferente competencia originó corrimientos menores que acomodan la deformación en los limbos y charnelas. Las secuencias del Cretácico Tardío-Oligoceno en el sinclinal frontal están desplazadas por tres fallas normales lítricas, de rumbo NE-SO y buzamiento al NO, que se unen a un despegue en la Formación Huitrín. Este sistema extensional se habría formado por deslizamiento gravitacional inducido por el incremento de pendiente al levantarse el Dorso de los Chihuidos.

**Palabras clave:** anticlinales transportados, fallas de acomodación del plegamiento, fallas normales gravitacionales, corrimientos de piel gruesa

## ABSTRACT

*Structural analysis of the deformation front at the northern Agrio fold and thrust belt (37°40'S - 70°W), Neuquén Basin.*  
Two balanced cross-sections, supported by surface and subsurface data, were built in the deformation front of the northern Agrio fold and thrust belt (~37°40'S). The Las Yeseras thrust system originated first order structures at depth, rising ~2.3 km the basement, by means of faults inserted on jurassic and cretaceous evaporites (Auquilco and Huitrín Formations) creating triangle zones. Second order folds in the sedimentary cover have ~4-5 km wavelengths and basal detachment on the Auquilco Formation. The Veta Neuquén

and San Eduardo anticlines have west-vergence and N-S trend, while the Maitenes and Las Viseras anticlines have NNW trend, west and east vergence respectively, and both are transported by thrusts that cut their forelimbs. The possible presence of inherited normal faults in the basement would control the location, trend and vergence of thrust originating the Maitenes and Las Viseras anticlines. Third order folds have ~2.5 km wavelengths and a detachment on cretaceous shales (Pilmatué Member). Flexural slip folding of layers with different competence originated minor fold-accommodation thrusts in the limbs and hinges. Late Cretaceous-Oligocene sequences in the frontal syncline are displaced by three listric normal faults, of NE-SW trend and dipping to the NW, that join to a decollement on the Huitrín Formation. This extensional system would be formed by gravitational gliding induced by the increasing slope caused by the uplift of the Dorso de los Chihuidos.

**Keywords:** transported anticlines, fold-accommodation faults, gravitational normal faults, thick-skinned thrusts

## INTRODUCCIÓN

La faja plegada y corrida del Agrio se extiende aproximadamente 160 km en dirección NS y posee un ancho de ~60 km, desarrollado entre las localidades de Zapala y Chos Malal en el sector centro-oeste de la provincia del Neuquén (Fig. 1a). En esta región se hallan expuestas principalmente las sucesiones sedimentarias jurásicas y cretácicas que rellenaron la Cuenca Neuquina, deformadas por esfuerzos compresivos episódicamente a partir del Cretácico Tardío durante la orogenia Andina (e.g. Cobbold y Rossello 2003, Ramos y Folguera 2005, Kietzmann y Folguera 2020). La faja plegada y corrida del Agrio presenta una zona interna (occidental), dominada por estructuras de gran escala que involucran al basamento, y una zona externa (oriental) con deformación predominantemente de piel fina y participación subordinada del basamento (Zapata y Folguera 2005, Zamora Valcarce et al. 2006a, 2009). En el segmento norte de esta faja, aproximadamente entre los 37°20' y 37°50' de latitud sur (Fig. 1b), distintos investigadores han realizado secciones regionales que ilustran las principales estructuras que conforman tanto la zona interna como la externa. En algunas de estas secciones las estructuras de piel gruesa (de primer orden) son interpretadas como fallas normales invertidas (e.g. Zamora Valcarce et al. 2011, Rojas Vera et al. 2015) mientras que en otras se las consideran elevadas y desplazadas por corrimientos formados durante la compresión andina (e.g. Minniti et al. 1986, Nocioni 1996, Lebinson et al. 2015, 2018, 2020, Aramendia et al. 2019, Turienzo et al. 2020).

El área de estudio se ubica en la zona externa de la faja plegada y corrida del Agrio, entre los 37°30' y 37°44' de latitud sur, limitada al oeste por la ruta nacional 40 y al este por el Cerro Villegas (Fig. 1b). En diferentes sectores de esta región de la faja plegada existen estudios estructurales de detalle, pero no se ha llevado a cabo ningún estudio regional que integre las distintas estructuras que caracterizan este frente

de deformación. Entre las contribuciones previas se pueden mencionar algunos informes inéditos para empresas de hidrocarburos (e.g. Cristallini y Allmendinger 2000, Turienzo et al. 2016) y publicaciones referidas a estructuras específicas como las expuestas en la zona del anticlinal Huitrín (Lyons 1987), la deformación de los depósitos cenozoicos alrededor del Cerro Villegas (Zamora Valcarce y Fantín 2005), las fallas normales en la zona de tensión Las Salinas (Plotek et al. 2018), los pliegues de vergencia occidental en la zona de San Eduardo (Lebinson et al. 2020) y la geometría en subsuelo del sistema de corrimientos Las Yeseras y Pampa Tril (Turienzo et al. 2020). El objetivo principal de esta investigación es caracterizar el estilo estructural del frente de deformación andino en el segmento norte de la faja plegada y corrida del Agrio, esencialmente a partir del mapeo detallado, la medición de los pliegues y fallas aflorantes y su integración con la información de subsuelo disponible. El relevamiento de campo permitió diferenciar pliegues con rumbos, vergencias y longitudes de onda variables, en base a lo cual es posible reconstruir su geometría en subsuelo a partir de distintos niveles de despegue dentro de la cubierta sedimentaria creando pliegues de segundo y tercer orden. Un objetivo particular de este trabajo es analizar el abrupto cambio de vergencia entre los anticlinales Maitenes y Las Viseras, dos pliegues de segundo orden trasladados por corrimientos en sentidos opuestos, y evaluar si su desarrollo estuvo influenciado por posibles estructuras previas de *rift* infrayacentes. Por otro lado, se midieron diversas fallas menores, formadas en respuesta al plegamiento (*fold-accommodation faults*, Mitra 2002), que permiten examinar las variaciones locales de la deformación en diferentes posiciones estructurales de pliegues de tercer orden como el anticlinal Río Neuquén. Adicionalmente, se describen e interpretan una serie de fallas normales reconocidas en campo y en dos líneas sísmicas 2D, despegadas en niveles evaporíticos someros, comparables con las fallas que forman la zona de tensión Las Salinas (Ramos 1981, Plotek et al. 2018) pero

con diferente orientación. Se presentan dos secciones estructurales balanceadas para caracterizar el estilo estructural, estimar los acortamientos tectónicos y cuantificar la participación de estructuras de basamento infrayacentes, en esta región de la faja plegada y corrida del Agrio. Finalmente, se analizan distintos elementos del sistema petrolero en el área para evaluar el potencial prospectivo de un anticlinal interpretado en subsuelo. El sector relevado es atravesado por el río Neuquén lo cual, sumado a la heterogeneidad litológica, la diversidad y complejidad de las estructuras y la muy baja cobertura vegetal, da origen a espectaculares exposiciones. Tales características hacen de esta región un sitio ideal para la observación y estudio en campo de las estructuras tectónicas en el ámbito de la faja plegada y corrida de la Cuenca Neuquina.

## MARCO TECTONOESTRATIGRÁFICO

El inicio de la Cuenca Neuquina se produjo durante un régimen tectónico extensional asociado al desmembramiento

de Gondwana, el cual generó un sistema de *riffts* que evolucionaron diacrónicamente de norte a sur entre el Triásico Tardío y el Jurásico Temprano (Vergani et al. 1995, Franzese y Spalletti 2001, D'Elia et al. 2020). Los depocentros aislados fueron rellenados por heterogéneas sucesiones de *sinrift* genéricamente conocidas como ciclo Precuyano (e.g. Carbone et al. 2011), las cuales a lo largo de la cuenca incluyen algunos sectores dominados por depósitos continentales y otros por depósitos marinos, con y sin participación de rocas volcánicas (D'Elia et al. 2020). En el norte neuquino estas rocas afloran en la Cordillera del Viento (Fig. 1b), donde secuencias predominantemente volcánicas, de composición básica y ácida, yacen en discordancia sobre un substrato paleozoico (Llambías et al. 2007, Zappettini et al. 2018). La arquitectura de estos sistemas extensionales, al norte de la Dorsal de Huincul, está conformada principalmente por hemigrábenes de polaridad variable, asociados a fallas normales con rumbo dominante NO que en algunos sitios varían a NNO y ONO (Vergani et al. 1995, Cristallini et al. 2009, Giambiagi et al. 2009, Pángaro et al. 2011, Bechis et al. 2014). La acumulación de sedimentos en la Cuenca Neuquina entre el Jurásico

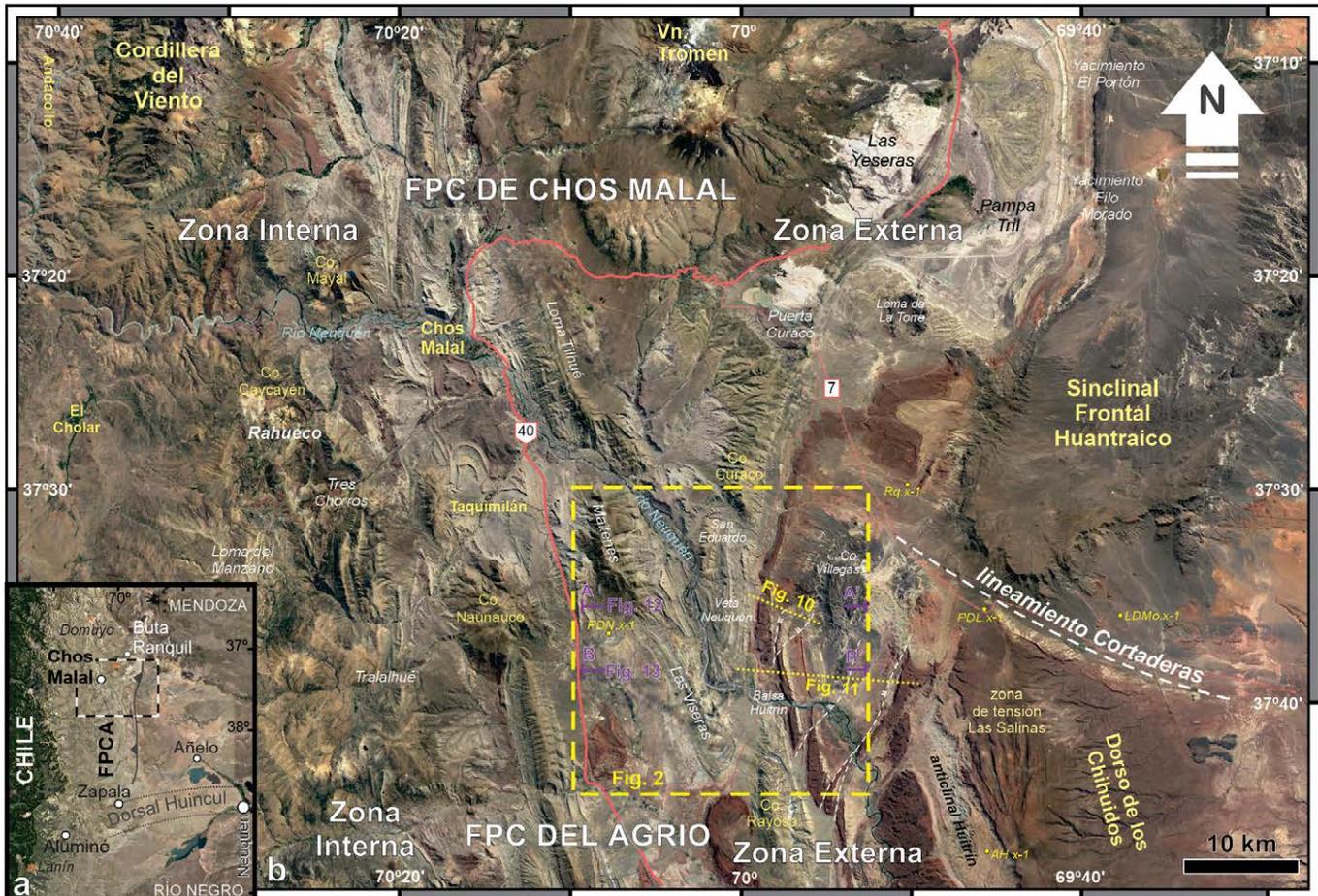
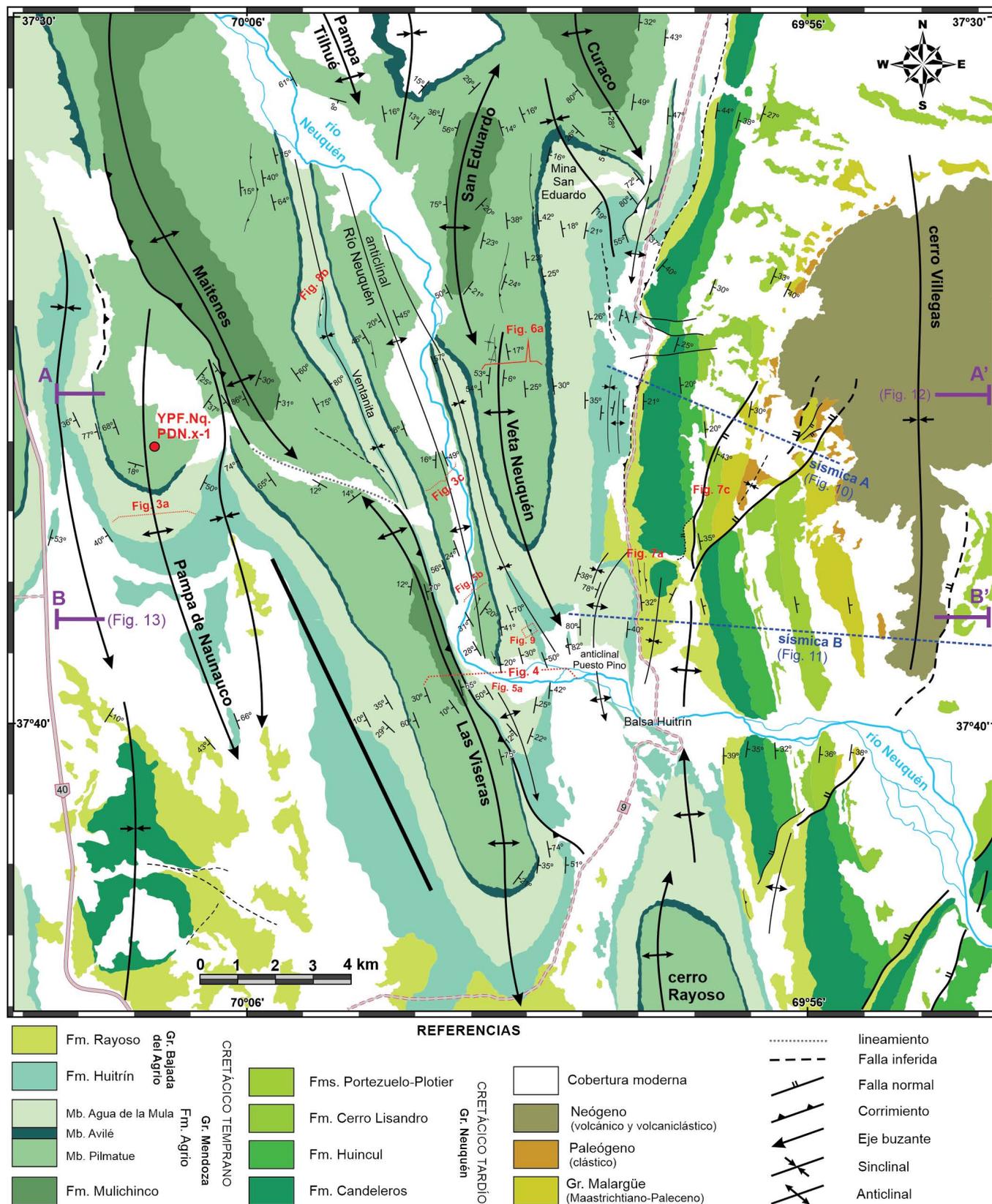


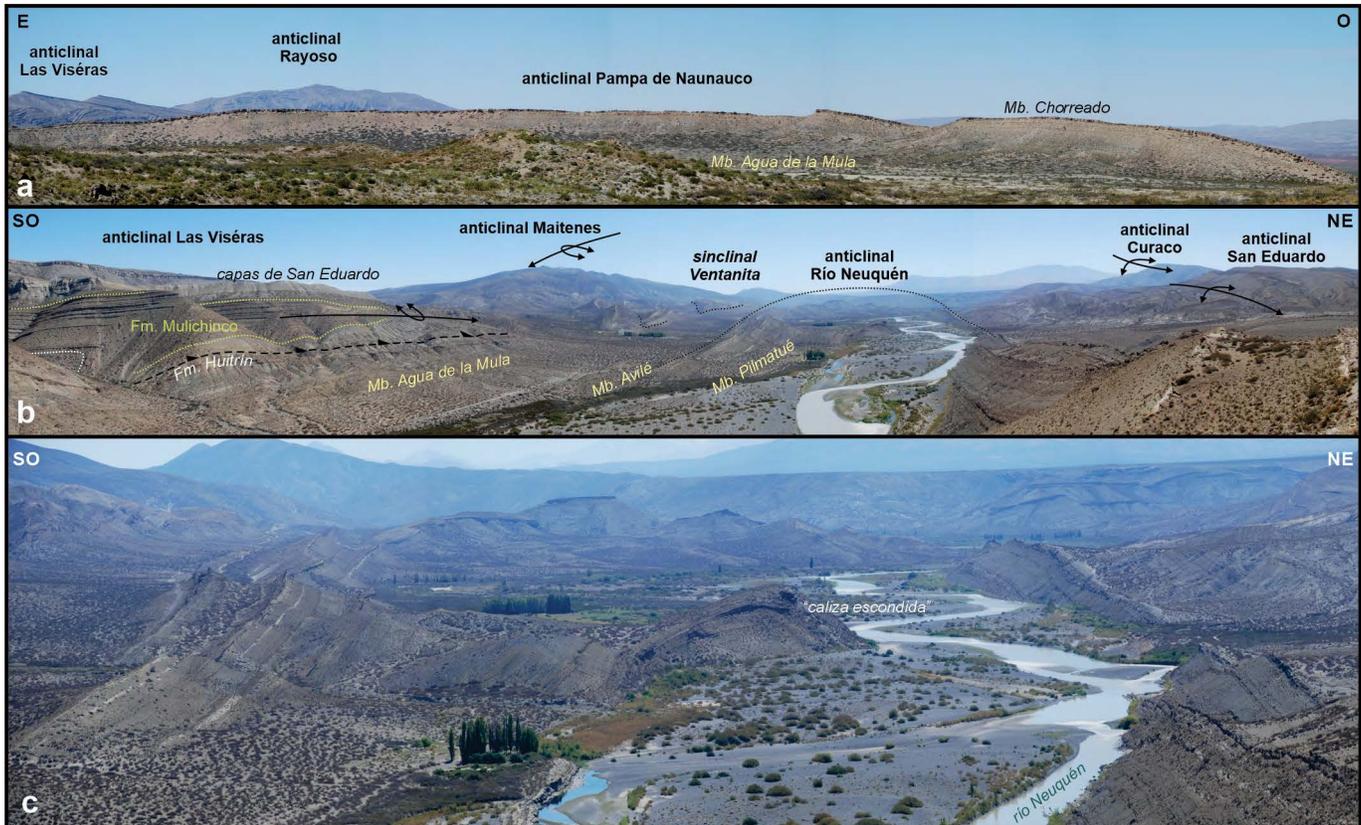
Figura 1. a) Localización de la faja plegada y corrida del Agrio (FPCA) al norte de la Dorsal de Huincul, provincia del Neuquén; b) Imagen satelital (tomada de *Google Earth*) mostrando la ubicación del área de estudio, en la zona externa de la faja plegada y corrida del Agrio.

y el Cretácico Temprano estuvo principalmente controlada por subsidencia térmica, en combinación con cambios eustáticos y levantamiento localizado en la región de la Dorsal de Huinul, que dieron lugar a numerosos ciclos marinos transgresivos-regresivos vinculados a períodos de conexión y desconexión con el océano Pacífico (Legarreta y Uliana 1991, Howell et al. 2005). En este contexto se depositaron rocas de origen marino y continental, las cuales componen los Grupos Cuyo, Lotena, Mendoza y Bajada del Agrio, que serán descritas brevemente considerando sus características en la región de estudio (Fig. 1b). El Grupo Cuyo comienza con bancos de calizas que son sucedidos por una potente secuencia pelítica de la Formación Los Molles y culmina con un delgado nivel evaporítico de la Formación Tábanos (Arregui et al. 2011a). El Grupo Lotena contiene rocas sedimentarias clásticas, carbonáticas y evaporíticas de las Formaciones Lotena, La Manga y Auquilco respectivamente (Arregui et al. 2011b). Estos dos grupos afloran en el flanco oriental de la Cordillera del Viento, en Las Yeseras y en Rahueco (Fig. 1b), contorneando a las principales estructuras de piel gruesa de la región. El Grupo Mendoza está integrado por depósitos clásticos rojizos y verdosos de la Formación Tordillo (Spalletti et al. 2011a), pelitas negras y calizas de la Formación Vaca Muerta (Kietzmann et al. 2016), rocas silicoclásticas y carbonáticas de la Formación Mulichinco (Schwarz et al. 2011) y por una espesa, compleja y heterogénea secuencia marina-continental de la Formación Agrio (Spalletti et al. 2011b, Pazos et al. 2020). La Formación Mulichinco es la unidad más antigua que aflora en el área relevada y se encuentra en el núcleo de los principales anticlinales, rodeada por la Formación Agrio (Fig. 2). Esta última formación se divide clásicamente en tres miembros. El Miembro Pilmatué es de origen marino y contiene principalmente pelitas, con calizas y areniscas subordinadas. Localmente en la zona mapeada este miembro contiene un potente nivel de areniscas finas, masivas, denominadas Capas de San Eduardo (Zavala et al. 2011) y un paquete de calizas arrecifales informalmente denominada Caliza Escondida (Zavala et al. 2014), que solo aflora en el núcleo del anticlinal Río Neuquén (Fig. 3). El Miembro Avilé está formado mayormente por areniscas de origen fluvial y eólico, y algunos niveles finos intercalados de origen lacustre (Veiga et al. 2011). El Miembro Agua de la Mula en esta región contiene predominantemente sedimentitas de grano fino, y carbonatos subordinados, de origen marino (Spalletti et al. 2011b). Esta sucesión es coronada por bancos de calizas del Miembro Chorreado, litoestratigráficamente definida como parte de la Formación Huitrín, pero que desde el punto de vista de la estratigrafía secuencial se incluye en la parte superior del Grupo Mendoza (e.g. Leanza 2003, Pazos et al. 2020). El Grupo Bajada del Agrio incluye a la Formación Huitrín, la cual

contiene areniscas, evaporitas y calizas, que evidencian la conexión final entre la Cuenca Neuquina y el océano Pacífico, y a la Formación Rayoso cuyos depósitos clásticos rojizos, principalmente fangolitas y areniscas, representan la continentalización del área (Leanza 2003). La Formación Huitrín se preserva en el núcleo de los principales sinclinales mientras que la Formación Rayoso se halla bien expuesta en una franja subparalela a la ruta provincial 9 (Fig. 2). La acumulación de sedimentos continentales continuó en el Cretácico Tardío con el Grupo Neuquén, marcando la evolución de la cuenca a un estadio de antepaís como consecuencia del inicio de la tectónica compresional andina (Ramos y Folguera 2005, Tunik et al. 2010, Fennell et al. 2020) y el crecimiento del arco magmático (Fuentes y Horton 2020). En el área de estudio afloran las Formaciones Candeleros, Huinul, Cerro Lisandro, Portezuelo y Plotier, que en general contienen conglomerados, areniscas y arcillitas rojizas en proporciones variables, expuestas principalmente en el sector oriental del mapa (Fig. 2). Estas rocas son cubiertas por el Grupo Malargüe, el cual incluye calizas fosilíferas que representan la primera ingresión marina atlántica a fines del Cretácico, causada probablemente por una combinación del ascenso global del nivel del mar (Barrio 1990), la carga tectónica de la faja plegada (Aguirre Urreta et al. 2011) y la subsidencia dinámica (Gianni et al. 2018). El magmatismo entre el Cretácico Tardío y el Eoceno produjo rocas volcánicas y subvolcánicas andesíticas (Zamora Valcarce et al. 2006a, Iannelli et al. 2020), representadas al oeste de la zona de estudio por las intrusiones de los cerros Mayal, Caycayen y Naunauco (Fig. 1b). La sedimentación paleógena dio lugar a delgadas y discontinuas secuencias de conglomerados, areniscas y arcillitas con aporte piroclástico, en las que se halló un resto de mamífero asignado al Oligoceno (Garrido et al. 2012). En el área de estudio dichos depósitos sobreyacen al Grupo Malargüe en el flanco occidental del sinclinal del cerro Villegas, y son cubiertos por potentes sucesiones volcánicas y volcanoclásticas neógenas (Fig. 2). Estas secuencias volcánicas están mayormente compuestas por coladas de basaltos olivínicos con edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de 17-18 Ma en la región de Huantraico (Dyhr et al. 2013) y ~15 Ma en el cerro Villegas (Kay y Copeland 2006). En la región de Tralalhué, al sudoeste del cerro Naunauco (Fig. 1b), afloran conglomerados sinorogénicos, asignados al Mioceno medio-tardío, vinculados a la contracción neógena en la faja plegada y corrida del Agrio (Ramos 1998, Zapata et al. 2002, Zamora Valcarce et al. 2006a, 2009, 2011). Finalmente, la actividad magmática durante el Cuaternario originó las coladas basálticas, domos riolíticos a andesíticos y depósitos piroclásticos en los alrededores del volcán Tromen (Galland et al. 2007), al norte del área de estudio (Fig. 1b).



**Figura 2.** Mapa Geológico de la zona relevada elaborado en base a datos propios (buzamientos simplificados por razones de escala), excepto para las unidades cenozoicas en el sector del cerro Villegas (basado en Ramos 1981 y Garrido et al. 2012) y las fallas normales al este del cerro Rayoso (basado en Cristallini y Allmendinger 2000).



**Figura 3.** a) Vista al sur de la zona de Charnela del anticlinal Pampa de Naunauco ( $37^{\circ}36'25''\text{S} - 70^{\circ}07'56''\text{O}$ ); b) Fotografía panorámica que muestra las principales estructuras en el sector norte del área de estudio, donde se destacan los anticlinales Maitenes y Las Viséras que poseen vergencia opuesta ( $37^{\circ}38'20''\text{S} - 70^{\circ}01'42''\text{O}$ ). c) Detalle del núcleo del anticlinal Río Neuquén donde aflora el Miembro Pilmatué.

## ESTRUCTURAS RELEVADAS

A lo largo de sucesivas campañas se adquirieron numerosos datos estructurales, incluyendo principalmente rumbo y buzamiento de los planos de estratificación y fallas, los cuales fueron volcados sobre una imagen satelital de alta resolución para confeccionar un mapa geológico detallado del área de estudio (Fig. 2). En este relevamiento se buscó especialmente caracterizar geoméricamente los pliegues presentes, a partir del reconocimiento y medición de su rumbo, vergencia, longitud de onda y unidades estratigráficas involucradas. También se reconocieron corrimientos, mayores y menores, y fallas normales, y en todos los casos donde fue posible se midieron indicadores cinemáticos (estrías y escalones) para corroborar su sentido de desplazamiento.

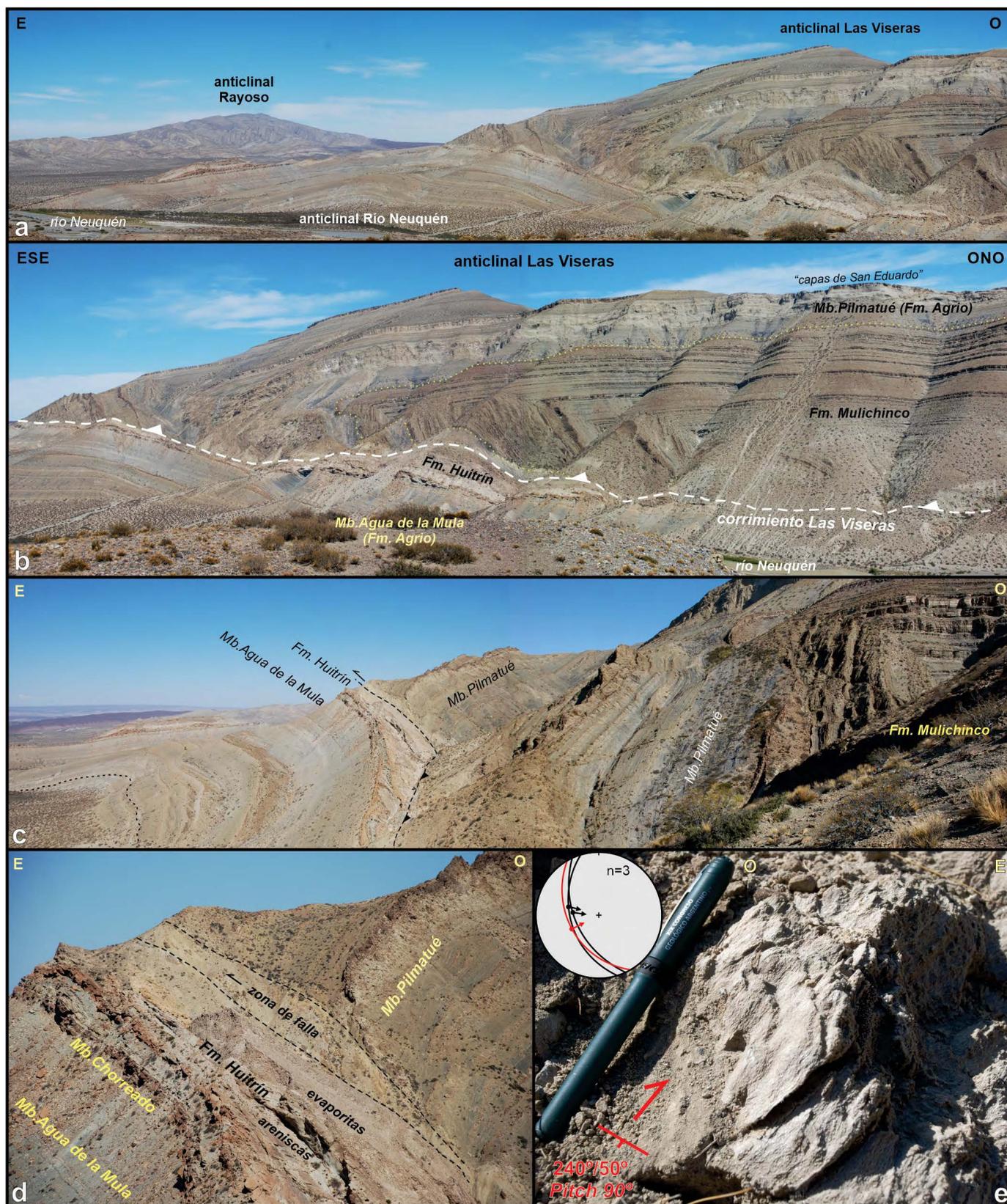
### Anticlinal Pampa de Naunauco

Este anticlinal tiene un rumbo NS, que cambia a NNO en su extremo sur, y expone en su núcleo al Miembro Pilmatué de la Formación Agrio (Fig. 2). Posee un eje buzante hacia el sur, y en esa dirección se observa su charnela muy suave y redondeada remarcada por los bancos carbonáticos del Miembro Chorreado (Fig. 3a). En el flanco oriental se midie-

ron buzamientos entre  $25^{\circ}$  y  $50^{\circ}$  al SE mientras que en el flanco occidental alcanza inclinaciones de hasta  $77^{\circ}$  O, definiendo así su vergencia hacia el oeste. El anticlinal Pampa de Naunauco tiene una longitud de onda de 4.3 km, medida entre los dos sinclinales aldeaños (Fig. 2). Estos sinclinales alojan en su núcleo a la Formación Huitrín y también tienen ejes que inclinan hacia el sur, donde afloran la Formación Rayoso y el Grupo Neuquén. El anticlinal se extiende aproximadamente unos 10 km a lo largo del rumbo, aunque esta longitud es parcial pues al norte se encuentra truncado por el retrocorrimiento Maitenes.

### Anticlinal Maitenes

El anticlinal Maitenes es uno de los pliegues más significativos de la región mapeada ya que en su núcleo aflora la Formación Mulichinco, elevada hasta una cota de  $\sim 1780$  msnm, creando un rasgo topográfico sobresaliente respecto a los  $\sim 800$  msnm que tiene el adyacente valle del río Neuquén (Fig. 3b). Este pliegue se extiende por aproximadamente 15 km con un rumbo NNO ( $N25^{\circ}\text{O}$ ) y su eje inclina de manera pronunciada al sur, donde aflora el Miembro Pilmatué rodeando a la Formación Mulichinco (Fig. 2). En su extremo norte, fuera del área del mapa, en el núcleo del anticlinal se halla ex-



**Figura 4.** a) Fotografía panorámica que muestra los principales pliegues en el sector sur del área de estudio ( $37^{\circ}38'20''\text{S} - 70^{\circ}01'42''\text{O}$ ); b) Vista oblicua del anticlinal Las Viseras cabalgado hacia el este sobre el flanco occidental del anticlinal Río Neuquén; c) Estratos del Miembro Pilmatué, buzantes al este, montados sobre la Formación Huitrín buzante al oeste ( $37^{\circ}39'31''\text{S} - 70^{\circ}02'01''\text{O}$ ); d) Zona de falla asociada al corrimiento Las Viseras; e) Plano de falla con estrías y escalones, medido en evaporitas de la Formación Huitrín (el estereograma ilustra los datos relevados).

puesta parcialmente la Formación Vaca Muerta (Lebinson et al. 2018, 2020). El flanco oriental presenta buzamientos entre 15° y 30° E mientras que el flanco occidental es subvertical, con buzamientos de hasta 86° O. El anticlinal Maitenes tiene vergencia hacia el oeste y en su limbo frontal esta localmente cortado por un retrocorrimiento que lo traslada parcialmente sobre el sinclinal-anticlinal Pampa de Naunauco (Fig. 2). En el sector sur del pliegue, estratos verticales e incluso algunas capas invertidas de la Formación Mulichinco se hallan cabalgadas sobre estratos verticales de la parte superior del Miembro Pilmatué, estando ausente la secuencia basal de esta unidad. Al estar el pliegue cortado por la falla no es posible medir exactamente su longitud de onda, pero el ancho máximo mapeado es de aproximadamente 5 km. En el flanco trasero del anticlinal, cerca del río Neuquén, se observa un retrocorrimiento menor dentro del Miembro Pilmatué que genera una repetición de bancos y un aumento de los buzamientos en el bloque de techo (Fig. 2).

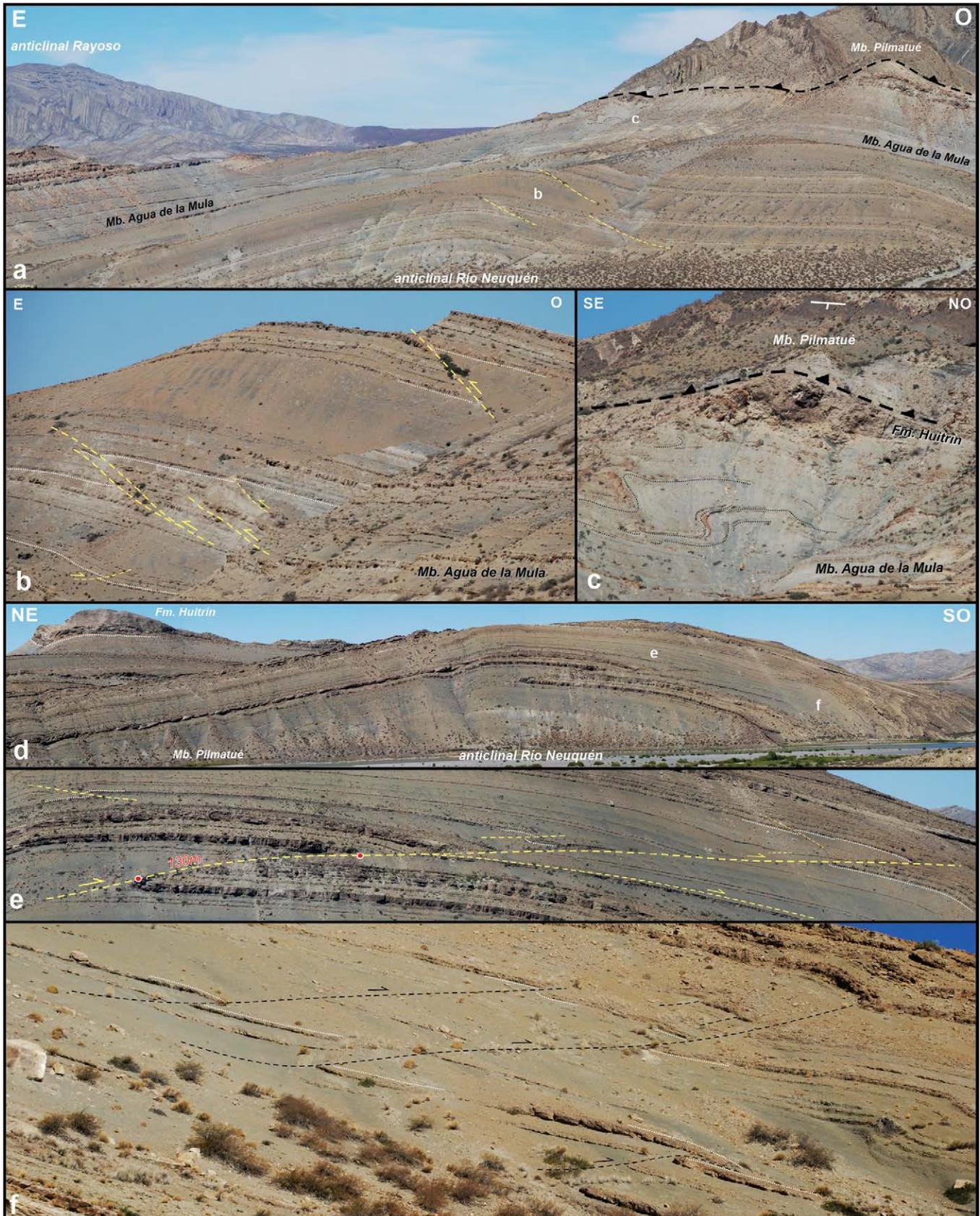
### Anticlinal Las Viseras

Este anticlinal tiene un rumbo NNO (N20°O) y una clara vergencia hacia el este, con buzamientos de 30°-35° O en el flanco trasero y de 65°-75° E en el delantero (Fig. 2). Tiene una extensión de 15 km a lo largo del rumbo y su eje buzante en dos direcciones, aunque se hunde de forma más pronunciada hacia el sur formando en el mapa una destacada nariz anticlinal delineada por las Formaciones Agrio y Huitrín. El anticlinal Las Viseras está cortado por un corrimiento NNO en su limbo frontal, el cual lo eleva y transporta sobre el flanco occidental del anticlinal Río Neuquén ubicado inmediatamente hacia el este (Fig. 3b-c). La longitud de onda mínima estimada para este anticlinal midiendo su máximo ancho de afloramiento hasta el corrimiento, es de aproximadamente 4 km. Al sur del río Neuquén es posible observar esta configuración de un anticlinal cabalgado sobre otro anticlinal, donde el excelente nivel de exposición otorga una vista única de una de las estructuras más espectaculares de toda la faja plegada y corrida neuquina (Fig. 4a). En el núcleo del anticlinal Las Viseras se distinguen con claridad las capas más gruesas de la Formación Mulichinco, rodeadas por pelitas negras de la sección basal del Miembro Pilmatué, y coronando el pliegue los bancos arenosos que componen las Capas de San Eduardo (Fig. 4b). Se debe destacar que en las vistas oblicuas al rumbo de la estructura el limbo frontal del anticlinal aparenta estar en posición invertida (Figs. 3b y 4a-b), pero al medirlo y observarlo en detalle en un corte perpendicular al rumbo es posible verificar que se encuentra en posición normal y buzante 65° hacia el este (Fig. 4c). El mayor desplazamiento del corrimiento ocurre en la parte central del pliegue, donde

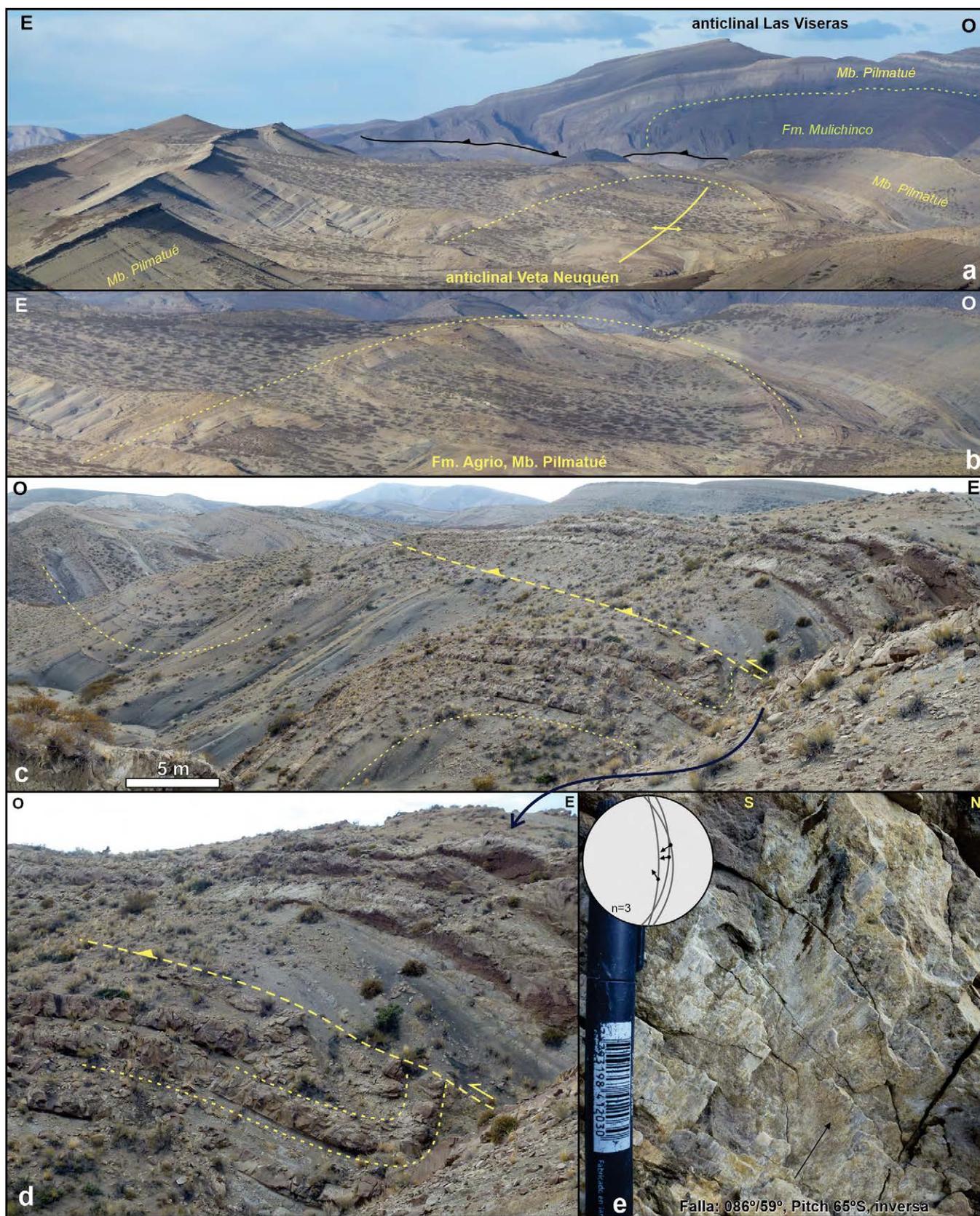
la Formación Mulichinco es cabalgada sobre la Formación Huitrín (Fig. 4b), mientras que hacia los extremos la unidad cabalgada es el Miembro Pilmatué (Fig. 4c). La zona de falla tiene un ancho variable, de unos pocos metros, inclina hacia el oeste, y se desarrolla sobre los niveles evaporíticos de la Formación Huitrín que forman el limbo occidental del anticlinal subyacente (Fig. 4d). La baja competencia de estas evaporitas dificulta la preservación de indicadores cinemáticos, a pesar de lo cual se observaron y midieron algunas superficies con estrías y escalones que corroboran el corrimiento buzante aproximadamente 50° OSO con su bloque de techo ascendido hacia el este (Fig. 4e).

### Anticlinal Río Neuquén

Es un pliegue continuo a lo largo del rumbo (~17 km), con una orientación NNO (N15°-20° O), dispuesto subparalelo al río Neuquén y a los anticlinales Maitenes y Las Viseras (Fig. 2). El anticlinal Río Neuquén tiene una longitud de onda de 2 a 2.5 km, medida entre los dos sinclinales ubicados al este y oeste. El sinclinal Ventanita, denominado así por un llamativo rasgo erosivo en estratos verticales del Miembro Chorreado cerca de su núcleo, se observa únicamente en la región norte ya que en el sector sur ha sido sobrecorrido por el anticlinal Las Viseras. La unidad más antigua involucrada en la zona interna del anticlinal Río Neuquén es el Miembro Pilmatué (Fig. 3b-c), y en sus flancos se midieron buzamientos de ~20° O y ~50° E que indican una vergencia hacia el este (Fig. 2). El eje del anticlinal presenta un hundimiento más marcado en su extremo sur, donde afloran el Miembro Agua de la Mula y la Formación Huitrín formando una charnela suave y redondeada (Fig. 5a). En una vista más detallada del flanco occidental, cerca de la zona de charnela, los estratos del Miembro Agua de Mula muestran desplazamientos de algunos metros, afectados por corrimientos menores (Fig. 5b). Estos corrimientos cortan con bajo ángulo a los planos de estratificación (~15°-30°) y no evidencian continuidad en profundidad, sino que despegan en diferentes intervalos pelíticos dentro del mismo flanco del anticlinal. En la parte superior del Miembro Agua de la Mula se observa un fuerte plegamiento, con algunos bancos localmente fallados, marcadamente asimétrico, con vergencia al este (Fig. 5c). Estos repliegues se localizan en el bloque de piso del corrimiento Las Viseras, muy cerca de la zona de falla, y podrían haberse originado durante el mismo evento de deformación. En otro corte natural generado por el río se tiene una de las vistas más atractivas del anticlinal Río Neuquén, caracterizado por una charnela redondeada, con bancos competentes del Miembro Pilmatué fallados y repetidos en su núcleo (Fig. 5d). El retrocorrimiento observado en la zona interna del anticlinal despega



**Figura 5.** Vistas hacia el sur del anticlinal Río Neuquén ( $37^{\circ}38'20''\text{S} - 70^{\circ}01'42''\text{O}$ ): a) Miembro Agua de la Mula plegado; b-c) Corrimientos menores y repliegues en el limbo occidental; d) Miembro Pilmatué plegado ( $37^{\circ}37'31''\text{S} - 70^{\circ}02'27''\text{O}$ ); e) Retrocorrimiento que repite los bancos competentes en el núcleo; f) Retrocorrimientos menores en el flanco occidental ( $37^{\circ}38'16''\text{S} - 70^{\circ}01'59''\text{O}$ ).



**Figura 6.** a-b) Fotografías hacia el sur del anticlinal Veta Neuquén, con el Miembro Pilmatué en el núcleo ( $37^{\circ}34'09''\text{S} - 70^{\circ}01'23''\text{O}$ ); c) Vista al norte de los pliegues menores en la zona de transición entre los anticlinales Veta Neuquén y San Eduardo ( $37^{\circ}34'36''\text{S} - 70^{\circ}01'33''\text{O}$ ); d) Sinclinal de arrastre en el bloque de piso de un retrocorrimiento menor; e) Plano de falla con estrías y escalones (el estereograma ilustra los datos relevados).

en los niveles finos infrayacentes, corta con muy bajo ángulo a la estratificación, y desplaza más de 100m hacia el oeste a las capas arenosas y carbonáticas que forman la sección superior del Miembro Pilmatué (Fig. 5e). El desplazamiento transmitido por este retrocorrimiento se distribuye mediante numerosos retrocorrimientos menores que afectan a las capas suprayacentes en el flanco occidental del anticlinal (Fig. 5f). Si bien en esta vista el anticlinal Río Neuquén aparenta una leve vergencia hacia el oeste, los buzamientos medidos en el flanco oriental, que se incrementan gradualmente hacia el tope de la Formación Agrio hasta alcanzar una posición vertical, indican que el pliegue está volcado hacia el este. La génesis del retrocorrimiento en la charnela de este anticlinal, así como otras fallas menores asociadas al plegamiento, se analizará más adelante.

### Anticlinal San Eduardo

Este anticlinal se caracteriza por un rumbo N-S y una clara vergencia hacia el oeste, corroborada por los bajos buzamientos en su limbo trasero y buzamientos de hasta 75° O en el limbo frontal (Fig. 2). Se extiende aproximadamente 8 km a lo largo del rumbo, con su eje buzante tanto al norte como al sur, y tiene una longitud de onda de 5 km. La Formación Mulichinco aflora en el núcleo de este pliegue. En el flanco oriental se relevaron dos retrocorrimientos menores que desplazan y repiten unos pocos metros algunos bancos dentro del Miembro Pilmatué y al Miembro Avilé (Fig. 2). El retrocorrimiento principal responsable de la formación de este anticlinal no aflora, y junto con las fallas asociadas a otros pliegues de vergencia occidental en el sector norte del área de estudio forman el sistema de retrocorrimientos San Eduardo (Lebison et al. 2020).

### Anticlinal Veta Neuquén

Al igual que el pliegue anterior, el anticlinal Veta Neuquén tiene un rumbo N-S y vergencia hacia el oeste, con un flanco oriental buzante 25°-30° E y un flanco occidental que inclina 54° O (Fig. 2). Posee una longitud de onda de 4 km y se extiende unos 7 km a lo largo del rumbo, con su eje buzante de forma pronunciada hacia el sur formando una notable nariz anticlinal. Desde el punto de vista geomorfológico puede caracterizarse como un anticlinal desventrado, en el cuál su núcleo presenta menores elevaciones que los flancos a causa de los materiales más friables aflorantes en su zona interna (Fig. 6a). Su charnela es amplia y redondeada, exponiendo las sucesiones más finas del Miembro Pilmatué (Fig. 6b). Las unidades superiores de la Formación Agrio en el flanco oriental aforan de manera ininterrumpida hacia el norte, por más 12 km, hasta la mina San Eduardo (Fig. 2). Este flanco

compartido por los anticlinales Veta Neuquén y San Eduardo permite inferir que ambas estructuras podrían haber formado un mismo tren de plegamiento, fragmentado y desplazado diferencialmente mediante una zona de transferencia. En la región de la culminación sur del anticlinal San Eduardo y la culminación norte del anticlinal Veta Neuquén, las rocas del Miembro Pilmatué se encuentran intensamente deformadas configurando un sinclinal y un anticlinal de escala decamétrica (Fig. 6c). Adicionalmente, el limbo oriental del anticlinal es cortado por un retrocorrimiento que genera un pequeño sinclinal de arrastre en su bloque de piso (Fig. 6d). En esa zona de falla se midieron superficies con estrías y escalones que indican el desplazamiento del bloque de techo hacia el oeste, con un movimiento predominantemente inverso (Fig. 6e).

Hacia el este del anticlinal Veta Neuquén, aflora la Formación Huitrín afectada por corrimientos y pliegues relativamente menores, con longitudes de onda de aproximadamente 200-300 m (Fig. 2), e internamente presenta estructuras aún menores (no diferenciables a la escala del mapa). Esta significativa deformación diferencial dentro de la Formación Huitrín, muy común en toda la faja plegada y corrida de la Cuenca Neuquina, se debe fundamentalmente a la presencia de evaporitas que favorecen el desacople de las suprayacentes capas carbonáticas.

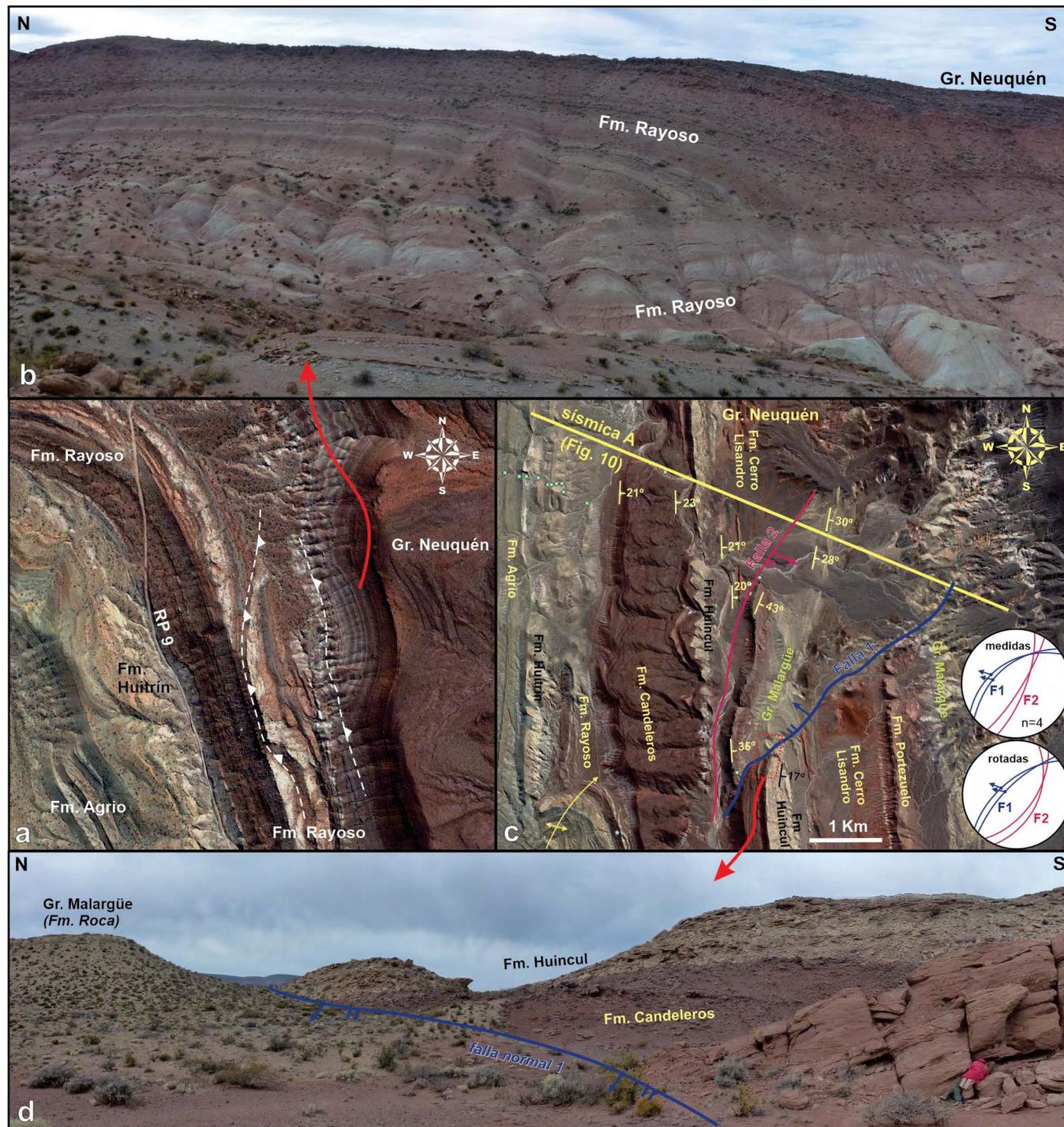
### Anticlinal Puesto Pino

Se trata de un pliegue de rumbo N-S, con una longitud de onda de aproximadamente 2 km, desarrollado al noroeste de la Balsa Huitrín que cruza el río Neuquén (Fig. 2). Tiene una extensión de 4 km a lo largo del rumbo y eje doblemente buzante. La unidad más antigua expuesta en su zona interna es el Miembro Agua de la Mula. Presenta una marcada vergencia hacia el oeste, con buzamientos de 40° E en el limbo trasero y 80° O en el limbo frontal, que llega a invertirse en las capas de la Formación Huitrín (Fig. 2). Sobre el flanco oriental del anticlinal Puesto Pino, al este de la ruta provincial 9, se observan dos retrocorrimientos menores, de rumbo aproximado N-S, que repiten estratos dentro la Formación Rayoso (Fig. 7a). Los despegues dentro de esta unidad se ven favorecidos por la presencia de algunos niveles de evaporitas y espesas sucesiones de fangolitas. Sobre uno de estos retrocorrimientos se aprecia el plegamiento de los estratos cabalgados, formando la culminación sur del bloque de techo (Fig. 7b), posiblemente relacionado a la presencia de una rampa lateral (Boyer y Elliott 1982). Hacia el sur de estas estructuras se encuentra el anticlinal del cerro Rayoso (Figs. 2 y 4a), un pliegue muy importante que se extiende más allá del área de nuestro trabajo y que ha sido estudiado en detalle por Cristallini y Allmendinger (2000).

### Sistema de fallas normales del cerro Villegas

En una amplia región al sur del cerro Villegas se observa un sistema de fallas con rumbo NE-SO (Figs. 1b y 2), llamadas por el significativo desplazamiento horizontal aparente que afecta a las distintas unidades del Grupo Neuquén (Ra-

mos 1981). La localización de estas fallas en el frente de deformación de la faja plegada y corrida del Agrio, coexistiendo con estructuras compresivas como el anticlinal Ranquiles y corrimientos menores asociados, conllevó a que en algunos mapas sean cartografiadas como fallas inversas con inclina-



**Figura 7.** a) Imagen de detalle (de *Google Earth*) indicando los retrocorrimientos menores que repiten niveles de la Formación Rayoso en el flanco oriental del anticlinal Puesto Pino (localización en Figura 2); b) Vista frontal de niveles repetidos, plegados en el bloque de techo sobre una rampa lateral ( $37^{\circ}37'55''S - 69^{\circ}58'59''O$ ); c) Imagen de detalle (de *Google Earth*) mostrando dos fallas normales relevadas al sudoeste del cerro Villegas (localización en Fig. 2). Los estereogramas contienen las superficies de falla medidas y su posición rotada de acuerdo al plano de estratificación (explicación en el texto); d) Fotografía de la falla principal (F1) que buza al NO y pone en contacto al Grupo Malargüe con la Formación Huincul ( $37^{\circ}37'28''S - 69^{\circ}57'42''O$ ).

ciones principalmente al sudeste (Ramos 1981, Zamora y Fantín 2005). En la zona estudiada se presentan tres fallas principales y una falla menor antitética en las que, mediante datos de campo e interpretación de dos líneas sísmicas que se describirán más adelante, fue posible reconocer su carácter extensional y por lo tanto mapearlas como fallas normales (Figs. 1b y 2). Las dos fallas de más al sur se extienden hasta el faldeo oriental del cerro Rayoso, donde fueron medidas en campo y cartografiadas por Cristallini y Allmendinger (2000) como fallas normales con planos buzantes al noroeste. En este trabajo, analizaremos la expresión de dichas fallas en subsuelo. Las otras dos fallas, al norte del río Neuquén, se prolongan hasta el sector sudoeste del sinclinal cerro Villegas (Fig. 2). La falla principal en ese sector produce un desplazamiento horizontal aparente mayor a 2 km de las unidades superiores del Grupo Neuquén y del Grupo Malargüe. En esa zona de falla se midieron dos superficies con estrías, cuyas orientaciones son N50°E/62°NO, pitch 70°SO, y N48°E/56°NO, pitch 62°SO (Fig. 7c, falla 1). En el bloque de techo de esta falla se observan estratos de las Formaciones Portezuelo-Plotier y del Grupo Malargüe, con buzamientos de aproximadamente 30°-35° E, mientras que en el bloque de piso se encuentran las Formaciones Candeleros y Huincul (Fig. 7d), con buzamientos de 17° E. El intervalo estratigráfico ausente por acción de esta falla normal, entre la base del Grupo Malargüe y el techo de la Formación Candeleros, es de aproximadamente 900 m. Considerando la falla que buza 62°NO, este desplazamiento vertical implica un desplazamiento sobre el plano de 1019 m en la dirección de buzamiento. Finalmente, teniendo en cuenta el pitch de las estrías (70°SO), se puede estimar un desplazamiento horizontal de aproximadamente 370 m en la dirección paralela al rumbo. La segunda falla tiene un desplazamiento relativamente menor y se resuelve dentro del mismo Grupo Neuquén (Fig. 7c, falla 2). Se midieron dos superficies de falla, sin indicadores cinemáticos, cuyas orientaciones son N20°E/75°SE y N32°E/80°SE. En el bloque de piso de la falla se encuentran las Formaciones Huincul y Cerro Lisandro (su sección basal), buzantes 20°E, y en el bloque de techo se encuentra la Formación Portezuelo buzante 43° E. Un poco más al norte esta falla pone en contacto al Grupo Malargüe con la Formación Cerro Lisandro, generando la omisión de las Formaciones Portezuelo-Plotier (Fig. 2), lo cual permite inferir una disminución gradual del rechazo en esa dirección. Para analizar el ángulo de corte original de las fallas 1 y 2, los planos medidos en campo fueron rotados en la red estereográfica equiareal en función de la orientación de los estratos medidos en el bloque de piso (llevándolos a la horizontal). De tal forma es posible visualizar que ambas fallas presentan un ángulo de corte respecto

al bloque de piso de aproximadamente 60°-75°, buzantes en direcciones opuestas, en una configuración típica de fallas normales conjugadas (Fig. 7c, estereogramas insertos). Las únicas estrías medidas sobre la falla 1 evidencian un movimiento directo dominante, pero con una componente subordinada de desplazamiento de rumbo izquierdo. Esta cinemática de las fallas NE-SO, con magnitudes de rechazo como las calculadas para la falla 1, combinadas con el plegamiento con rumbo N-S que bascula ~20°-30° hacia el este todo el sector, generarían el desplazamiento horizontal aparente observado en el mapa e imágenes (Figs. 2 y 7c).

### Corrimientos menores asociados al plegamiento

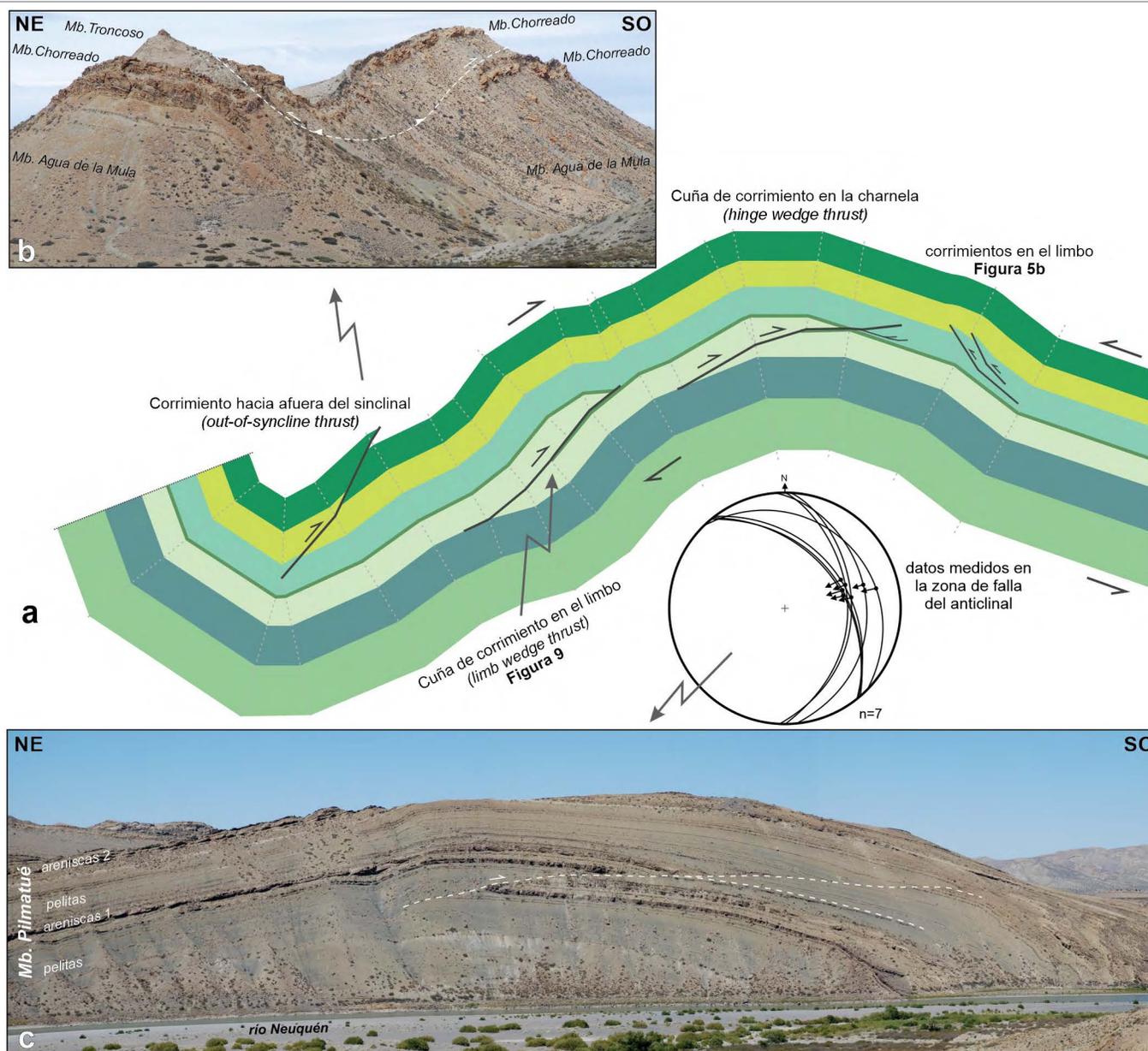
Además de las grandes estructuras mapeadas, que incluyen los pliegues y fallas de escala kilométrica descritos en los párrafos precedentes, afloran en la zona de estudio numerosos corrimientos menores de escala métrica. Si bien este tipo de estructuras menores ocurren en diferentes zonas del área relevada, alguna de las cuales ya han sido mencionadas, en esta sección se analizarán particularmente una serie de corrimientos que afectan localmente a bancos de las Formaciones Agrío y Huitrín en el sinclinal Ventanita y en distintos sectores del anticlinal Río Neuquén (Fig. 2). Durante el desarrollo de estos pliegues apretados, con longitud de onda relativamente corta (~2.5 km), se pueden formar fallas secundarias que acomodan la deformación (*fold-accommodation faults*, Mitra 2002), tanto en los flancos como en las zonas de charnela (Fig. 8a). Si bien Mitra (2002) describe varios tipos comunes de fallas de acomodación del plegamiento, analizaremos únicamente los casos bien expuestos y documentados en la zona de estudio.

En el núcleo del sinclinal Ventanita (Fig. 2), el contacto entre las Formaciones Agrío y Huitrín se encuentra desplazado por un retrocorrimiento que repite los bancos carbonáticos del Miembro Chorreado (Fig. 8b). Esta falla se desprende de los niveles pelíticos del Miembro Agua de la Mula, que actúan como despegue basal y, aunque no se observa completamente debido al nivel de exposición, podría conectarse a un despegue superior en las evaporitas de la Formación Huitrín. Como la fotografía (Fig. 8b) es aproximadamente paralela al rumbo del retrocorrimiento (Fig. 2), la estructura aparenta estar compuesta por dos fallas inversas con vergencias opuestas en flancos distintos del sinclinal. Sin embargo, la configuración observada se trata de las culminaciones laterales de los bancos cabalgados por una falla situada en el flanco occidental del pliegue (Fig. 2). Las características descritas permiten considerar que esta falla se originó como un corrimiento hacia afuera del sinclinal (*out-of-syncline thrust*).

Estas fallas secundarias se generan en respuesta a la falta de espacio al incrementarse la curvatura en el núcleo del sinclinal, propagándose hacia alguno de los flancos, y pueden transferir su desplazamiento a los planos de estratificación o bien perderlo por deformación penetrativa en las unidades incompetentes (Mitra 2002). Las distintas unidades plegadas sufren un cizallamiento diferencial que es compensado con la formación de un corrimiento, el cual incrementa su desplazamiento secuencia arriba (Fig. 8a). Este tipo de deformación ocurre en pliegues desarrollados mediante un mecanismo de deslizamiento flexural (*flexural slip*) favorecido, como en el

ejemplo observado (Fig. 8b), por el fuerte contraste de competencia de las calizas con las pelitas infrayacentes y las evaporitas suprayacentes.

Uno de los ejemplos más llamativos de falla de acomodación del plegamiento es sin dudas el retrocorrimiento que duplica los niveles competentes del Miembro Pilmatué en la zona de charnela del anticlinal Río Neuquén (Fig. 8c). El despegue basal de esta falla se ubica dentro de las secuencias de pelitas, finamente laminadas, expuestas en el núcleo del anticlinal. El retrocorrimiento corta con un ángulo de  $\sim 30^\circ$  a un primer nivel competente formado por areniscas y calizas.



**Figura 8.** a). Esquema (no a escala) de una secuencia multicapa plegada por deslizamiento flexural con diferentes tipos de fallas menores de acomodación del plegamiento (modificada de Mitra 2002); b) Vista oblicua del corrimiento hacia afuera del sinclinal en el limbo oeste del sinclinal Ventanita ( $37^\circ 33' 50''\text{S} - 70^\circ 04' 51''\text{O}$ ); c) Cuña de corrimiento en la charnela del anticlinal Río Neuquén repitiendo los intervalos más competentes dentro del Miembro Pilmatué ( $37^\circ 37' 46''\text{S} - 70^\circ 02' 46''\text{O}$ ). El estereograma muestra los planos con indicadores cinemáticos medidos en la zona de falla ( $37^\circ 38' 14''\text{S} - 70^\circ 01' 50''\text{O}$ ). ( $37^\circ 37' 28''\text{S} - 69^\circ 57' 42''\text{O}$ ).

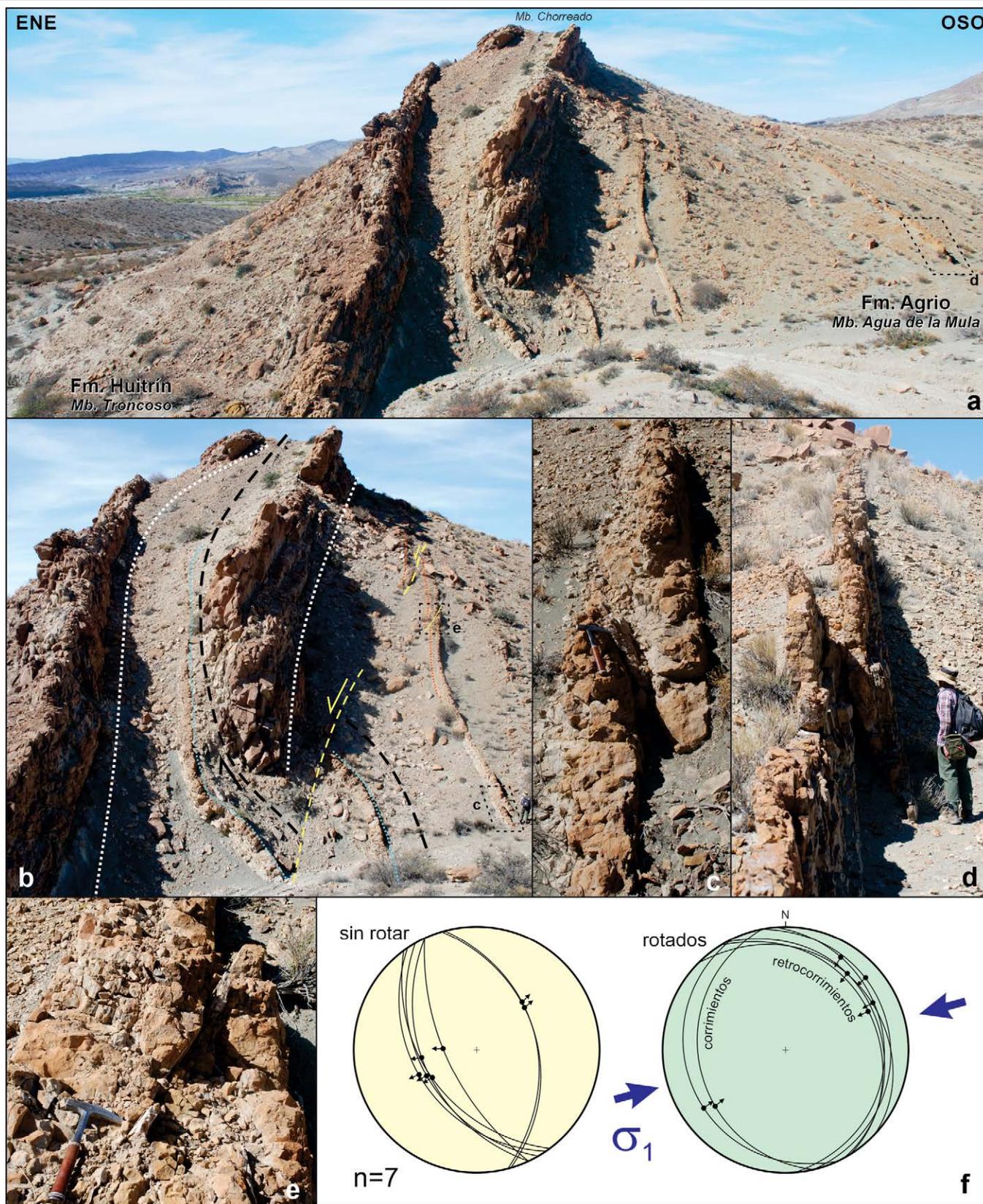
En distintas capas del bloque de piso cortadas por la falla se midieron superficies pulidas con estrías y escalones. Los planos relevados tienen rumbos N-S y N35°O, con buzamientos entre 20° y 45° hacia el este y noreste respectivamente, y los indicadores cinemáticos revelan un movimiento inverso dominante con desplazamiento del bloque de techo al oeste (Fig. 8c). Hacia los niveles superiores el ángulo de corte de la falla disminuye y el desplazamiento se resuelve mediante dos ramificaciones. Una de estas superficies de falla corta secuencia arriba atravesando un nivel pelítico y desplazando al segundo nivel competente, mientras que otra ramificación es paralela a la estratificación y la deformación transmitida genera los pequeños retrocorrimientos en el flanco occidental del anticlinal (Fig. 5d-f). La geometría del primer nivel competente repetido, formando un pliegue por flexión de falla en el núcleo del anticlinal, corresponde a una estructura de acomodamiento denominada por Mitra (2002) como cuña de corrimiento en la charnela (*hinge wedge thrust*) (Fig. 8a). Durante el plegamiento mediante deslizamiento flexural, con cizallamiento dirigido de los flancos hacia la charnela, es común que se produzcan corrimientos que cortan las unidades competentes y se conecten de forma paralela a la estratificación dentro de las unidades menos competentes (Mitra 2002). El desarrollo de la cuña de corrimiento en la charnela del anticlinal Río Neuquén, se vio favorecido por la heterogeneidad litológica del Miembro Pilmatué alternando secuencias de competencia fuertemente contrastante.

Las cuñas de corrimiento también pueden ocurrir en los limbos del pliegue (*limb wedge thrust*, Fig. 8a), por deformación diferencial de capas adyacentes con distintas competencias (Mitra 2002). Las unidades más resistentes son atravesadas por corrimientos, los cuales pueden cortar secuencia arriba y perder gradualmente desplazamiento o pueden formar pliegues por flexión de falla, mientras que las unidades menos competentes pueden sufrir deformación interna o transferir la deformación a lo largo de los planos de estratificación. En los pliegues formados por deslizamiento flexural los corrimientos secundarios en los limbos generalmente tienen una vergencia que es concordante con el sentido de cizallamiento en cada flanco, donde las capas más externas de la secuencia plegada se mueven en dirección hacia la charnela (Mitra 2002). Los corrimientos menores que afectan al Miembro Agua de la Mula en el limbo occidental del anticlinal Río Neuquén tienen vergencia hacia el este, es decir en dirección hacia la charnela del pliegue (Fig. 5a-b). En el limbo oriental de este anticlinal, los bancos carbonáticos del Miembro Chorreado están duplicados formando una cuña de corrimiento con vergencia hacia el oeste (Fig. 9a). Algunos niveles más delgados infrayacentes que también forman parte de la cuña de corrimiento, se

encuentran a su vez desplazados por otro corrimiento menor, pero con vergencia opuesta (Fig. 9b). Numerosos bancos de calizas con espesores entre 30 y 50 cm, intercalados en sucesiones pelíticas, están afectados por pequeños corrimientos y retrocorrimientos que producen desplazamientos de aproximadamente 0.5 a 2 m (Fig. 9 c-e). Todas las superficies de falla medidas están rellenas con calcita, presentan muy buenos indicadores cinemáticos y cortan con bajo ángulo a los planos de estratificación. El flanco oriental del anticlinal Río Neuquén en este sitio es subvertical, con algunas capas incluso en posición invertida (Fig. 9). De acuerdo a nuestra interpretación, las fallas menores se habrían formado en las etapas iniciales del plegamiento y fueron posteriormente rotadas junto con los estratos. Esto permite explicar los buzamientos elevados y sentido de desplazamiento directo en los planos de falla medidos en afloramiento, pero que al corregirlos y rotarlos en función de la orientación del estrato se disponen con bajos buzamientos y sentido de desplazamiento inverso (Fig. 9f). Estas fallas tienen rumbo NNO, similar a la orientación del anticlinal Río Neuquén, y predominan los planos buzantes al este y bloque de techo cabalgado al oeste (retrocorrimientos).

## INTERPRETACION SÍSMICA DE LA ZONA FRONTAL

Para analizar la configuración en subsuelo de las estructuras que forman el frente de deformación de la faja plegada y corrida del Agrio se interpretaron dos líneas sísmicas que atraviesan el sector oriental del área relevada (Figs. 1b y 2). La única perforación industrial de hidrocarburos en el área es el pozo YPF.Nq.PDN.x-1, que se sitúa unos 10 km hacia el oeste de las líneas sísmicas, por lo tanto no hay información disponible que permita ajustar los horizontes ni convertir a profundidad los datos sísmicos. A pesar de esto, las líneas sísmicas 2D permiten una clara visualización de la estructura-estratigrafía y el conocimiento de la geología del sector favorecido por los excelentes afloramientos, contribuyeron a lograr una adecuada relación de escala (tiempo vs profundidad) que permita evaluar la geometría de las principales estructuras subyacentes (Figs. 10 y 11). Para establecer dicha relación se consideró fundamentalmente el espesor total del Grupo Mendoza, que en esta región alcanza aproximadamente 2500 m, obtenido de la sumatoria de espesores de las formaciones que lo componen cuya potencia se conoce por mediciones de campo y pozos exploratorios aledaños. Esta secuencia se observa con claridad en la línea sísmica formando un amplio sinclinal, con muy poca deformación interna, debajo del cerro Villegas (Fig. 11). La base del Grupo



**Figura 9.** a). Banco del Miembro Chorreado formando una cuña de corrimiento en el limbo (*limb wedge thrust* en Fig. 8a), en el flanco oriental del anticlinal Río Neuquén  $37^{\circ}38'38''\text{S} - 70^{\circ}00'59''\text{O}$ ; b-e) Fotografías de detalle de bancos subverticales repetidos por fallas menores; f) Estereogramas con los planos de falla e indicadores cinemáticos con su orientación medida en campo y con su orientación luego de rotarlos considerando el buzamiento del estrato que los contiene (explicación en el texto).

Mendoza se identifica por un fuerte contraste de reflectividad respecto al Grupo Lotena, mientras que el techo se reconoce también por un cambio en el aspecto de los reflectores y por la deformación interna que presenta la Formación Huitrín al constituir un nivel de despegue regional. En base a estos parámetros, las líneas sísmicas se modificaron verticalmente de tal modo que el intervalo asignado al Grupo Mendoza alcance un tamaño equivalente a 2500 m según la escala horizontal (que es un dato conocido porque las líneas están georeferenciadas).

### Línea sísmica A (SJ-HV89-260)

Esta línea sísmica tiene una orientación ONO-ESE y se extiende por aproximadamente 7 km desde el flanco trasero del anticlinal Veta Neuquén hasta el faldeo occidental del cerro Villegas (Fig. 2). Los reflectores más superficiales tienen una inclinación de ~20° E, en concordancia con los datos de campo, y corresponden a las Formaciones Candeleros, Huincul y Cerro Lisandro aflorantes en ese sector (Fig. 10). La continuidad de estos reflectores se encuentra interrumpida por una zona de falla, cuya localización coincide con la Falla 1 relevada en superficie desplazando al Grupo Malargüe (Fig. 7c). En la línea sísmica se observa que la zona de falla inclina hacia el oeste y que presenta una geometría lítrica, cortando con alto ángulo los reflectores superficiales y gradualmente con menor ángulo a los reflectores más profundos (Fig. 10). En su tramo basal la falla tiende a paralelizarse a los reflectores uniéndose a una zona de despegue que interpretamos

correspondería a las evaporitas de la Formación Huitrín. Sin embargo, también es posible que este despegue o una superficie secundaria de despegue se emplacen en niveles incompetentes dentro de la Formación Rayoso, cuya distinción exacta en este sector deformado de la línea sísmica es poco clara. Las distintas formaciones del Grupo Neuquén en el bloque de techo de esta zona de falla se encuentran desplazados hacia abajo respecto a su posición en el bloque de piso, donde todas las secuencias de espesor regional conocido se ubican en una zona de menor deformación justo debajo del sinclinal cerro Villegas (Fig. 10). Las características estructurales descritas en subsuelo, en concordancia con los datos medidos en afloramiento, indican que se trata de un sistema de fallas normales unidas a un despegue somero en niveles incompetentes dentro del Grupo Bajada del Agrio. La inclinación actual de toda esta estructura hacia el este, incluyendo los reflectores del bloque de piso, indica que fue rota da posteriormente durante el desarrollo de las estructuras compresivas infrayacentes (Fig. 10). Una de estas estructuras interpretadas es un anticlinal que involucra las secuencias del Grupo Mendoza, limitado en ambos flancos por zonas de falla que producen intensa deformación. El truncamiento de algunos reflectores en la parte basal es interpretado como una rampa de piso y por lo tanto el pliegue tendría una vergencia dominante al este. La falla con vergencia occidental en el bloque de techo es un retrocorrimiento secundario, el cual origina una configuración estructural de tipo *pop-up*. En los niveles más superficiales (~1 s TWT) se aprecia una fuer-

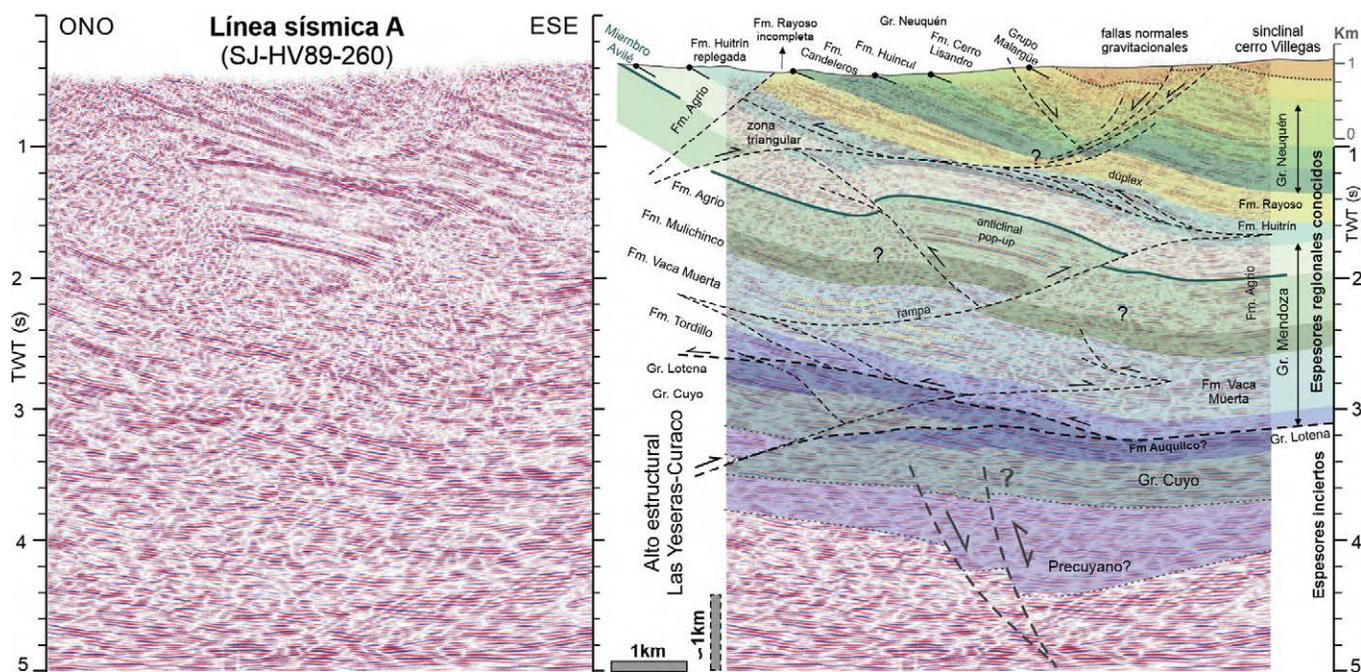


Figura 10. Línea sísmica A (SJ-HV89-260), en tiempo TWT, sin interpretar e interpretada, en el frente de deformación (localización en Figura 2).

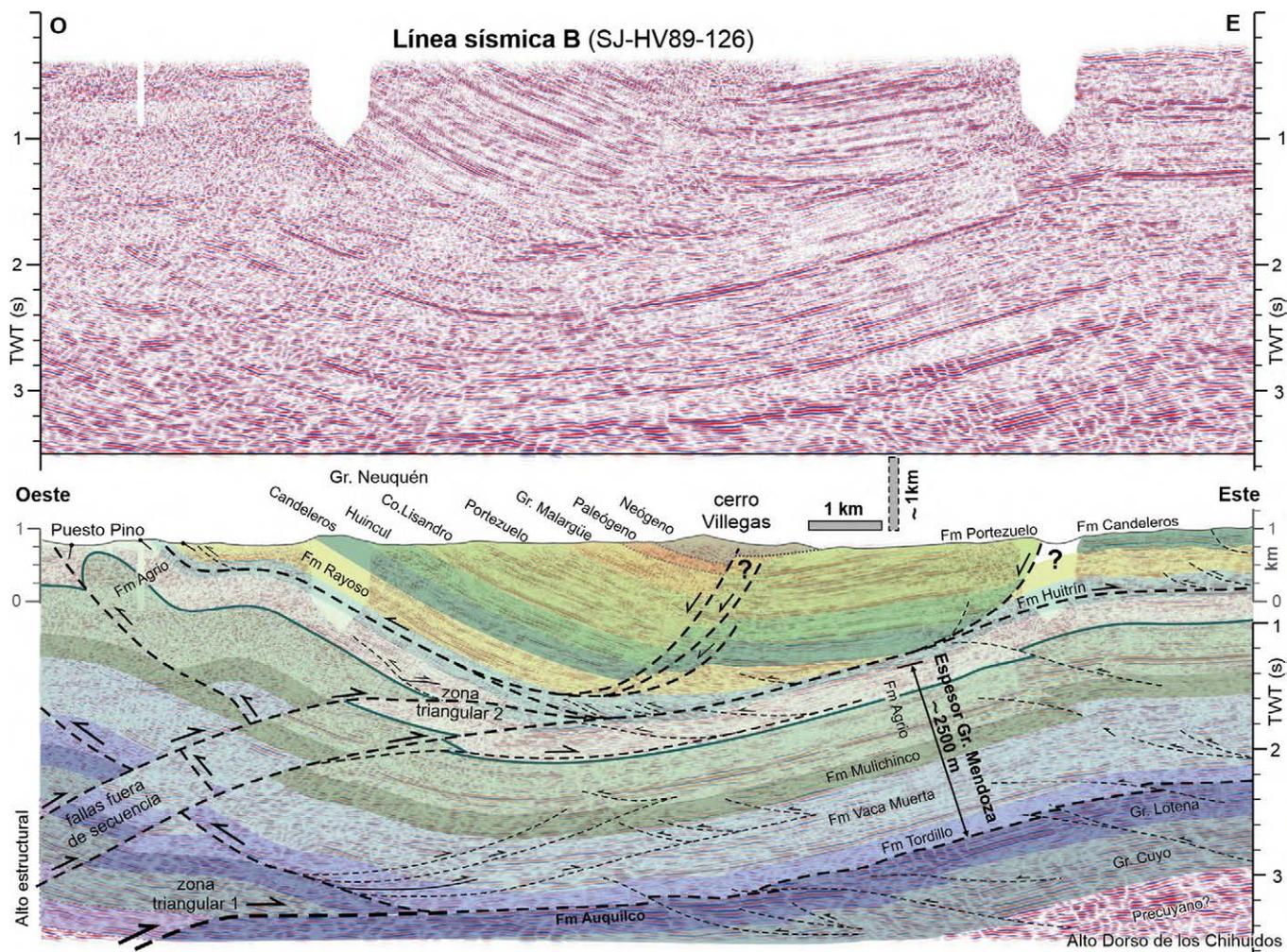


Figura 11. Línea sísmica B (SJ-HV89-126), en tiempo TWT, sin interpretar e interpretada, en el frente de deformación (localización en Figs. 1b y 2).

te angularidad entre los reflectores que inclinan al este y los reflectores subhorizontales infrayacentes, formando una zona triangular que se emplaza a lo largo de la Formación Huitrín (Fig. 10). La deformación transmitida hacia el este a lo largo del despegue permite generar algunas repeticiones internas en la Formación Huitrín, las cuales originan una suave anti-forma interpretada como un pequeño sistema dúplex. En la zona más profunda (~4 s TWT) la calidad del dato sísmico es muy deficiente. Se reconoce un paquete de reflectores, con relativa continuidad lateral y paralelismo, que podría corresponder al Grupo Cuyo. Estas secuencias se ubican debajo de los niveles con alta reflectividad asignados al Grupo Lotena, y ambas unidades muestran un marcado ascenso hacia el oeste revelando el desarrollo de un alto estructural. Algunas discontinuidades de los reflectores en este sector elevado se interpretan como ramificaciones de un corrimiento que involucra al basamento. Debajo del Grupo Cuyo, los reflectores son más difusos y discontinuos, con algunas variaciones angulares internas. Teniendo en cuenta que en los sectores menos

deformados de la Cuenca Neuquina se reconocen depósitos de sinrift, asociados a fallas normales, es posible inferir (con alto grado de incertidumbre) la existencia de alguna de estas secuencias y estructuras precuyanas en la región profunda de la línea sísmica.

### Línea sísmica B (SJ-HV89-126)

Esta línea sísmica tiene una orientación aproximada O-E y una gran longitud, pero para los objetivos de este trabajo se utilizó únicamente su porción occidental (~16 km), la cual abarca parte del área relevada en superficie, incluyendo la falla normal ubicada más al este (Fig. 1b). El rasgo más sobresaliente es un amplio sinclinal de primer orden que forman los Grupos Lotena y Mendoza, suavemente plegados entre el alto estructural observado en el extremo occidental de la línea sísmica y el basamento elevado en el borde oriental vinculado al Dorso de los Chihuidos (Fig. 11). Reflectores levemente desplazados dentro de estas secuencias permiten interpretar algunos corrimientos y retrocorrimientos de piel

fina, pero no se reconoce ningún pliegue importante asociado. En los niveles más profundos del sector occidental (~3.3 s TWT), se observan reflectores buzantes al este dispuestos sobre reflectores subhorizontales del Grupo Lotena. Esta configuración es interpretada como una pequeña cuña de basamento, formada por un corrimiento que se horizontaliza en las evaporitas de la Formación Auquenco, cuyo desplazamiento es compensado por corrimientos bidireccionales en las unidades suprayacentes a modo de una incipiente zona triangular (Fig. 11). Algunos reflectores más marcados dentro del Grupo Mendoza, en el flanco oeste del sinclinal, se interrumpen abruptamente y son desplazados en dos sectores de intensa deformación considerados zonas de falla. Estas fallas inclinan hacia el oeste y cortan a los reflectores buzantes al este, por lo cual es posible interpretarlas como fallas fuera de secuencia, al menos posteriores al plegamiento generado por la zona triangular infrayacente. Ninguna de las dos fallas atraviesa a los reflectores suprayacentes (Formaciones Rayoso y Candeleros), ya que se unen a un nivel de despegue somero dentro de la Formación Huitrín. En la línea sísmica se observa con claridad una segunda zona triangular que involucra una parte de las Formaciones Agrio y Huitrín, donde los reflectores buzantes al este en el bloque de techo son cabalgados y desplazados sobre reflectores subhorizontales en el bloque de piso (Fig. 11). El desplazamiento transmitido sobre el despegue puede ser en parte consumido mediante deformación interna y estructuras menores en las rocas incompetentes y en parte puede ser transferido sobre el despegue tanto hacia el oeste como hacia el este para generar estructuras fuera del área de estudio. En el extremo occidental de la línea sísmica, cerca de la superficie, hay una zona de ruido (sin información clara) probablemente relacionada al plegamiento apretado y los altos buzamientos medidos en el anticlinal Puesto Pino. Las sucesiones más superficiales afectadas por la zona triangular forman el flanco occidental del sinclinal del cerro Villegas. Adicionalmente, en el núcleo del sinclinal Villegas se observa una zona de intensa deformación que inclina hacia el oeste. En el bloque de techo de esta zona los reflectores del Grupo Neuquén y Malargüe inclinan al este, y muestran un desplazamiento hacia abajo respecto a su ubicación en el bloque de piso donde inclinan con bajo ángulo hacia el oeste (Fig. 11). Tales características permiten interpretar una zona de fallamiento directo que se une a un despegue basal en las secuencias altamente deformadas del Grupo Bajada del Agrio (Formación Huitrín y/o Formación Rayoso). Un poco más al este, se observa otro sector muy deformado que en superficie coincide con un espacio en blanco sin dato sísmico. Del lado oriental de este sector aflora la Formación Candeleros en posición subhorizontal, mientras que del lado occidental aflora

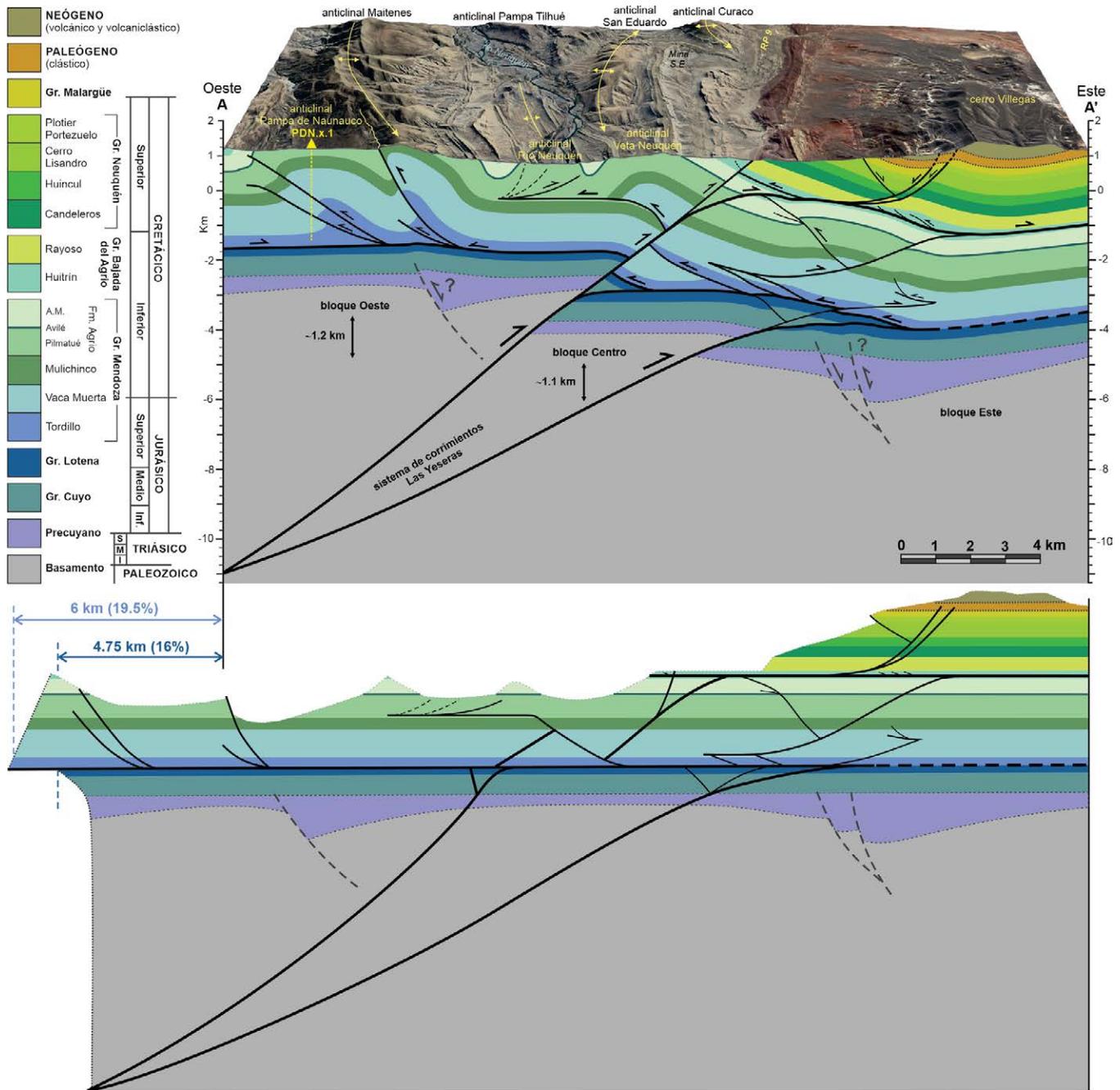
la Formación Portezuelo y la Formación Candeleros se halla descendida significativamente (Fig. 11). Esta deformación revela la existencia de otra importante zona de fallamiento directo que no afecta a las unidades situadas por debajo de la Formación Huitrín. Las dos zonas de fallamiento extensional observadas en la sísmica se corresponden con las fallas normales aflorantes con rumbo NO (Figs. 1b y 2), medidas y relevadas por Cristallini y Allmendinger (2000) al este del cerro Rayoso.

## SECCIONES BALANCEADAS

En base a las estructuras descritas y relevadas en superficie (Fig. 2) y las estructuras interpretadas en subsuelo en la zona frontal (Figs. 10 y 11), se construyeron dos secciones estructurales balanceadas de orientación E-O y aproximadamente ~25 km de longitud (Figs. 12 y 13). Las secciones fueron restituidas mediante el método de conservación de la longitud de líneas (e.g. Dahlstrom 1969, Woodward et al. 1989), el cual permite testear con relativa facilidad la viabilidad geométrica de las reconstrucciones, la coherencia en el desplazamiento de las principales fallas interpretadas y calcular los acortamientos tectónicos. Un aspecto fundamental para la correcta interpretación de las secciones es el conocimiento de los espesores de las unidades involucradas en la deformación. En esta región existen numerosos trabajos estratigráficos acerca de la mayoría de las formaciones de la Cuenca Neuquina, abundantes pozos exploratorios en la zona circundante, y adicionalmente se cuenta con datos de columnas estratigráficas relevadas de algunas unidades aflorantes (Turienzo et al. 2016). En el extremo oriental de ambas secciones todas las unidades se disponen con escasa deformación, por lo cual en dicho sector se ubicó la línea de fijación (*pin line*). Desde ese sector hacia el oeste las unidades fueron reconstruidas considerando su espesor constante, pues en general no evidencian variaciones significativas en la distancia analizada, excepto para la Formación Tordillo que aumenta gradualmente su potencia en esa dirección. Se debe aclarar que las secuencias de *sinrift* ilustradas son esquemáticas e inferidas conceptualmente con su geometría de cuña característica, pues en el área no hay datos que corroboren su presencia, características, ni sus variaciones de espesor, tal como se reconoce en otros sectores de la cuenca (e.g. Vergani et al. 1995, Cristallini et al. 2009, Carbone et al. 2011).

### Sección Norte (A-A')

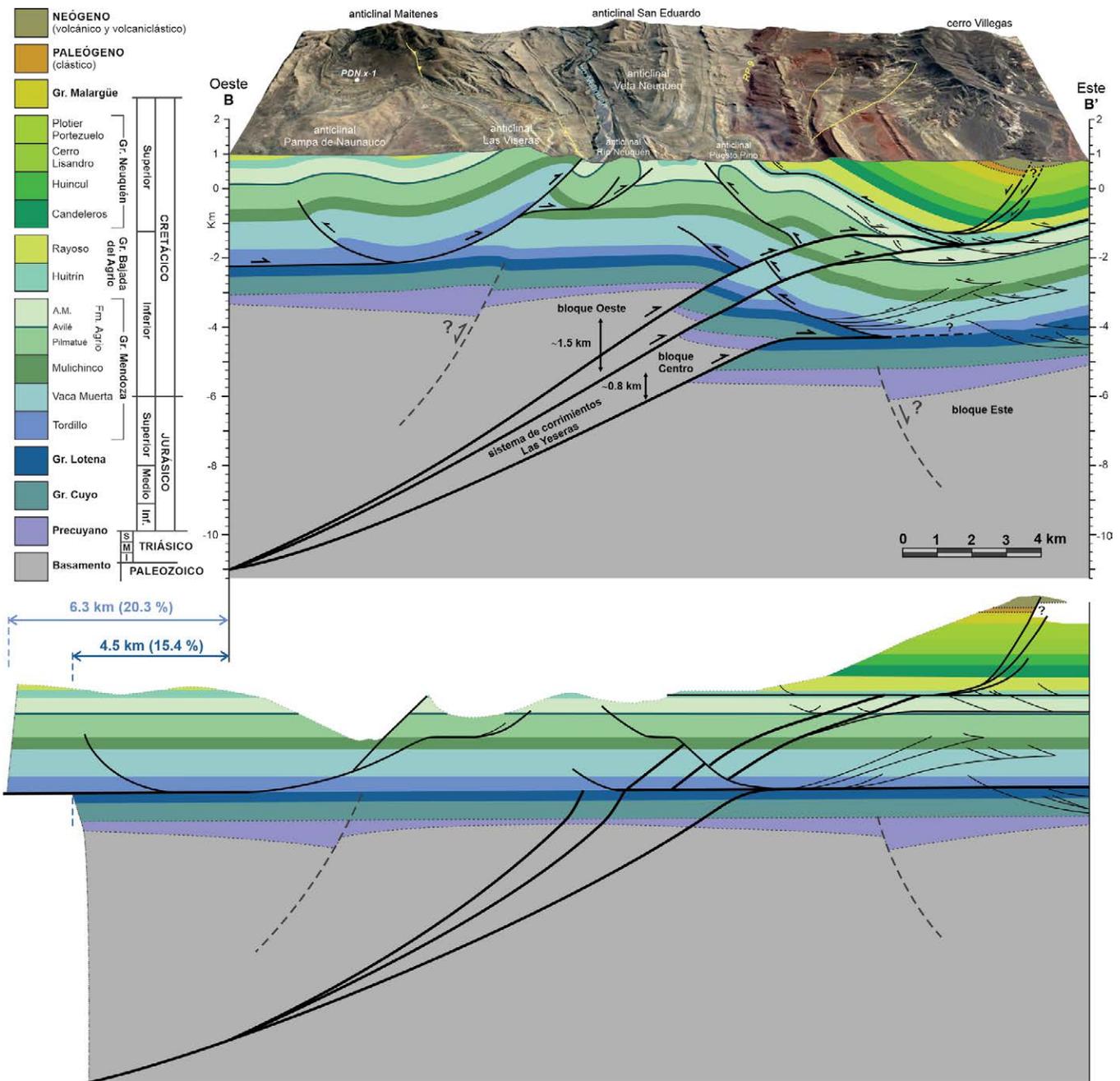
En el extremo occidental de esta sección se encuentran los anticlinales Pampa de Naunauco y Maitenes, con longi-



**Figura 12.** Sección estructural A-A' interpretada y balanceada, en la zona externa de la faja plegada y corrida del Agrio (localización en Figura 2). La configuración reconstruida incluye: estructuras de primer orden formadas en el basamento por el sistema de corrimientos Las Yeseras; pliegues de segundo orden despegados en la Formación Auquilco (tope de Grupo Lotena), con vergencia al oeste, destacándose el anticlinal Maitenes cortado por un retrocorrimiento en su limbo frontal; pliegues de tercer orden con despegue en el Miembro Pilmatué, y fallas normales lítricas con despegue basal en la Formación Huitrín y que afectan a las secuencias del Cretácico Tardío-Cenozoico.

tudes de onda de 4-5 km y vergencia al oeste (Fig. 12). El pozo YPF.Nq.PDN.x-1 (Pampa de Naunauco) permitió ajustar todas las formaciones del Grupo Mendoza involucradas en el plegamiento, con la Formación Mulichinco elevada casi hasta la superficie, la Formación Vaca Muerta buzante en el limbo frontal y parcialmente engrosada por fallamiento y culminando en la Formación Tordillo. Ambos anticlinales son interpretados como pliegues por propagación de falla, con un despegue ba-

sal en las evaporitas jurásicas del Grupo Lotena (Formación Auquilco), y son considerados estructuras de segundo orden. El anticlinal Maitenes adicionalmente es cortado en su limbo frontal por un retrocorrimiento, que lo cabalga parcialmente sobre el anticlinal Pampa de Naunauco. El anticlinal Río Neuquén, con una longitud de onda menor a los anteriores, es interpretado como un pliegue de tercer orden formado por corrimientos que despegan en la sección pelítica basal del



**Figura 13.** Sección estructural B-B' interpretada y balanceada, en la zona externa de la faja plegada y corrida del Agrio (localización en Figura 2). El estilo estructural es comparable al de la sección A-A' (Fig. 12), con variaciones locales entre las que se destaca el anticlinal Las Viseras, transportado hacia el este por un corrimiento en su limbo frontal.

Miembro Pilmatué (Fig. 12). Hacia el este, el anticlinal Veta Neuquén es otro pliegue de segundo orden, con despegue inferior en la Formación Auquillo y vergencia occidental. El limbo frontal de este anticlinal tiene un buzamiento moderado, originando un pliegue relativamente abierto que en este caso es reconstruido con forma de cuña como la parte delantera de un pliegue por flexión de falla. El despegue superior de esta estructura se ubica en la base del Miembro Pilmatué y por lo tanto su desplazamiento hacia el oeste permite formar el anticlinal Río Neuquén, infiriéndose que ambos pliegues

están genéticamente relacionados. Los afloramientos de los Grupos Mendoza y Bajada del Agrio en la parte oeste de la sección, incluso considerando su ubicación en los sitios menos deformados como los núcleos sinclinales, se encuentran considerablemente elevados respecto a su posición en subsuelo debajo del sinclinal cerro Villegas (Fig. 12). Comparando la diferencia de profundidad a la cual se encuentra la base del Grupo Mendoza en ambos sectores, se calculó un relieve estructural total de ~2.3 km atribuido al desarrollo de estructuras de piel gruesa (1° orden). Esta deformación

se interpretó mediante dos corrimientos que involucran al basamento (sistema de corrimientos Las Yeseras), los cuales originan un bloque occidental elevado 1.2 km respecto a un bloque central que a su vez está elevado 1.1 km respecto al bloque oriental. El corrimiento occidental inicialmente se une al despegue en las evaporitas al tope del Grupo Lotena, generando una pequeña cuña cuyo desplazamiento transmitido contribuye parcialmente a la formación del retrocorrimiento y anticlinal Veta Neuquén. Una ramificación del corrimiento corta posteriormente a la cuña y el pliegue suprayacente. Esta falla que corta secuencia arriba se une a un despegue somero en las evaporitas de la Formación Huitrín y origina la zona triangular que se observa en la línea sísmica (Fig. 10). Adicionalmente se interpreta una falla menor que se desprende hacia la superficie y pone en contacto a la Formación Huitrín con el techo de la Formación Rayoso (Fig. 12). Este fallamiento permite explicar el reducido ancho de afloramiento de la Formación Rayoso en la línea de la sección, comparado con su potente desarrollo inmediatamente al sur de la misma (Fig. 2). El corrimiento ubicado más al este, forma una escama de basamento (bloque centro), la cual se inserta en la superficie de despegue en las evaporitas jurásicas. En la sección interpretada, este despegue actuaría como un techo pasivo sobre la cuña infrayacente y en consecuencia la deformación transferida por la estructura de piel gruesa (1° orden) es acomodada mediante fallas y pliegues en el Grupo Mendoza (Fig. 12). El desarrollo de esta zona triangular, junto a la que forma la cuña del corrimiento occidental, produce el basculamiento hacia el este de todas las unidades y estructuras suprayacentes. En superficie esta deformación plegó a las secuencias del Cretácico Tardío-Cenozoico, así como también al sistema de fallas directas que las afectan, que forman el flanco occidental del sinclinal del cerro Villegas. La restitución de la sección A-A' interpretada indica un acortamiento máximo de 6 km (19.5 %), estimados a la base del Grupo Mendoza, que representa la deformación involucrada en el desarrollo de todas las estructuras de piel fina por encima de la Formación Auquilco. Por debajo de dicha unidad, se determinó un acortamiento máximo de 4.75 km (16%) para las estructuras de piel gruesa (Fig. 12). Esta diferencia implica que parte del acortamiento necesario para formar los pliegues de segundo orden proviene del sector interno de la faja plegada y corrida del Agrio, fuera de la sección.

### Sección Sur (B-B')

El anticlinal Pampa de Naunauco en el extremo occidental de la sección B-B' es interpretado de igual modo que en la sección de más al norte, pero con un desarrollo mucho menor debido a que el pliegue se hunde en dirección al sur (Fig. 13).

El anticlinal Las Viseras, de vergencia al este, es reconstruido en dos etapas. Inicialmente se forma un pliegue por flexión de falla de segundo orden, con un despegue basal en la Formación Auquilco y uno superior en el Miembro Pilmatué. El desplazamiento transmitido sobre el despegue superior dio origen al anticlinal Río Neuquén, de tercer orden, reconstruido como un pliegue por propagación de falla volcado hacia el este. En una segunda etapa se ramifica una nueva falla desde la zona de rampa (Fig. 13), transportando al anticlinal Las Viseras por encima del flanco occidental del anticlinal Río Neuquén tal como se observa en afloramiento (Fig. 4). El anticlinal Puesto Pino es otro pliegue con longitud de onda muy corta, reconstruido como una estructura de tercer orden con despegue basal en el Miembro Pilmatué, volcado hacia el oeste. Para generar esta estructura se infiere en subsuelo un pliegue por flexión de falla de segundo orden, que coincide en el rumbo con el anticlinal del cerro Rayoso y podría ser la culminación norte de dicho pliegue. Todos los pliegues en la sección B-B', involucrando a los Grupos Mendoza y Bajada del Agrio, están elevados también ~2.3 km respecto a la posición de dichas unidades en extremo oriental del perfil (Fig. 13). Esta deformación se interpreta mediante un sistema de corrimientos de piel gruesa (estructuras de 1° orden), que forma un bloque de basamento oeste y un bloque centro ascendidos aproximadamente 1.5 km y 0.8 km respectivamente. Al igual que en la sección norte, el corrimiento inferior se inserta en la Formación Auquilco y origina una suave cuña cuyo desplazamiento es acomodado mediante corrimientos y retrocorrimientos en el Grupo Mendoza suprayacente. Estas estructuras son posteriormente cortadas por dos corrimientos fuera de secuencia, inferidos en la línea sísmica por el desplazamiento de los reflectores buzantes al este, que se insertan en las evaporitas de la Formación Huitrín creando una zona triangular (Fig. 11). La deformación sobre esta zona triangular produce el basculamiento hacia el este de las unidades del Cretácico Tardío-Cenozoico ubicadas en el bloque de techo del sistema de fallas normales del cerro Villegas (Fig. 13). A diferencia de la sección A, el plegamiento no afectó a las unidades en el bloque de piso de las fallas directas, las cuales se encuentran buzando hacia el oeste y formando el limbo oriental del sinclinal frontal. La restitución de la sección B-B' interpretada indica un acortamiento máximo de 6.3 km (20.3 %) para las estructuras de piel fina por encima de la Formación Auquilco y de aproximadamente 4.5 km (15.4%) para las estructuras de piel gruesa infrayacentes (Fig. 13). Nuevamente, dicha diferencia implica que parte de la deformación que generó las estructuras de segundo orden en la sección fue originada en el sector interno de la faja plegada y corrida del Agrio.

## DISCUSIÓN

Las estructuras descritas e interpretadas en el área de estudio demuestran que el frente de deformación en este sector de la faja plegada y corrida del Agrio está compuesto por pliegues de distinta longitud de onda, rumbo y vergencia, corrimientos y retrocorrimientos en la cubierta sedimentaria y en el basamento, y fallas normales que afectan a las unidades más someras (Fig. 14). Para comprender esta compleja configuración estructural se pondrán a consideración algunas características observadas que, analizadas y comparadas en un contexto más regional, dan sustento a las interpretaciones presentadas en este trabajo.

## Desarrollo de los anticlinales Maitenes y Las Viseras

Estos dos anticlinales son los pliegues de piel fina de mayor longitud de onda, relieve estructural, extensión a lo largo del rumbo y desplazamiento, aflorantes en la zona de estudio. Ambas estructuras son interpretadas inicialmente formando un pliegue relacionado a falla convencional, por propagación de falla el anticlinal Maitenes y por flexión de falla el anticlinal Las Viseras. Los dos anticlinales fueron posteriormente cortados y desplazados por una falla en su flanco delantero, por lo cual puede considerárselos como pliegues transportados (Suppe y Medwedeff 1990, Mitra 1990). Este estilo de pliegues transportados es relativamente frecuente y ocurre en

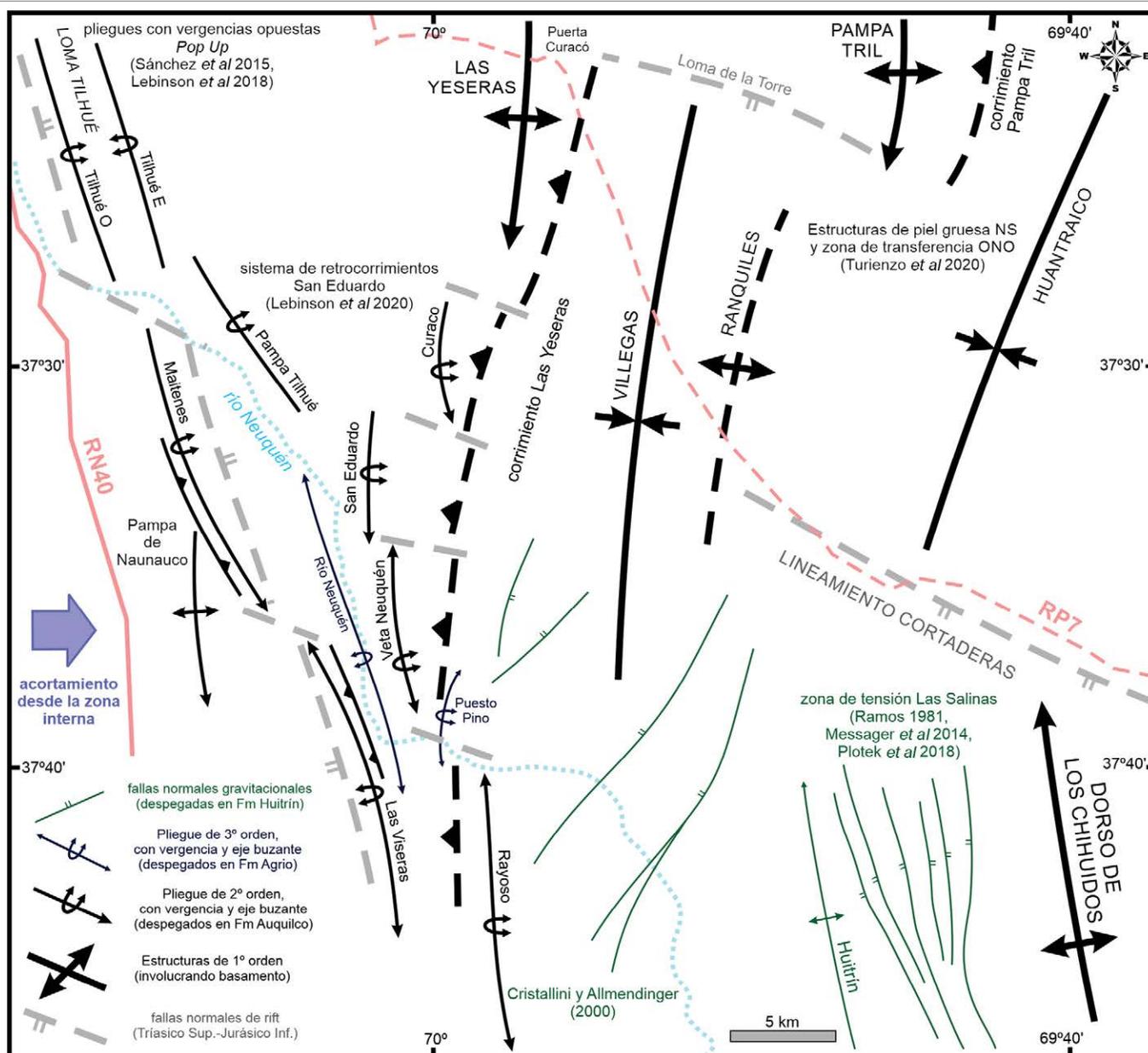


Figura 14. Esquema con las principales estructuras en la zona externa de la faja plegada y corrida del Agrio estudiadas en este trabajo (sector atravesado por el río Neuquén) y su ubicación relativa respecto a las estructuras aledañas estudiadas por distintos autores (ver Discusión en el texto).

otros sectores de la faja plegada y corrida neuquina, por ejemplo el anticlinal Las Máquinas (Sánchez et al. 2015), el anticlinal cerro Pitrén (Lebinson et al. 2015), el anticlinal Pichi Mula (Zamora Valcarce y Zapata 2015), el anticlinal Chos Malal (Frías Sabas et al. 2021), entre otros. Los anticlinales Maitenes y Las Viseras son pliegues de segundo orden, con un despegue basal en la Formación Auquilco e involucrando a los Grupos Mendoza y Bajada del Agrio, y el desplazamiento para su formación podría provenir del sector interno de la faja plegada. Esto es consistente con la diferencia de acortamiento entre las secuencias infra y suprayacentes a dicho despegue determinada en las secciones balanceadas A-A' y B-B' (Figs. 12 y 13). A partir de modelos análogos desarrollados en laboratorio, Lebinson et al. (2020) demostraron que los pliegues de segundo orden relacionados al sistema de retrocorrimientos San Eduardo, el cual incluye todos los anticlinales de vergencia occidental en el sector norte del área de estudio (Fig. 14), estarían genéticamente vinculados a estructuras de primer orden (involucrando al basamento) en la zona interna. Estas estructuras de piel gruesa forman un importante alto estructural al oeste del cerro Naunauco, entre la Loma del Manzano y Tres Chorros (Fig. 1b). En algunas secciones estructurales este alto se interpreta mediante una gran cuña formada por la inversión de fallas normales heredadas de la etapa de *rift* (Zamora Valcarce et al. 2011, Rojas Vera et al. 2015), mientras que en otras reconstrucciones se consideran dos cuñas superpuestas formadas por corrimientos (Lebinson et al. 2018, Aramendia et al. 2019). Independientemente del mecanismo, en todas estas reconstrucciones se interpreta que las estructuras de piel gruesa transfieren deformación a la cubierta sedimentaria generando así estructuras de piel fina hacia el antepaís. La deformación en la zona interna de la faja plegada y corrida del Agrio tuvo lugar principalmente durante dos etapas fuertemente compresivas, la primera entre el Cretácico Tardío y el Eoceno, y la segunda durante el Mioceno medio-tardío (Cobbold y Rosse-Ilo 2003, Ramos y Folguera 2005, Zapata y Folguera 2005, Zamora Valcarce et al. 2006, 2009, 2011, Rojas Vera et al. 2015). Si bien ambos eventos contribuyeron al desarrollo de las estructuras de piel gruesa occidentales y las posibles estructuras de piel fina vinculadas, las reconstrucciones cinemáticas sugieren que la máxima expansión hacia el este ocurriría en la última etapa de deformación debido a la formación de una segunda cuña o escama de basamento infrayacente en la zona interna (Lebinson et al. 2018, Aramendia et al. 2019). Este desplazamiento transferido hacia la zona externa habría contribuido al desarrollo de los anticlinales de piel fina en el sector oeste de las secciones interpretadas (Figs. 12 y 13). Una de las características más llamativas de los anticlinales Maitenes y Las Viseras

es que se encuentran alineados, con un marcado rumbo NNO, y con vergencias opuestas (Fig. 2). El rumbo de estos pliegues se aparta de la orientación dominante N-S que caracteriza a la mayoría de las estructuras andinas que forman la faja plegada y corrida neuquina (e.g. Ramos 1981, Zamora Valcarce et al. 2009, Rojas Vera et al. 2015, Sánchez et al. 2015, Lebinson et al. 2018, Turienzo et al. 2018). En la zona central del mapa, donde ambos pliegues se encuentran, se observa una quebrada con orientación ONO similar a otros lineamientos de la región como el lineamiento Cortaderas (Fig. 14). El lineamiento Cortaderas (e.g. Ramos 1981, Cobbold y Rossello 2003) se ubica entre el extremo norte del Dorso de los Chihuidos y la culminación sur del sinclinal de Huantraico (Fig. 1b), y en base a información de subsuelo fue recientemente interpretado como una falla extensional previa reactivada parcialmente y actuando como una zona de transferencia durante la deformación compresiva en el frente de la faja plegada (Turienzo et al. 2020). Por otro lado, la disposición NNO de los anticlinales y ONO del lineamiento que los separa, coincide con las orientaciones reconocidas en subsuelo y superficie para las fallas normales que formaron los diferentes depocentros durante la apertura de la Cuenca Neuquina (e.g. Cristallini et al. 2009, Giambiagi et al. 2009, Pángaro et al. 2011, Bechis et al. 2014). Esto sugiere la posible presencia de estructuras extensionales preexistentes en el basamento que hayan influenciado el posterior desarrollo de los anticlinales Maitenes y Las Viseras en la cubierta sedimentaria (Fig. 14). Existen múltiples mecanismos y grados de interacción entre las estructuras extensionales y compresivas (Coward et al. 1991). El modo más sencillo que podría considerarse es que directamente los pliegues observados sean producto de la inversión de la falla normal en el basamento, propagada hacia la superficie. Este tipo de estructuras se reconoce en la región de la Dorsal de Huinca, donde forman amplios pliegues fuertemente asimétricos y con longitudes de onda que rondan los 8-10 km (e.g. Vergani et al. 1995, Fantín et al. 2011, Grimaldi y Dorobek 2011). Algunas estructuras de piel gruesa de la zona interna de la faja plegada del Agrio, como el anticlinal del cerro Mocho, con un ancho de ~15 km y orientación NNO, han sido interpretadas como formadas por la inversión, al menos parcialmente, de fallas normales previas (Zapata y Folguera 2005, Zamora Valcarce et al. 2009, Rojas Vera et al. 2015). Sin embargo, los anticlinales Maitenes y Las Viseras son apretados, con longitudes de onda de ~4-5 km (Fig. 2), cabalgados y transportados sobre unidades sedimentarias someras (corrimiento Las Viseras, Fig. 4), características más compatibles con el estilo de las estructuras de piel fina andinas. Otro modo de interacción entre corrimientos en la cubierta sedimentaria y fallas normales en el

basamento, ha sido documentado en distintos orógenos del mundo donde la presencia de estructuras extensionales previas produce importantes perturbaciones mecánicas en las superficies de despegue que controlan la localización y orientación de las rampas (e.g. Coward et al. 1991, Scisciani 2009, Torres Carbonell et al. 2017). En la zona estudiada no existe información de subsuelo para corroborar la geometría infrayacente, pero este último mecanismo descrito se ajusta a las condiciones geológicas de esta región y permite explicar las estructuras observadas en superficie. En la interpretación de la sección norte se infiere una falla normal buzante al este, muy levemente invertida pero lo suficiente para alterar el despegue en la Formación Auquillo, desde donde nacen los retrocorrimientos que forman el anticlinal Maitenes (Fig. 12). En la sección sur se interpreta una falla normal buzante al oeste, también muy poco invertida, sobre la cual se nuclea el corrimiento que origina el anticlinal Las Viseras (Fig. 13). Estas fallas normales NNO, buzantes en sentidos opuestos, podrían haber formado dos hemigrábenes de polaridad contraria. Por otro lado, el lineamiento ONO que los separa, podría también corresponder a una falla normal preexistente pero cuya extensión y dirección de inclinación se desconoce. Durante la deformación compresiva, esta estructura ONO actuaría como una zona de transferencia entre los anticlinales de vergencia opuesta. La interpretación presentada sugiere que en este sector la arquitectura en el basamento determina la ubicación, rumbo y vergencia de los corrimientos y anticlinales de segundo orden en las secuencias sedimentarias suprayacentes (Fig. 14). Un mecanismo de deformación comparable podría tener lugar un poco más al norte, en la Loma Tilhué, controlando el desarrollo de los anticlinales que poseen un marcado rumbo NNO (Sánchez et al. 2015, Lebinson et al. 2018).

### Desarrollo del sistema de corrimientos en el basamento

La participación del basamento en la deformación en la zona externa de la faja plegada y corrida neuquina tiene su máxima expresión al este del volcán Tromen (Fig. 1b), conformando amplios pliegues de primer orden como los anticlinales Las Yeseras y Pampa Tril (e.g. Viñes 1989, Kozłowski et al. 1996, Nocioni 1996, Allmendinger et al. 2004, Zamora Valcarce y Zapata 2005, Rojas Vera et al. 2015, Sagripanti et al. 2015, Sánchez et al. 2018, Turienzo et al. 2018). Estas estructuras de piel gruesa tienen un rumbo N-S, asociadas al desarrollo de los sistemas de corrimientos Las Yeseras y Pampa Tril, y presentan un marcado hundimiento hacia el sur parcialmente afectado por fallas previas de rumbo ONO que actúan como zonas de transferencia (Turienzo et al. 2020).

Las fallas que involucran al basamento en las secciones interpretadas (Figs. 12 y 13) marcan un quiebre estructural en el frente de deformación de la faja plegada del Agrio, denominado por Ramos (1981) dislocación de Curaco (Fig. 1b), y constituyen la continuación austral del sistema de corrimientos Las Yeseras (Fig. 14). Comparando la posición de algunos niveles de referencia a ambos lados de las fallas es posible cuantificar el relieve estructural (desplazamiento vertical), que brinda una idea de la magnitud de la deformación de piel gruesa. Este parámetro es especialmente importante pues, a diferencia del acortamiento o desplazamiento horizontal, es independiente de la complejidad y ángulo de buzamiento de la o las fallas interpretadas. El máximo relieve estructural del basamento asociado a este sistema de corrimientos se encuentra en las secciones aquí interpretadas (~2.3 km, Figs. 12 y 13) y disminuye gradualmente hacia el norte hasta un desplazamiento vertical de ~1 km en la zona de Las Yeseras del Tromen, donde forma un notable monoclinial que se reconoce tanto en superficie como en líneas sísmicas (Turienzo et al. 2018, 2020). Hacia el sur del río Neuquén no hay estudios estructurales que hayan cuantificado este parámetro, pero la observación preliminar de una línea sísmica a la latitud del cerro Rayoso muestra una participación del basamento sustancialmente menor. La deformación de piel gruesa en el frente de deformación de la faja plegada y corrida del Agrio recobra importancia hacia el sur, fuera del área de estudio. A los 38°S (~30 km), se reconoce un levantamiento de ~1.5 km (Zamora Valcarce y Zapata 2015), mientras que a los 38°20'S (~68km) se estimó un levantamiento de ~1.7 km (Irastorza et al. 2019).

El emplazamiento del sistema de corrimientos Las Yeseras, incluyendo sus ramificaciones y zonas triangulares, pliega a los Grupos Neuquén y Malargüe e incluso a los depósitos del Oligoceno (Figs. 12 y 13). En base a las relaciones estratigráficas entre distintas unidades cenozoicas en la región del cerro Villegas, se han reconocido superficies de erosión y evidencias de deformación que afectan inclusive a los depósitos del Mioceno tardío (Garrido et al. 2012). Los depósitos sinorogénicos discordantes entre sí, ubicados en la parte más externa de la faja plegada del Agrio, marcan la existencia de al menos dos pulsos de deformación para el Mioceno, los cuales se correlacionan con los eventos de levantamiento/enfriamiento a los 11 Ma y a los 6 Ma observados en trazas de fisión de apatitos sobre el Dorso de los Chihuidos (Zamora Valcarce et al. 2009). En muestras tomadas sobre el anticlinal Las Yeseras en la zona de Puerta Curacó, al norte del área de estudio (Fig. 1b), se obtuvieron edades de enfriamiento mediante trazas de fisión de apatitos de ~9-7 Ma asociadas al desarrollo estructural de la zona externa de la faja plegada y corrida de Chos Malal durante el Mioceno tardío (Sánchez et al. 2018).

## Desarrollo del sistema de fallas normales del cerro Villegas

Este sistema estructural al sur del cerro Villegas está principalmente formado por tres fallas normales, con rumbo NE-SO, y planos buzantes al noroeste (Fig. 14). Si bien algunas de estas fallas pudieron relevarse en campo (Fig. 7 c-d), su mejor expresión se observa en las dos líneas sísmicas interpretadas donde desplazan significativamente a la Formación Rayoso, a los Grupos Neuquén y Malargüe, y a los depósitos del Oligoceno (Figs. 10 y 11). Lamentablemente en la información de subsuelo no es posible observar con claridad si estas fallas normales afectan también a las secuencias volcánicas neógenas del cerro Villegas, cuya edad  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  es  $\sim 15$  Ma (Kay y Copeland 2006), para lo cual serían necesarios futuros relevamientos estructurales de detalle en el sector. La edad de este fallamiento extensional es posterior al Oligoceno y podría ser posterior o previo al Mioceno medio, dependiendo si estas secuencias volcánicas están o no falladas. En las líneas sísmicas se observa que estas fallas no afectan a la Formación Agrío, y que se unen a un nivel de despegue en las evaporitas de la Formación Huitrín. Un sistema de fallas normales con rumbo NNO y afectando a las Formaciones Rayoso y Candeleros conforma la zona de tensión Las Salinas (Ramos 1981), situada unos 7 km al sudeste, en el flanco occidental del Dorso de los Chihuidos (Fig. 14). En base a estudios geomorfológicos y estructurales, Messenger et al. (2014) propusieron que estas fallas directas se formaron por deslizamiento pendiente abajo sobre un despegue en evaporitas de forma contemporánea al levantamiento plio-cuaternario del anticlinal de los Chihuidos. Para analizar el comportamiento y la configuración tridimensional de estas fallas, Plotek et al. (2018) realizaron una serie de modelos análogos. A partir de estos modelos concluyen que aquellas fallas que presentan continuidad en planta resultan de la conexión entre fallas menores a medida que avanza la extensión. En base a su comparación con las estructuras aflorantes, Plotek et al. (2018) proponen que el fallamiento normal en la zona de tensión Las Salinas responde a un modelo de estructuras en dominó con despegue basal en la Formación Huitrín, desatado a partir de la movilidad de evaporitas favorecida por la pendiente regional dada por el flanco oeste del Dorso de los Chihuidos.

Las fallas normales estudiadas, en la zona del cerro Villegas, presentan una geometría lítrica en profundidad uniéndose a un nivel de despegue en las evaporitas dentro del Grupo Bajada del Agrío. Esta unidad y la/las posibles superficies de despegue internas se encuentran buzantes hacia el este producto del plegamiento causado por las zonas triangulares infrayacentes (Figs. 10 y 11). Esto indica que el sistema ex-

tensional del cerro Villegas se formó con anterioridad al desarrollo de las estructuras compresivas subyacentes, creadas probablemente en el Mioceno medio-tardío como se discutió previamente, siguiendo una paleopendiente hacia el noroeste. En su análisis de la zona de tensión Las Salinas Messenger et al. (2014) indican que en general el desplazamiento de láminas rocosas por efecto de la gravedad no requiere grandes pendientes, pudiendo ser suficientes valores de  $2^\circ$  o  $3^\circ$ , menos aun cuando la eficiencia de la superficie de despegue se ve incrementada por efecto de la presión de fluidos. Esto permite suponer que para la creación de fallas normales afectando a las unidades que sobreyacen a las evaporitas de la Formación Huitrín podría ser suficiente la pendiente regional de la Cuenca Neuquina. Sin embargo, este factor por sí sólo no permite explicar la localización de las fallas en esta región particular, ni su orientación sistemática NO-SE. Un factor adicional para incrementar la pendiente en las cuencas de antepaís es la carga ejercida por las estructuras tectónicas formadas en el frente orogénico. En este caso las fallas normales del cerro Villegas serían anteriores a la deformación de piel gruesa y las zonas triangulares en el frente de la faja plegada del Agrío, pero la deformación en la zona interna y el desarrollo hacia el este de algunas estructuras de piel fina como los pliegues asociados al sistema de retrocorrimientos San Eduardo (Lebinson et al. 2020), podrían haber contribuido al hundimiento del sector noroccidental (Fig. 14). Por otro lado, este sistema extensional se localiza en la culminación norte del anticlinal Huitrín (Fig. 1b), un pliegue de rumbo NNO en cuyo núcleo fluyeron y se alojaron grandes volúmenes de evaporitas. Si bien en superficie este anticlinal tiene una amplia exposición, en subsuelo se reconoce que tiene una superficie de despegue en la Formación Huitrín y afecta sólo a las unidades suprayacentes. De este modo, aunque el plegamiento podría haber influido localmente en el desarrollo de alguna falla directa en su extremo septentrional, difícilmente pueda explicar el resto de las fallas más alejadas que se encuentran varios kilómetros hacia el noroeste. Al evaluar un contexto más regional se aprecia que el sistema de fallas normales del cerro Villegas se ubica en el extremo noroccidental del gran anticlinal de primer orden que conforma el Dorso de los Chihuidos (Fig. 14). En la línea sísmica B se observa con claridad que las dos fallas directas allí interpretadas se ubican sobre un segmento donde los reflectores más profundos inclinan al oeste, formando el flanco occidental del anticlinal (Fig. 11). Las características mencionadas sugieren que las fallas directas del cerro Villegas podrían estar espacial y temporalmente ligadas al levantamiento del Dorso de los Chihuidos entre el Mioceno medio y tardío ( $\sim 11$  Ma, Zamora Valcarce et al. 2009), y que habrían sido plegadas por las estructuras de piel gruesa

asociadas al sistema de corrimientos Las Yeseras durante el Mioceno tardío (~9-7 Ma, Sánchez et al., 2018). Más allá de las hipótesis aquí planteadas y discutidas, la configuración estructural de toda la zona de estudio es evidentemente compleja y se requieren más estudios geológicos y geocronológicos para comprender mejor la evolución tectónica del frente de deformación del sector norte de la faja plegada y corrida del Agrio.

### Consideraciones sobre el sistema petrolero del área

En este sector de la Cuenca Neuquina se encuentra prácticamente toda la columna sedimentaria mesozoica, por lo cual existen variadas litologías que constituyen rocas madre, reservorio y sello. En los yacimientos Filo Morado y El Portón, unos 35 km hacia el noreste (Fig. 1b), la efectividad del sistema petrolero ha sido altamente probada luego de décadas de extracción de hidrocarburos en reservorios convencionales naturalmente fracturados involucrados en pliegues de segundo orden (e.g. Zapata et al. 2001, Fantín et al. 2015). Estos anticlinales de piel fina prácticamente no se observan en las sísmicas debido a los altos buzamientos e intensa deformación (Zamora Valcarce et al. 2006b) y también porque se disponen debajo de una zona triangular que acomoda gran parte de la deformación de piel gruesa asociada al sistema de corrimientos Pampa Tril (Turienzo et al. 2020). En la zona de estudio se interpreta un estilo estructural comparable, con estructuras de piel gruesa asociadas al sistema de corrimientos Las Yeseras que se insertan en distintos despegues dentro de la cubierta sedimentaria generando estructuras de piel fina y zonas triangulares (Figs. 12 y 13). La única perforación exploratoria en el área relevada es el pozo YPF.Nq.PDN.x-1 realizado sobre el anticlinal Pampa de Naunauco (Fig. 2), y aunque registró rastros de hidrocarburos no fue exitoso principalmente a causa de las malas propiedades petrofísicas de los intervalos arenosos de interés (Formaciones Mulichinco y Tordillo). En la zona del frente de deformación, estructuralmente más compleja, no se han realizado perforaciones. Una estructura con potencial prospectivo es el anticlinal con geometría tipo pop-up interpretado en la línea sísmica A (Fig. 10), pues es un pliegue relativamente somero e involucra a la Formación Agrio, la cual contiene varios intervalos psamíticos, y a las areniscas basales de la Formación Huirín. El análisis preliminar de las líneas sísmicas 2D existentes muestra que este pliegue en subsuelo está alineado con el anticlinal Curacó expuesto más al norte, pudiendo tratarse de la misma estructura fragmentada y desplazada por una falla transversal no aflorante. El anticlinal interpretado en subsuelo también presenta su eje con inclinación al sur, lo cual podría causar

una falta de cierre de los contornos estructurales en el sector norte de la posible trampa. Estudios geofísicos más detallados contribuirían a evaluar la geometría a lo largo del rumbo del pliegue, además de nueva información referida a la edad de deformación de este frente orogénico para evaluar la sincronización entre la estructura y la expulsión de hidrocarburos en el área (*timing*). Las manifestaciones más significativas de hidrocarburos en superficie corresponden a diques de bitumen, como por ejemplo en la Mina San Eduardo donde tienen un rumbo dominante NNE y cortan los bancos del Miembro Avilé, formados por petróleo proveniente de la Formación Vaca Muerta y/o de la Formación Agrio y solidificados por la pérdida de elementos volátiles (Cobbold et al. 2014). Un aspecto importante a destacar es que Cobbold et al. (2014) concluyen que la generación de este hidrocarburo y la consiguiente intrusión de los diques de bitumen estuvieron influenciadas por el calentamiento y la actividad hidrotermal vinculada al vulcanismo del Plioceno-Pleistoceno en la región. Esta etapa de generación tardía incrementa las posibilidades de acumulación de hidrocarburo en las potenciales trampas estructurales creadas en el Mioceno medio-tardío. En estratos del Miembro Avilé que forman el flanco oriental del anticlinal Río Neuquén se observan concreciones tubulares, de color marrón (Fig. 15), que reflejan la migración de hidrocarburos (e.g. Nyman et al. 2006, Rainoldi et al. 2015). Estas estructuras se encuentran en la parte superior del estrato arenoso, orientadas en una dirección NO-SE, tienen un largo aproximado de 70 cm y una sección ovalada de hasta 20 cm. Tal orientación coincide con la pendiente regional de la cuenca al norte de la Dorsal de Huincul, la cual posee una zona más profunda al noroeste donde se originaron gran parte de los hidrocarburos que al ser expulsados migran hacia el sector más somero en dirección al sureste (e.g. Legarreta y Villar 2012, Veiga et al. 2020). Todo lo antedicho sugiere que la zona de estudio es potencialmente prospectiva y, aunque hay múltiples factores a evaluar y considerar, sin duda la combinación de estudios geológicos multidisciplinarios en campo, con datos geofísicos y estudios analíticos, permitirá comprender con más claridad la evolución del sistema petrolero en el frente de deformación de la faja plegada y corrida neuquina y de este modo disminuir los riesgos de futuras actividades exploratorias.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió la configuración estructural del frente de deformación andino en el segmento norte de la faja plegada y corrida del Agrio, aproximadamente a los 37°40' de latitud sur, a partir del relevamiento y descripción de las



**Figura 15.** Fotografías de concreciones tubulares en areniscas del Miembro Avilé, sobre el flanco oriental del anticlinal Río Neuquén ( $37^{\circ}38'36''\text{S}$  –  $70^{\circ}01'30''\text{O}$ ), que indican la migración de hidrocarburos en dirección NO-SE.

estructuras aflorantes, la interpretación de líneas sísmicas y la construcción de dos secciones estructurales balanceadas. En ambas secciones se pudo inferir la participación del basamento en la deformación, dando lugar a estructuras de primer orden, el cual se encuentra elevado  $\sim 2.3$  km respecto a su posición en la zona frontal mediante el sistema de corrimientos Las Yeseras. Algunas de estas fallas se insertan en la Formación Auquilco y producen deformación en el Grupo Mendoza mientras que una ramificación hacia la superficie alcanza los niveles de la Formación Huitrín y forma una zona triangular somera. La deformación en superficie se caracteriza por estructuras de piel fina de diversas escalas. Gran parte de la zona mapeada está formada por pliegues con longitud de onda de  $\sim 4$ -5 km, con despegue basal en las evaporitas de la Formación Auquilco, que conforman estructuras de segundo orden involucrando al Grupo Mendoza. Algunos de estos pliegues, como los anticlinales Veta Neuquén y San Eduardo, tienen vergencia al oeste y un rumbo N-S típico de las fajas plegadas andinas. Por otro lado, los anticlinales Maitenes y Las Viseras tienen rumbo NNO y vergencias opuestas. Ambos anticlinales son cortados y transportados por corrimientos en su limbo frontal, que los cabalgan sobre estructuras adyacentes. La particular disposición de estos anticlinales se asocia a la posible existencia en el basamento de hemigrábenes heredados de la etapa de *rift*, formados por fallas normales de rumbo NNO y buzantes en sentidos opuestos, separadas por una zona de transferencia de orientación ONO. En nuestra

interpretación estas fallas normales podrían estar levemente invertidas, perturbando las propiedades de la suprayacente Formación Auquilco y de este modo controlando la localización, rumbo y vergencia de los corrimientos en la cubierta sedimentaria. Mediante la restitución de las secciones estructurales se determinó un acortamiento de  $\sim 6$  km (20%) para la cubierta sedimentaria y 4.7 km (16%) para las estructuras de piel gruesa. Esta diferencia indica que parte del desplazamiento necesario para generar las estructuras de segundo orden en los perfiles estudiados provendría de estructuras de piel gruesa existentes en la zona interna de la faja plegada y corrida del Agrio. Dos anticlinales apretados, con longitud de onda de  $\sim 2.5$  km, se interpretan como pliegues de tercer orden cuyo despegue basal se ubica en las pelitas del Miembro Pilmatué (Formación Agrio). El más destacado de estos pliegues es el anticlinal Río Neuquén, en el cual se relevaron numerosos corrimientos menores que repiten algunos bancos competentes localizados en los limbos y en la zona de charnela. Estas fallas se interpretan como corrimientos subsidiarios generados en respuesta al plegamiento (*fold-accommodation faults*), donde la fuerte anisotropía creada por los contrastes litológicos dentro de las Formaciones Agrio y Huitrín favorece la deformación mediante deslizamiento flexural. En el sector oriental del área de estudio se relevó un sistema extensional conformado por tres importantes fallas normales, de rumbo NE-SO y buzantes al NO. La información sísmica permitió reconocer que en profundidad se trata de fallas con geometría lítrica, que disminuyen gradualmente su inclinación uniéndose a un nivel de despegue en las evaporitas de la Formación Huitrín. Estas fallas directas generan desplazamientos verticales de  $\sim 1$  km en las secuencias del Cretácico Tardío-Oligoceno y a su vez están plegadas y basculadas hacia el este por las estructuras compresivas de piel gruesa en el frente de deformación. Se infiere que el sistema de fallas normales del cerro Villegas podría haberse formado en el Mioceno medio-tardío, mediante un mecanismo de deslizamiento gravitacional inducido por el incremento en la pendiente regional, vinculado al levantamiento del Dorso de los Chihuidos. El sector analizado presenta excelentes exposiciones y ofrece un escenario ideal para el estudio de las distintas estructuras tectónicas en campo, lo cual contribuye a comprender la compleja configuración estructural en el frente de deformación de la faja plegada y corrida del Agrio.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado a través de los subsidios CONICET PUE0047CO, ANPCyT PICT 0419 y PGI

SECyT-UNS 24/H152. Agradecemos a la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la provincia de Neuquén por brindarnos la información de subsuelo (pozos y líneas sísmicas). Agradecemos a la municipalidad de Chos Malal por facilitar nuestra estadía en el camping durante los trabajos de campo. Los comentarios y sugerencias de Ernesto Cristallini y Andrés Echaurren contribuyeron a mejorar la versión final de nuestro trabajo.

## REFERENCIAS

- Aguirre-Urreta, B., Tunik, M., Naipauer, M., Pazos, P., Ottone, E., Fanning, M. y Ramos, V. 2011. Malargüe Group (Maastrichtian-Danian) deposits in the Neuquén Andes, Argentina: Implications for the onset of the first Atlantic transgression related to Western Gondwana break-up. *Gondwana Research* 19: 482-494.
- Allmendinger, R., Zapata, T., Manceda, R. y Dzelalija, F., 2004. Trishear kinematic modeling of structures, with examples from the Neuquén basin, Argentina. En: McClay, K. (ed.), *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*, AAPG Memoir 82: 356-371.
- Aramendia, B., Turienzo, M., Peralta, F., Lebinson, F. y Sánchez, N., 2019. Las estructuras tectónicas andinas en las nacientes del arroyo Taquimilán (37°35'S), faja plegada y corrida del Agrio, Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 76 (4): 340-351.
- Arregui, C., Carbone, O. y Martínez, R., 2011a. El Grupo Cuyo (Jurásico Temprano –Medio) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 77-89, Buenos Aires.
- Arregui, C., Carbone O. y Sattler F. 2011b. El Grupo Lotena (Jurásico Medio – Tardío) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 91-98, Buenos Aires.
- Barrio, C.A., 1990. Upper Cretaceous–early Tertiary sedimentation in a semi-arid foreland basin, Neuquén Basin, western Argentina. *Sedimentary Geology* 66: 255–275.
- Bechis, F., Cristallini, E., Giambiagi, L., Yagupsky, D., Guzmán, C. y García, V., 2014. Transtensional tectonics induced by oblique reactivation of previous lithospheric anisotropies during the Late Triassic to Early Jurassic rifting in the Neuquén basin: Insights from analog models. *Journal of Geodynamics* 79: 1-17.
- Boyer S. y Elliott D., 1982. Thrust systems. *AAPG* 66: 1196-1230.
- Carbone, O., Franzese, J., Limeres, M., Delpiño, D. y Martínez, R. 2011. El ciclo precuyano (Triásico Tardío – Jurásico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 63-76, Buenos Aires.
- Cobbold, P. y Rosello, E. 2003. Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 20: 429-443.
- Cobbold P., Ruffet G., Leith L., Loseth H., Rodrigues N., Leanza H. y Zanella A., 2014. Radial patterns of bitumen dykes around Quaternary volcanoes, provinces of northern Neuquén and southernmost Mendoza, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 56: 454-467.
- Cristallini E. y Allmendinger R., 2000. Estructura de la faja plegada del Agrio, provincia del Neuquén. Informe YPF (inédito), 108 p., Buenos Aires.
- Cristallini, E., Tomezzoli, R., Pando, G., Gazzera, C., Martínez, J.M., Quiroga, J., Buhler, M., Bechis, F., Barredo, S. y Zambrano, O. 2009. Controles precuyanos en la estructura de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 248-264.
- Dahlstrom, C. 1969. Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences* 6: 743- 757.
- D'Elia L., Bilmes A., Naipauer M., Vergani G., Muravchik M. y Franzese J., 2020. The Syn-Rift of the Neuquén Basin (Precuyano and Lower Cuyano Cycle): Review of Structure, Volcanism, Tectono-Stratigraphy and Depositional Scenarios. En: Kietzmann D. y Folguera A. (eds.), *Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes*. Springer Earth System Sciences, doi.org/10.1007/978-3-030-29680-3\_1
- Dyhr, C., Holm, P., Llambías, E. y Scherstén, A. 2013. Subduction controls on Miocene back-arc lavas from Sierra de Huantraico and La Matancilla, Argentina and new <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating from the Mendoza Region, Argentina. *Lithos* 179: 67-83.
- Fantín M., Venara L., Limeres M. y Cristallini E., 2011. Análisis de la falla maestra del hemigraben de Estancia Vieja, Cuenca Neuquina, Río Negro. 18° Congreso Geológico Argentino, S11.
- Fantín J., Manceda R., Palacio B., López R., Mykietiuik K. y Barberis R. 2015. Caracterización de las fracturas naturales de las Formaciones Vaca Muerta y Mulichinco en la estructura de Filo Morado, Cuenca Neuquina, Argentina. 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas DVD: 541-561.
- Fennell L., Borghi P., Martos F., Rosselot E., Naipauer M. y Folguera A., 2020. The Late Cretaceous Orogenic System: Early Inversion of the Neuquén Basin and Associated Synorogenic Deposits (35°–38° S). En: Kietzmann D. y Folguera A. (eds.), *Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes*. Springer Earth System Sciences, doi.org/10.1007/978-3-030-29680-3\_12
- Franzese, J. y Spalletti, L. 2001. Late Triassic-early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Sciences* 14: 257-270.
- Frías Saba R., Sánchez N., Turienzo M. y Lebinson F., 2021. Análisis geométrico y cinemático del anticlinal Chos Malal, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78 (4): en prensa.
- Fuentes L. y Horton B., 2020. The Andean Foreland Evolution of the Neuquén Basin: A Discussion. En: Kietzmann D. y Folguera A. (eds.),

- Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes. Springer Earth System Sciences, doi.org/10.1007/978-3-030-29680-3\_14
- Galland, O., Hallot, E., Cobbold, P., Ruffet, G. y de Bremond d'Ars, J. 2007. Volcanism in a compressional Andean setting: A structural and geochronological study of Tromen volcano (Neuquén province, Argentina). *Tectonics* 26: 1-24.
- Garrido, A., Kramarz, A., Forasiepi, A. y Bond, M. 2012. Estratigrafía, mamíferos fósiles y edad de las secuencias volcanosedimentarias eoceno-miocenas de la sierra de Huantraico-sierra Negra y cerro Villegas (provincia del Neuquén, Argentina). *Andean Geology* 39: 482-510.
- Giambiagi, L., Tunik, M., Barredo, S., Bechis, F., Ghiglione, M., Alvarez, P. y Drosina, M. 2009. Cinemática de apertura del sector norte de la cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (2): 278-292.
- Gianni, G., Dávila, F., Echaurren, A., Fennell, L., Tobal, J., Navarrete, C., Quesada, P., Folguera, A. y Giménez, M. 2018. A geodynamic model linking Cretaceous orogeny, arc migration, foreland dynamic subsidence and marine ingression in southern South America. *Earth Sciences Reviews* 185. doi:10.1016/j.earscirev.2018.06.016
- Grimaldi, G. y Dorobek, S. 2011. Fault framework and kinematic evolution of inversion structures: Natural examples from the Neuquén Basin, Argentina. *AAPG* 95 (1): 27-60.
- Howell, J., Schwarz, E., Spalletti, L. y Veiga, G. 2005. The Neuquén Basin: an overview. En: Veiga, G., Spalletti, L., Howell, J. y Schwarz, E. (eds.), *The Neuquén Basin, Argentina: a case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*. The Geological Society, Special Publication 252: 1-14, London.
- Iannelli, S., Fennell, L., Fernández Paz, L., Litvak, V., Encinas, A. y Folguera, A. 2020. Late Cretaceous to Oligocene Magmatic Evolution of the Neuquén Basin. En: Kietzmann D. y Folguera A. (eds.), *Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes*. Springer Earth System Sciences, doi.org/10.1007/978-3-030-29680-3\_16
- Irastorza, A., Turienzo, M., Peralta, F., Irastorza, M., Zavala, C. y Sánchez, M. 2019. La estructura del frente de deformación de la faja plegada y corrida del Agrio a los 38°20'S, Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 76 (3): 213-228.
- Kay, S. y Copeland, P. 2006. Early to middle Miocene back-arc magmas of the Neuquén Basin: geochemical consequences of slab shallowing and the westward drift of South America. En: Kay, S. y Ramos, V. (eds.), *Evolution of an Andean Margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35-39°S)*. Geological Society of America, Special Paper 407: 185-213.
- Kietzmann, D., Ambrosio, A. y Suriano, J. 2016. The Vaca Muerta-Quintuco system (Tithonian-Valanginian) in the Neuquén Basin, Argentina: a view from the outcrops in the Chos Malal fold and thrust belt. *AAPG* 100: 743-771.
- Kietzmann, D. y Folguera, A. 2020. Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes. Springer Earth System Sciences, 521 p., Cham.
- Kozłowski, E., Cruz, C. y Sylwan, C. 1996. Geología estructural de la zona de Chos Malal. Cuenca Neuquina, Argentina. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 1: 15-26, Buenos Aires.
- Leanza, H. 2003. Las Sedimentitas Huitrinianas y Rayosianas (Cretácico Inferior) en el ámbito central y meridional de la Cuenca Neuquina, Argentina. Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas, Geología 2: 1-31. Buenos Aires.
- Lebinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Araujo, V. y Dimieri, L. 2015. Geometría y cinemática de las estructuras tectónicas en el extremo septentrional de la faja corrida y plegada del Agrio, Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72: 299-313.
- Lebinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Araujo, V., D'Annunzio, C. y Dimieri, L. 2018. The structure of the northern Agrio fold and thrust belt (37°30'S), Neuquén Basin, Argentina. *Andean Geology* 45 (2): 249-273.
- Lebinson, F., Turienzo, M., Sánchez, N., Cristallini, E., Araujo, V. y Dimieri, L. 2020. Kinematics of a backthrust system in the Agrio fold and thrust belt, Argentina: Insights from structural analysis and analogue models. *Journal of South American Earth Sciences* 100: 102594.
- Legarreta, L. y Uliana, M. 1991. Jurassic/Cretaceous marine oscillations and geometry of a backarc basin fill, central Argentine Andes. En: McDonald D. (ed) *Sedimentation, Tectonics and Eustasy*. I.A.S. Special Publication 12: 429-450. London.
- Legarreta, L. y Villar, H. 2012. Las facies generadoras de hidrocarburos de la Cuenca Neuquina. *Petrotecnia* 53 (4): 14-42.
- Llambías, E., Leanza, H. y Carbone, O. 2007. Evolución tectono-magmática durante el Pérmico al Jurásico temprano en la Cordillera del Viento (37°05'S - 37°15'S): Nuevas evidencias geológicas y geoquímicas del inicio de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62: 217-235.
- Lyons, W. 1987. Geología y estructura de las salinas de Huitrín, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 42 (1-2): 122-142.
- Messenger, G., Niviere, B., Lacan, P., Hervouet, Y. y Xavier, J.P. 2014. Plio-Quaternary thin-skinned tectonics along the crustal front flexure of the southern Central Andes: a record of the regional stress regime or of local tectonic-driven gravitational processes? *International Journal of Earth Sciences* 103: 929-951.
- Minniti, S., Gutiérrez Pleimling, A., Artega, M. y Pestalardo, F. 1986. Análisis estructural y estratigráfico de la Faja Plegada Neuquina a la latitud de 37°30', Departamentos de Ñorquin y Pehuenches, provincia de Neuquén. Informe YPF (inédito), 64 p. Buenos Aires.
- Mitra, S. 1990. Fault-Propagation Folds: Geometry Kinematic Evolution, Hydrocarbon Traps. 1990. *AAPG* 74: 921-945.
- Mitra, S., 2002. Fold-accommodation faults. *AAPG* 86 (4): 671-693.
- Nocioni, A. 1996. Estudio estructural de la Faja Plegada y Corrida de la Cuenca Neuquina- Surmendocina. 13° Congreso Geológico Argentino

- y 3º Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2: 353-372. Buenos Aires.
- Pángaro, F., Martínez, R., Sattler, F. y Bettini, F., 2011. El Flanco Oriental. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 407-418, Buenos Aires.
- Nyman, S., Nelson, C., Campbell, K., Schellenberg, F., Pearson, M., Kamp, P., Browne, G. y King, P. 2006. Tubular carbonate concretions as hydrocarbon migration pathways? Examples from North Island, New Zealand. *New Zealand Petroleum Conference Proceedings*: 1-9.
- Pazos, P., Comerio, M., Fernández, D., Gutiérrez, C., González Estebenet, C. y Heredia, A. 2020. Sedimentology and sequence stratigraphy of the Agrio Formation (Late Valanginian–Earliest Barremian) and the closure of the Mendoza Group to the north of the Huincul High. En: Kietzmann D. y Folguera A. (eds.), *Opening and Closure of the Neuquén Basin in the Southern Andes*. Springer Earth System Sciences, doi.org/10.1007/978-3-030-29680-3\_10
- Plotek, B., Guzmán, C. y Cristallini, E. 2018. Modelo análogo de fallamiento extensional y comparación con el sistema de fallas normales Las Salinas, provincia del Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 75 (4): 592-600.
- Rainoldi, A., Franchini, M., Beaufort, D., Mozley, P., Giusiano, A., Cesaretti, N., Patrier, P., Impiccini, A. y Pons, J. 2015. Mineral reactions associated with hydrocarbon paleomigration in the Huincul High, Neuquén Basin, Argentina. *GSA Bulletin* 127 (11-12): 1711-1729. doi: 10.1130/B31201.1
- Ramos, V. 1981. Descripción Geológica de la Hoja 33c, Los Chihuidos Norte. Provincia del Neuquén. Servicio Geológico Nacional. Boletín 182: 1-103, Buenos Aires.
- Ramos, V. 1998. Estructura del sector occidental de la faja plegada y corrida del Agrio, cuenca Neuquina, Argentina. 10º congreso Latinoamericano de Geología, Actas 2: 105-110, Buenos Aires.
- Ramos V. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: Constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation. En: Veiga, G., Spalletti, L., Howell, J. y Schwarz, E. (ed.), *The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*. The Geological Society, Special Publication 252: 15-35, London.
- Rojas Vera, E., Mescua, J., Folguera, A., Becker, T., Sagripanti, L., Fenell, L., Orts, D. y Ramos, V. 2015. Evolution of the Chos Malal and Agrio fold and thrust belts, Andes of Neuquén: Insights from structural analysis and apatite fission track dating. *Journal of South American Earth Sciences* 64: 418-433.
- Sagripanti, L., Rojas Vera, E., Gianni, G., Folguera, A., Harvey, J., Farías, M. y Ramos, V. 2015. Neotectonic reactivation of the western section of the Malargüe fold and thrust belt (Tromen volcanic plateau, Southern Central Andes). *Geomorphology* 232, 164-181.
- Sánchez, N., Turienzo, M., Lebinson, F., Araujo, V., Coutand, I. y Dimieri, L. 2015. Structural style of the Chos Malal fold and thrust belt, Neuquén basin, Argentina: Relationship between thick- and thinskin tectonics. *Journal of South American Earth Sciences* 64: 399-417.
- Sánchez, N., Coutand, I., Turienzo, M., Lebinson, F., Araujo V. y Dimieri, L. 2018. Tectonic evolution of the Chos Malal fold and thrust belt (Neuquén Basin, Argentina) from (U-Th)/He and fission track thermochronometry. *Tectonics* 37: 1907-1929.
- Schwarz, E., Spalletti, L. y Veiga, G. 2011. La Formación Mulichinco (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 113-129, Buenos Aires.
- Scisciani, V. 2009. Styles of positive inversion tectonics in the Central Apennines and in the Adriatic foreland: Implications for the evolution of the Apennine chain (Italy). *Journal of Structural Geology* 31: 1276–1294.
- Spalletti, L., Arregui, C. y Veiga, G. 2011a. La Formación Tordillo y equivalentes (Jurásico Tardío) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 99-111. Buenos Aires.
- Spalletti, L., Veiga, G. y Schwarz, E. 2011b. La Formación Agrio (Cretácico Temprano) en la Cuenca Neuquina. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén*. 18º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 145-160, Buenos Aires.
- Suppe, J. y Medwedeff, D. 1990. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae Geologicae Helveticae* 83: 409-454.
- Torres Carbonell, P., Rodríguez Arias, L., Atencio, M., 2017. Geometry and kinematics of the Fuegian thrust-fold belt, southernmost Andes. *Tectonics* 36, 33–50.
- Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V. 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén basin: Constraints on the Andean uplift from U-Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics* 489: 258-273.
- Turienzo M., Sánchez N., Lebinson F., Di Meglio M, y Otharán G, 2016. Relevamiento geológico del área Los Toldos IV, Neuquén. Informe TECTROPETROL (inédito), 94 p, Buenos Aires.
- Turienzo, M., Sánchez, N., Lebinson F. y Dimieri L. 2018. The structure of the Southern Central Andes (Chos Malal fold and thrust belt). En: A. Folguera et al., (eds) *The Evolution of the Chilean Argentinean Andes*. Springer Earth System Sciences: 411-441, Cham.
- Turienzo M., Sánchez N., Lebinson F., Peralta F., Araujo V., Irastorza A. y Dimieri L. 2020. Basement-cover interaction in the mountain front of the Northern Neuquén fold and thrust belt (37°10' – 37°40' S), Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 100, doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102560
- Veiga, G., Spalletti, L. y Schwarz, E. 2011. El Miembro Avilé de la Formación Agrio (Cretácico Temprano). En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), *Geología y Recursos*

- Naturales de la Provincia del Neuquén. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 161-173, Buenos Aires.
- Veiga, R., Vergani, G., Brissón, I., Macellari, C. y Leanza, H. 2020. The Neuquén super basin. AAPG 104 (12): 2521–2555
- Vergani, G., Tankard, A., Belotti, H. y Weisink, H. 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina. En: Tankard, A., Suarez Soruco, R. y Weisink, H. (eds.), Petroleum Basins of South America. AAPG Memoir 62: 383-402, Tulsa.
- Víñes, R., 1989. Interpretación de la estructura de Filo Morado. 1° Congreso Nacional de Exploración de hidrocarburos (Argentina), Actas 2: 1107-1124, Buenos Aires.
- Woodward, N., Boyer, S. y Suppe, J. 1989. Balanced Geological Cross-Sections: An Essential Technique in Geological Research and Exploration. American Geophysical Union. Short Courses in Geology 6, 132 p., Washington.
- Zamora Valcarce, G., Fantin, J., 2005. Deformación e los depósitos terciarios del frente de la faja plegada de Neuquén a la latitud 37°30'S. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas, 6 p., Buenos Aires.
- Zamora Valcarce, G. y Zapata, T. 2015. Building a valid structural model in a triangle zone: An example from the Neuquén fold and thrust belt, Argentina. Interpretation 3 (4): 117-131.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Delpino, D. y Ansa, A. 2006a. Structural evolution and magmatic characteristics of the Agrio fold-and-thrust belt. En Kay, S. y Ramos, V. Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S), Geological Society of America Special Paper 407: 125-145.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Ansa, A., Selva, G., 2006b. Three-dimensional structural modeling and its application for development of the El Portón field, Argentina. AAPG 90 (3): 307–319.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T., Ramos, V.A., Rodríguez, F. y Bernardo, L. 2009. Evolución tectónica del Frente Andino en Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65: 192-203.
- Zamora Valcarce, G., Zapata, T. y Ramos, V. 2011. La faja plegada y corrida del Agrio. En: Leanza, H.A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli J.C. y Vallés, J.M. (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. 18° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 367-374, Buenos Aires.
- Zapata, T. y Folguera, A. 2005. Tectonic evolution of the Andean fold and thrust belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. En: Veiga, G., Spalletti, L., Schwarz, E. y Howell, J. (eds.) The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics. The Geological Society, Special Publications 252: 37-56. London.
- Zapata, T., Dzelalija, F., Olivieri, G., 2001. Desarrollo de reservorios fracturados de la Formación Mulichinco usando modelado estructural 3D: yacimiento Filo Morado, Cuenca Neuquina, Argentina. Boletín de Informaciones Petroleras 66: 38-47.
- Zapata, T.R., Córscico, S., Dzelalija, F., Zamora Valcarce, G., 2002. La faja plegada y corrida del Agrio: Análisis estructural y su relación con los estratos terciarios de la Cuenca Neuquina, Argentina. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Actas electrónicas, Mar del Plata.
- Zappettini, E., Lagorio, S., Dalponte, M., Santos, J. y Belousova, E. 2018. Evidencias de magmatismo precuyano en el norte de la Cordillera del Viento. Revista de la Asociación Geológica Argentina 75 (4): 533-558.
- Zavala, C., Arcuri, M., Di Meglio M. y Zorzano A. 2011. Las Capas de San Eduardo: 130 metros de arenas en el Miembro Inferior de la Formación Agrio. Cretácico Inferior, Cuenca Neuquina. 8° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas electrónicas: 215-224, Mar del Plata.
- Zavala, C., Arcuri, M., Di Meglio M. y Zorzano A. 2014. Hallazgo de calizas arrecifales (Valanginiano tardío) en el Miembro Pilmatué de la Formación Agrio. 19° Congreso Geológico Argentino, Córdoba, T1-60.