



## B.9. VOLCANISMO JURÁSICO EXTRAANDINO

Claudia B. ZAFFARANA, Silvia L. LAGORIO, Gloria GALLASTEGUI, Darío ORTS, Alicia BUSTEROS, Stella POMA, Daniel GREGORI, Raúl GIACOSA, Diego SILVA NIETO

### RESUMEN

Durante el Jurásico Temprano a Medio, en Patagonia se manifestó abundante magmatismo asociado a la extensión generalizada producida durante el desmembramiento de Gondwana. En la región oriental de antepaís fragmentado, las rocas volcánicas generadas en esta etapa han sido incluidas dentro de la Provincia Volcánica Chon Aike, la cual está representada por diferentes manifestaciones volcánicas que dentro del ámbito del Macizo Norpatagónico se conocen como Formación Lonco Trapial (y unidades homologables) y Complejo Volcánico Marifil. En este trabajo se realiza un análisis de la impronta geoquímica de la Formación Lonco Trapial, y se la compara con la de las rocas ígneas del sector norte de Patagonia producidas durante el Jurásico Temprano a Medio. En ese período, una configuración de arco y de cuencas de retroarco asociadas existía en el margen sudoccidental de Gondwana, ya que la subducción de placas pacíficas al oeste era un proceso tectónico activo. En particular, a la latitud de 41°-49° Sur se encontraba la cuenca del Chubut, una angosta cuenca de retroarco que tenía una orientación general NNO-SSE, contemporánea con la intrusión del Batolito Subcordillerano y con las volcanitas de la Formación Piltriquitrón. Durante el Jurásico Temprano, la paleozona de subducción del margen sudoccidental de Gondwana estaba señalada por el Batolito Subcordillerano, así como por las rocas piroclásticas intercaladas en los niveles sedimentarios de la cuenca de Chubut y por la Formación Piltriquitrón. Hacia el Jurásico Medio, la actividad del arco volcánico en la zona de subducción estaba representado por las formaciones Ibáñez y Lago La Plata. La comparación geoquímica de todas las unidades del Jurásico Temprano a Medio de la provincia del Chubut reveló que las asociaciones ígneas tienen características mixtas entre magmatismo de subducción y de intraplaca. Sin embargo, las características de intraplaca son más evidentes en los magmas que estuvieron más alejados de la paleozona de subducción. La impronta geoquímica predominantemente calcoalcalina de las rocas volcánicas de la Formación Lonco Trapial podría deberse tanto a contaminación cortical como a su origen mixto, a partir de la fusión tanto del manto como de la corteza inferior, y a un manto metasomatizado por una subducción previa. La profundidad de la fuente mantélica de los magmas de la Formación Lonco Trapial podría haber favorecido el proceso de contaminación cortical.

**Palabras Clave.** Lonco Trapial, Garamilla, extensión, subducción, retroarco, contaminación cortical.

### ABSTRACT

Patagonia was the locus of abundant magmatism associated to the break-up of the Gondwana supercontinent in Early to Middle Jurassic times. In the eastern, broken foreland region, the volcanic rocks generated during this extensional stage have been included in the Chon Aike Volcanic Province, which in the area of the North Patagonian Massif is represented by the volcanic rocks of the Lonco Trapial Formation (and related units) and the Marifil Volcanic Complex. This work presents an analysis of the geochemical signature of the Lonco Trapial Formation in relation with the igneous units from northern Patagonia, which were produced in Early to Middle Jurassic times. In that period, plate subduction at the west was an active tectonic process, with an arc / retro-arc margin configuration. At the latitude of 41°-49° S, the NNW-SSE striking Chubut Basin was in the retro-arc of the Early Jurassic paleo-subduction zone. The position of the Early Jurassic arc was signaled by the intrusion of the Subcordilleran Plutonic Belt and by the volcanic rocks of the Piltriquitrón Formation. In Middle Jurassic times, the activity of the volcanic arc in the subduction zone was represented by the Ibáñez and Lago La Plata formations.



The geochemical comparison of the Early to Middle Jurassic igneous units of the Chubut Province showed that they are intermediate between subduction and intraplate magmas. However, the intraplate traits become more important towards the east, away from the paleo-subduction zone. The calc-alkaline signature of Lonco Trapial Formation could reflect a previously metasomatized by earlier subduction processes, although crustal contamination could have played a role as well. The high depth of the mantle magma source of Lonco Trapial Formation could have favored their crustal contamination.

**Keywords.** *Lonco Trapial, Garamilla, extension, subduction, retroarc, crustal contamination.*

## INTRODUCCIÓN

Durante la etapa de desmembramiento de Gondwana se instaló en la región Extraandina de la provincia de Chubut un régimen tectónico de extensión generalizada que derivó en la producción de abundante magmatismo mesosilícico a ácido durante el Jurásico Temprano a Medio (por ej. Gust *et al.* 1985, Uliana y Biddle 1987, Rapela y Kay 1988, Pankhurst *et al.* 2000, Suárez y Márquez 2007, Mpodozis y Ramos 2008, Echaurren *et al.* 2017). Este volcanismo involucra a las formaciones Lonco Trapial y Garamilla y unidades homologables en la región Extraandina central de las provincias de Chubut y Río Negro, mientras que en la región Extraandina oriental está representado por el Complejo Volcánico Marifil (Fig. 1). Estas unidades volcánicas del Jurásico Temprano a Medio forman parte de la Provincia Volcánica Chon Aike, definida por Pankhurst *et al.* (1998) como una provincia magmática silíceo (SLIP, «Silicic Large Igneous Province»). El gran tamaño y volumen de magma extruido de esta provincia magmática ácida, que se extiende incluso hasta la Península Antártica, la convierten en una de las más importantes del mundo (Pankhurst *et al.* 1998, 2000, Riley *et al.* 2001). Concomitantemente con este magmatismo de intraplaca que se desarrollaba en las zonas central y oriental de la Patagonia Extraandina, en el borde occidental de Gondwana se estaban desarrollando las etapas iniciales del magmatismo de arco debido a la subducción de placas oceánicas proto-Pacíficas bajo una configuración tectónica de arco - cuenca de retroarco (Mpodozis y Ramos 1989).

Este trabajo presenta una revisión de las unidades ígneas de la faja volcánica Extraandina del Jurásico Temprano a Medio de la provincia del Chubut, con especial énfasis en las rocas de las formaciones Lonco Trapial y Garamilla. Se establecen los procesos petrogenéticos que habrían controlado la evolución de la Formación Lonco Trapial, así como las principales similitudes y diferencias entre las unidades coetáneas

tanto del sector occidental Andino y Preandino como del Extraandino oriental.

## CONTEXTO REGIONAL: AFLORAMIENTOS Y PETROGRAFÍA

### Volcanitas mesozoicas en la región Extraandina central: Formación Lonco Trapial

El registro volcánico mesozoico en el ámbito de la región central de la provincia del Chubut está representado principalmente por andesitas y riolitas. Estas rocas habían sido denominadas históricamente como formaciones Garamilla y Taquetrén (Nullo y Proserpio 1975, Nullo 1978, Proserpio 1978, Coira 1979). La Formación Garamilla, que aflora principalmente en el ámbito de la provincia de Río Negro, incluía predominantemente riolitas, mientras que las rocas mesosilícicas, cuyo volumen mayor aflora en la región central de la provincia del Chubut, quedaban comprendidas dentro de la Formación Taquetrén (Fig. 1). Page y Page (1993) describieron a la faja de rocas volcánicas mesozoicas de la región de Gastre - sierra de Taquetrén (Fig. 1) como compuesta por tres conjuntos rocosos: uno basal esencialmente lávico de composición básica, otro intermedio constituido por brechas y piroclastitas mesosilícicas y el superior compuesto por ignimbritas riolíticas. Más al sur, en la región de Pampa de Agnia (entre Paso de Indios y José de San Martín, Fig. 1), las rocas volcánicas mesosilícicas fueron incluidas dentro del Grupo Lonco Trapial (Lesta y Ferello 1972). Este grupo fue redefinido como Formación Lonco Trapial por Nullo y Proserpio (1975), sobre la base de la edad más joven de la Formación Taquetrén, que incluiría sedimentitas aparentemente más modernas que la Formación Lonco Trapial. Sin embargo, Lizuaín y Silva Nieto (1996) equipararon a la Formación Taquetrén con la Formación Lonco Trapial, siendo ese el criterio que prevalece hoy en día en la literatura geológica para denomi-

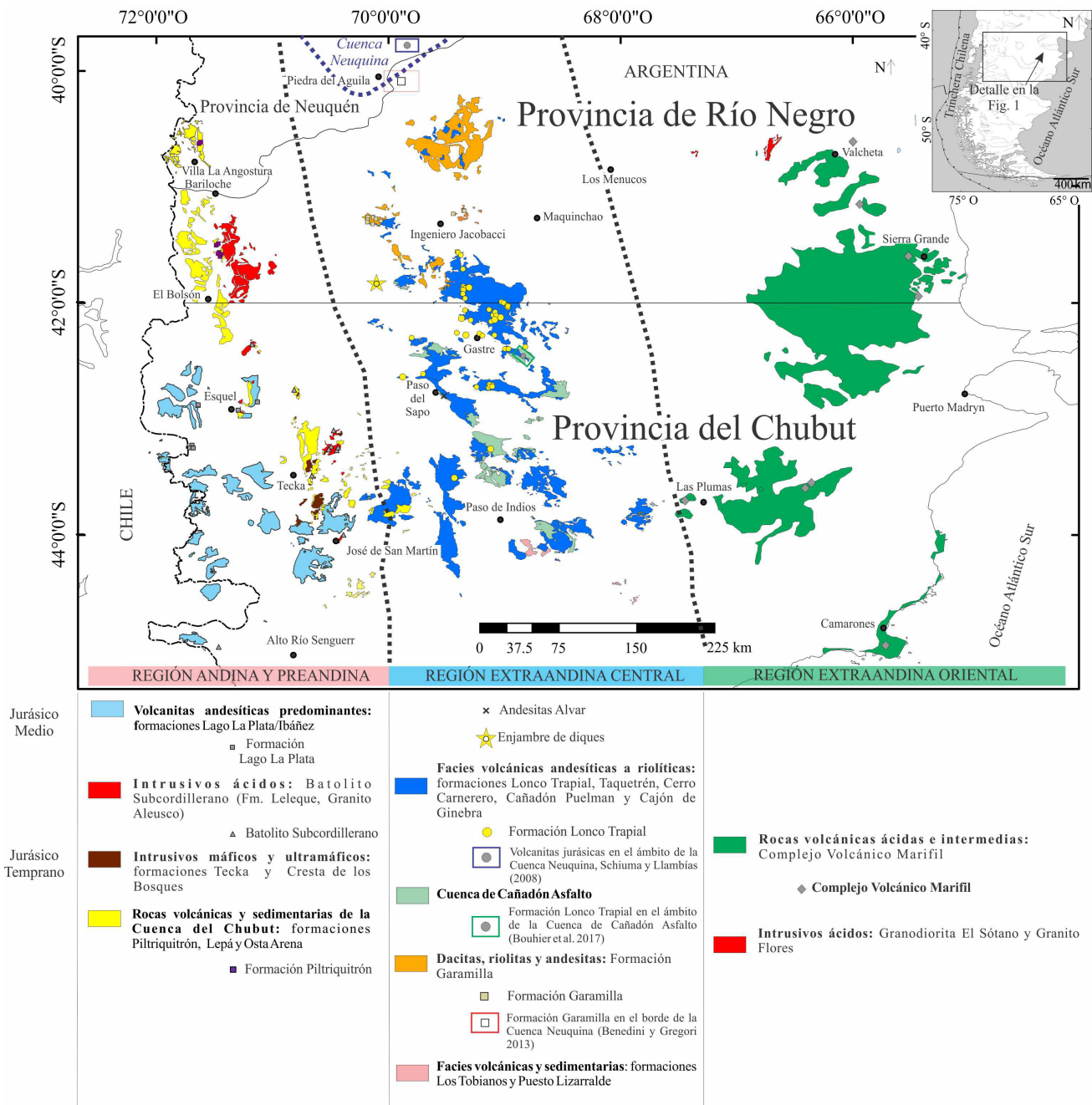
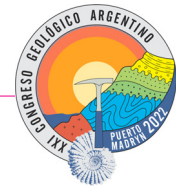


Fig. 1. Distribución de las rocas volcánicas y plutónicas jurásicas en el ámbito del sur de la provincia de Río Negro y del norte de la psierarprovincia de Chubut. El mapeo está basado en la compilación de datos inéditos del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) y en Proserpio (1978), Sato *et al.* (2004), Cúneo *et al.* (2013), y Benedini y Gregori (2013). El mapa muestra la ubicación de las unidades homologables temporalmente a la Formación Lonco Trapial (Pankhurst y Rapela 1995, Haller *et al.* 1999, Aragón *et al.* 2000, López de Luchi y Rapalini 2002, Dejonghe *et al.* 2002, Rapela *et al.* 2005, Schiuma y Llambias 2008, Márquez *et al.* 2010 y 2011, Benedini y Gregori 2013, Bouhier *et al.* 2017, Zaffarana *et al.* 2018 y Zaffarana *et al.* 2020, Navarrete *et al.* 2019).

nar a las rocas volcánicas predominantemente mesosilícicas de la región central del Chubut (por ej., véase Márquez 2016). Ese criterio concuerda con las edades radiométricas disponibles en la bibliografía, que ubican a las volcanitas mesosilícicas en el Jurásico Temprano (c. 185-182 Ma,  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  en anfíbol, Zaffarana y Somoza 2012; c. 189-178 Ma, U-Pb en circón, Cúneo *et al.* 2013; c. 191-178 Ma,  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  en anfíbol y K/Ar en roca total, Zaffarana *et al.* 2018).

La Formación Lonco Trapial está compuesta, mayoritariamente, por lavas, brechas, pórfiros y diques de composición andesítica a riolítica (Fig. 2a-e). Las lavas de composición basáltica o basandesítica son mucho más raras. La escasa representación de rocas máficas es un rasgo típico no solamente de la Formación Lonco Trapial sino de toda la Provincia Volcánica Chon Aike (Pankhurst *et al.* 1998). Cuando están presentes, los basaltos tienen textura porfírica, con una frac-



ción de 40% de fenocristales, en su mayor parte de plagioclasa, también se observan algunos fenocristales de olivina, inmersos en un 60% de pasta afanítica con textura intergranular. La pasta está compuesta por plagioclasa (60%), clinopiroxeno (25%), olivina (10%) y un 5% compuesto por minerales opacos y apatita. Los fenocristales de olivina aparecen alterados a iddingsita. Se observan también diques de andesitas basálticas con textura ofítica a subofítica con plagioclasas parcialmente inmersas en clinopiroxeno incoloro, minerales opacos intersticiales, y vidrio intersticial alterado a sericita y arcillas. Respecto a las andesitas de la Formación Lonco Trapial, pueden caracterizarse dos tipos según el mineral máfico que predomine: andesitas anfibólicas y clinopiroxénicas, siendo las primeras claramente las más comunes (Fig. 2c-e). Ambos tipos de andesitas tienen textura porfírica a glomeroporfírica, y están compuestas por un 30% de fenocristales. Los fenocristales de plagioclasa son subhedrales a euhedrales, representan el 40-60% de la fracción de fenocristales y pueden alcanzar un diámetro de 3 mm (Fig. 2c-e). Comúnmente tienen zonalidad óptica, signos de resorción y márgenes en desequilibrio, así como sinneusis, texturas cribadas y bordes (y a veces también anillos) albiticos. Las andesitas con clinopiroxeno pueden tener hasta un 20% de fenocristales de clinopiroxeno euhedral de composición augítica o titanoaugítica (Fig. 2e; Zaffarana *et al.* 2018). En ese tipo de andesitas, el anfíbol se presenta como microfenocristales pleocroicos de color castaño claro a oscuro de magnesio-hastingsita (Zaffarana *et al.* 2018; (Fig. 2e). En cambio, en las andesitas anfibólicas los fenocristales de anfíbol son cristales subhedrales pleocroicos de castaño a verde claro (Fig. 2d), con ocasionales rebordes de óxidos de hierro y titanio y con maclas polisintéticas (el anfíbol es, típicamente, hornblenda y tschermakita, Zaffarana *et al.* 2018). En algunas muestras se observa que el anfíbol es oxihornblenda de color castaño anaranjado (Fig. 2c). Se preservan algunos núcleos relictos de clinopiroxeno en el anfíbol. Los fenocristales de biotita, cuando están presentes, son pleocroicos de castaño oscuro a rojizo, presentan, en ocasiones, inclusiones de agujas de rutilo y rebordes de óxidos de hierro (Fig. 2c, d). Otros minerales accesorios son titanomag-netita, titanita y apatita, esta última se presenta en forma de bastoncitos en la pasta.

Las pastas de las andesitas tienen texturas intergranulares, intersertales, traquíticas,

pilotácicas o hialopílicas, y están compuestas por microlitos de plagioclasa y de los mismos minerales que forman los fenocristales. El vidrio intersticial está alterado a sericita y arcillas. Las andesitas presentan una alteración propilítica en grado variable, dada por cloritas, carbonatos, titanita secundaria, cuarzo, epidoto, albita y minerales opacos.

Las lavas y domos dacíticos de la Formación Lonco Trapial tienen texturas porfíricas a glomeroporfíricas con un alto porcentaje de fenocristales (60-40%) de plagioclasa, biotita y cuarzo, y a veces también de ortosa, anfíbol y clinopiroxeno. El circón y los minerales opacos son minerales accesorios comunes. La pasta está compuesta totalmente por vidrio desvitrificado, o tiene textura felsítica, microgranosa, pilotácica o afieltrada. Las ignimbritas dacíticas, con grado variable de soldamiento, tienen fragmentos de cristales de cuarzo, ortosa, hornblenda, biotita y minerales opacos. Las trizas se encuentran parcial a totalmente desvitrificadas. Las ignimbritas riolíticas están a menudo densamente soldadas con texturas parataxíticas y eutaxíticas (Fig. 2f). Los fragmentos de cristales son de cuarzo, ortosa, plagioclasa, biotita y minerales opacos. Los fragmentos líticos son comunes y corresponden a andesitas o andesitas basálticas, así como a rocas plutónicas ácidas (Fig. 2g). Los depósitos piroclásticos están siempre fuertemente desvitrificados a texturas esferulíticas, axiolíticas y felsíticas. Se observan minerales secundarios como epidoto, titanita, clorita, sericita, arcillas y carbonatos reemplazando tanto a la matriz como a los minerales máficos. El cuarzo suele tener formas bipiramidales con engolfamientos, y la biotita a menudo está alterada a cloritas y minerales opacos. Los diques y las lavas riolíticas tienen textura porfírica con fenocristales (2%) de plagioclasa, ortosa, biotita y cristales más pequeños de circón en la pasta (Fig. 2g). La pasta está compuesta por cuarzo y feldespato con textura felsítica a microgranosa.

### Otras unidades homologables a la Formación Lonco Trapial en la zona Extraandina central de la provincia del Chubut

Si bien la mayoría de las rocas de la Formación Lonco Trapial son de edad jurásica temprana, también se incluyen dentro de este volcanismo a manifestaciones menores de edad jurásica media. Estas manifestaciones están cons-



tituidas, por un lado, por el enjambre de diques andesíticos en la sierra de Mamil Choique, dados en c. 172 - 168 Ma (edades K/Ar en roca total, López de Luchi y Rapalini 1997, 2002; Fig. 1) y también por las Andesitas Alvar, aflorantes cerca de la localidad de Paso del Sapo (edad K-Ar en plagioclasa de  $161,4 \pm 7,3$  Ma, Aragón *et al.* 2000; Fig. 1).

### Relación estratigráfica entre las rocas ácidas y mesosilíceas

La asociación volcánica del centro de la provincia del Chubut está formada predominantemente por andesitas, mientras que hacia el norte, en la provincia de Río Negro, predominan las riolitas, donde fueron mapeadas como Formación Garamilla por González *et al.* (1999) (Fig. 1). La separación entre riolitas y andesitas viene de considerar a las ignimbritas de la Formación Garamilla como pertenecientes al Triásico Tardío, de acuerdo con su similitud litológica con las sucesiones que portan flora de *Dicroidium* (Coira 1979). Sin embargo, las dataciones más recientes de las rocas ácidas de la zona central de las provincias de Río Negro y Chubut han arrojado edades Jurásico Temprano, como las ignimbritas riolíticas con fuerte textura eutaxítica datadas mediante U-Pb SHRIMP en circón en c. 188 Ma por Franzese *et al.* (2002) en la zona ubicada entre Gastre e Ingeniero Jacobacci (Fig. 1), y la edad jurásica temprana de las ignimbritas riolíticas en el área del Depósito Epitermal Navidad, ubicado cerca de Gastre (edad *plateau*  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  en sanidina de  $182,8 \pm 0,8$  Ma, Márquez *et al.* 2016). Una datación más reciente U-Pb en circón de  $177,26 \pm 0,96$  Ma de un dique riolítico del área del Distrito Minero Los Manantiales (Lagorio *et al.* 2018; Zaffarana *et al.* 2020), también cercano a la localidad de Gastre, refuerza la hipótesis de la existencia de un volcanismo coetáneo andesítico - riolítico en la zona central del norte de Patagonia para el Jurásico Temprano. Estratigráficamente, en la zona de Ingeniero Jacobacci, las rocas ácidas pueden encontrarse tanto por debajo como por encima de las rocas mesosilíceas, y las ignimbritas riolíticas frecuentemente tienen litoclastos de composición más máfica, típicamente andesítica o basandesítica. En la zona de Gastre, en cambio, las rocas volcánicas ácidas generalmente yacen por encima de las rocas mesosilíceas, y, en consecuencia, fragmentos de andesitas pueden observarse en ignimbritas dacíticas a riolíticas (Fig.

2g). De la misma forma, diques riolíticos y domos intruyen brechas y lavas andesíticas. Es necesario señalar que si bien en la zona se observan domos riolíticos asignados al Jurásico temprano, existen también mas antiguos del Triásico medio (Lagorio *et al.* este volumen). Más al sur, en la zona comprendida entre Las Plumas y Paso de Indios (Fig. 1), afloran rocas ácidas y mesosilíceas interestratificadas (Sacomani *et al.* 2007).

### Correlación dentro del ámbito de la cuenca Neuquina

Hacia el norte, en el ámbito de la Cuenca Neuquina (Fig. 1), los depósitos volcánicos de las formaciones Lonco Trapial y Garamilla se podrían correlacionar con los depósitos del Ciclo Precuyano (Gulisano *et al.* 1984). Este ciclo está compuesto por las formaciones Sañicó, Piedra del Águila y Lapa (Franzese *et al.* 2006, D'Elía *et al.* 2012, 2015). La Formación Piedra del Águila tendría una edad U-Pb en circón de c. 191 Ma (Spalletti *et al.* 2010). En el borde sur de la cuenca Neuquina, Benedini y Gregori (2013) obtuvieron una edad U-Pb en circón de c. 187 Ma para rocas volcánicas que denominaron Formación Garamilla (Fig. 1). Asimismo, dentro del relleno de la cuenca Neuquina, hay andesitas jurásicas con edades U-Pb en circón de c. 199 Ma (Schiuma y Llambías 2008). Los depósitos del Ciclo Precuyano continúan en el norte de la cuenca Neuquina, a las latitudes de 38-39° S (formaciones Milla Michicó, Cordillera del Viento y Nacientes del Biobío, De la Cruz y Suárez 1997, Llambías *et al.* 2007). También, en el norte de la Cordillera del Viento, una secuencia sedimentaria asignada a la Formación Colomichicó está compuesta de rocas volcánicas ácidas y mesosilíceas que dieron una edad U-Pb SHRIMP en circones de c. 188-191 Ma, lo cual permite asignarlas al Ciclo Precuyano (Zappettini *et al.* 2011, 2018).

### Volcanitas mesozoicas en la región Extraandina oriental de la provincia del Chubut

En la región oriental del Chubut afloran volcanitas mesozoicas predominantemente ácidas conocidas como Formación Marifil (Malvicini y Llambías 1974) o Complejo Marifil (Cortés 1981). En el Complejo Marifil, Cortés (1981) describe lavas, rocas piroclásticas y subvolcánicas



y rocas sedimentarias. Por su parte, el Complejo Volcánico Marifil (Giacosa 1997) está compuesto por espesas (25-100 m de espesor) secuencias ignimbríticas subhorizontales fuertemente soldadas de color rosado a rojizo, así como por lavas riolíticas. Se observan también tobas, lapilli y aglomerados volcánicos interestratificados con las ignimbríticas, y la secuencia está intruida por diques dacíticos y andesíticos comagmáticos con las ignimbríticas (Rapela y Pankhurst 1993). Las edades Rb-Sr en roca total ubican al Complejo Volcánico Marifil dentro del Jurásico Temprano ( $182,6 \pm 1,5$  a  $178,4 \pm 1,3$  Ma, Rapela y Pankhurst 1993). Otras isocronas Rb-Sr hechas por Pankhurst y Rapela (1995) dieron  $187,7 \pm 1,3$  Ma y  $181,2 \pm 2,2$  Ma. Por otra parte, las edades  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  en sanidina, biotita y plagioclasa determinadas por Alric *et al.* (1996) están comprendidas entre c. 187 y c. 176 Ma (las rocas datadas correspondían a riolitas, andesitas y basaltos). Además, en la zona de Las Plumas, Alric *et al.* (1996) reportaron una edad de  $176,9 \pm 1,6$  Ma para un basalto y de  $178,5 \pm 1,2$  Ma para unas tobas blanquecinas, también demostrando la consanguinidad de las rocas básicas y ácidas dentro de este magmatismo de intraplaca. Se han reconocido algunos cuerpos hipabisales de composición predominantemente riolítica asociados al Complejo Volcánico Marifil, como la Formación Aguada del Bagual en el ámbito de la provincia del Chubut (Cortés 1981), el Granito Flores (edad Rb-Sr de c. 188 Ma, Pankhurst *et al.* 1993) y la Granodiorita El Sótano (edad U-Pb convencional en circón de c. 186 Ma, Sato *et al.* 2004).

En área de Arroyo Verde, en la provincia del Chubut, Pavón Pivetta *et al.* (2019) señalaron que en sus etapas iniciales el volcanismo del Complejo Volcánico Marifil sería más afín a magmas de subducción. Este episodio volcánico estaría señalado por una edad U-Pb en circón de  $192,6 \pm 2,5$  Ma y fue denominado como VO por dichos autores. En cambio, las etapas posteriores del magmatismo en este sector habrían evolucionado hacia secuencias de intraplaca. La edad Jurásica temprana de este episodio VO también se ratifica por la edad U-Pb de  $193,4 \pm 3,1$  Ma obtenida por Strazzere *et al.* (2018) para lavas traquíticas del Complejo Volcánico Marifil en la región de Aguada Cecilio, y por la edad de  $190,6 \pm 3,2$  Ma obtenida por Strazzere *et al.* (2017) en la sierra de Paileman para un cuerpo subvolcánico de composición riolítica.

## Magmatismo mesozoico en las regiones Preandina y Andina de las provincias del Chubut y Río Negro

En la región Preandina del sudoeste de la provincia de Río Negro y del noroeste de la provincia del Chubut se observa la intrusión de cuerpos graníticos epizonales que fueron asignados por Gordon y Ort (1993) al Batolito Patagónico Subcordillerano. Más tarde, estos plutones fueron denominados Faja Plutónica Subcordillerana por Haller *et al.* (1999) y Batolito Subcordillerano por Rapela *et al.* (2005) (Fig. 1). Se trata de una faja discontinua de rocas ígneas asignadas al Jurásico Temprano, así como de sedimentitas de la misma edad que forman parte del relleno sedimentario de la cuenca del Chubut (Suárez y Márquez 2007). Las sedimentitas están constituidas por pelitas negras liásicas de ambiente marino, areniscas cuarzosas y calizas con intercalaciones volcanoclásticas (Lizuaín 1999 y referencias allí señaladas, Fig. 1). Las rocas ígneas son granitos y granodioritas con biotita y hornblenda, monzodioritas cuarzosas, monzogranitos biotíticos, con menor participación de dioritas y de leucogranitos (Spikermann *et al.* 1988, 1989, Gordon y Ort 1993, Busteros *et al.* 1993, Haller *et al.* 1999). También se reconocieron afloramientos de rocas máficas y ultramáficas asociadas, como noritas subcalinas y gabros olivínicos, que son muy conspicuos en las sierras de Tepuel y Tecka en la parte sur de la faja de rocas plutónicas (Page y Page 1999, Fig. 1). En la parte norte de la faja, los plutones del Batolito Subcordillerano intruyen a las rocas metamórficas y granitos de edad paleozoica, mientras que en la parte sur su roca de caja está constituida por las sedimentitas carboníferas del Grupo Tepuel (Suero 1948) o por las sedimentitas liásicas de la Cuenca del Chubut (formaciones Lepá y Osta Arena, Herbst 1966, Roller 1970). Para los plutones del Batolito Subcordillerano que afloran en la región del Alto Río Chubut (al sur de San Carlos de Bariloche, Fig. 1), Gordon y Ort (1993) obtuvieron dos isocronas Rb-Sr en roca total de  $200 \pm 24$  Ma para la Granodiorita Arroyo La Tuerta y de  $183 \pm 13$  Ma para el Granito La Angostura. Esta última isócrona Rb-Sr luego fue confirmada por la edad U-Pb SHRIMP en circones de  $181 \pm 2$  Ma obtenida por Rapela *et al.* (2005). Para la zona de Leleque (al norte de la localidad de El Maitén en la Fig. 1), una edad K-Ar en roca total de  $141 \pm 5$  Ma fue obtenida por Lizuaín (1983), y edades K-Ar de  $177 \pm 5$  Ma y



de  $173 \pm 10$  Ma fueron obtenidas en dioritas y tonalitas en la margen norte del Lago Puelo cerca de la región de Leleque (Fig. 1, Lizuaín 1981). Para esta zona Rapela *et al.* (2005) obtuvieron una edad U-Pb SHRIMP en circones de  $181 \pm 3$  Ma que ubica a las granodioritas con hornblenda y biotita, la litología dominante de la zona de Leleque, en el Jurásico Temprano. En la región de Aleusco (al noreste de la localidad de Tecka, Fig. 1), en la Precordillera del Chubut, se reportaron edades K-Ar de  $180 \pm 10$  Ma (Spikermann *et al.* 1988), mientras que edades de  $177 \pm 6$  Ma,  $179 \pm 7$  Ma y  $184 \pm 6$  Ma fueron reportadas por Haller *et al.* (1999) y una edad U-Pb SHRIMP en circón de  $185 \pm 2$  Ma fue obtenida para las granodioritas con hornblenda y biotita, la facies dominante en la región de Aleusco por Rapela *et al.* (2005). En la localidad de José de San Martín (Fig. 1), Linares (1977) obtuvo una edad K-Ar de  $197 \pm 10$  Ma para el stock de José de San Martín, y más tarde Franchi y Page (1980) obtuvieron una edad K-Ar en roca total de  $207 \pm 10$  Ma y una edad U-Pb SHRIMP en circón de  $182 \pm 2$  Ma fue obtenida por Rapela *et al.* (2005) para una monzodiorita cuarzosa con hornblenda y biotita. Con respecto a las rocas máficas y ultramáficas jurásicas de la faja subcordillerana, una edad  $^{40}\text{Ar}-^{36}\text{Ar}$  de  $182,7 \pm 1$  Ma fue reportada para un gabro de la zona de Tecka (datos no publicados de Féraud *et al.* mencionados por Page y Page 1999). Los gabros fueron incluidos en las formaciones Cresta de los Bosques y Tecka (Freytes 1971, Franchi y Page 1980, Turner 1983, Fig. 1).

Además, más hacia al oeste, ya en el dominio de la zona Andina, aflora el Gabro Muzzio en la margen sur del Lago Fontana, datado en  $191 \pm 3$  Ma por Rolando *et al.* (2002) (al oeste de la localidad de Alto Río Senguerr en la Fig. 1). El Batolito Subcordillerano está compuesto por rocas calcoalcalinas de tipo I asociadas a subducción (Gordon y Ort 1993, Haller *et al.* 1999, Rapela *et al.* 2005), por lo que representa las raíces del arco magmático del proto-margen de Gondwana durante el Jurásico Temprano. Los basaltos de la Formación Icalma del Grupo Nacientes del Biobío, en Chile, representan la correlación hacia el norte-noroeste de ese arco magmático Jurásico Temprano (De la Cruz y Suárez 1997, Suárez y Emparan 1995, Suárez y Márquez 2007).

Parte de este arco magmático está representado, también, por las capas piroclásticas con intercalaciones de flujos lávicos y de sedimenti-

tas que constituyen la Formación Piltriquitrón, que aflora cerca de las localidades de Esquel y El Bolsón y que también forma parte de la cuenca del Chubut (Fig. 1; Lizuaín 1980, 1999, Suárez y Márquez 2007). En particular, en la región comprendida entre San Martín de los Andes y El Bolsón, la Formación Piltriquitrón está compuesta por andesitas, dacitas y riolitas (Fig. 1; Zaffarana *et al.* 2020). En las andesitas se observan fenocristales de anfíboles y plagioclasas, donde estas últimas tienen textura cribada y están alteradas a sericita y arcillas. Los minerales máficos (anfíboles y biotitas) están alterados a minerales opacos, carbonato, epidoto y cloritas. Todas las fases minerales están alteradas en grado variable a una asociación propilitica (Zaffarana *et al.* 2020).

Las capas superiores de la Formación Piltriquitrón se correlacionan, hacia el oeste, con la Formación Lago La Plata, cuyo rango de edad se expande desde el Jurásico Temprano y hasta el Jurásico Medio en la región comprendida entre los paralelos  $42^\circ - 43^\circ$  de latitud sur (c. 171 Ma, K-Ar, Haller y Lapido 1982; c. 152 Ma, K-Ar, Lizuaín 1983; c. 160 Ma, K-Ar, Linares y González 1990; c. 180 Ma, Rb-Sr, Ghiara *et al.* 1999 y c. 170 Ma, U-Pb, Blesa 2004; Fig. 1). La Formación Lago La Plata está compuesta por una asociación volcánica bimodal de dacitas y de ignimbritas riolíticas, tobas ricas en líticos, depósitos de caída de cenizas, brechas, domos y tobas ácidas, y, en menor cuantía, lavas basálticas y andesíticas e intercalaciones sedimentarias (Haller y Lapido 1982, Niemeyer y Skarmeta 1984, Bruce *et al.* 1991, Suárez *et al.* 2009, Echaurren *et al.* 2017). La Formación Lago La Plata se depositó en un ambiente geotectónico de arco en condiciones sinextensionales (Echaurren *et al.* 2017). Geográficamente, las rocas volcánicas de esta formación cubren un área que va desde Esquel en el norte hasta Alto Río Senguerr hacia el sur, dentro de la región Andina (Fig. 1). El rango de edades de la Formación Lago La Plata, que va desde 180 hasta 152 Ma, permitirían correlacionarla con las rocas más antiguas del Batolito Patagónico, que se encuentran cerca de la localidad de San Carlos de Bariloche ( $41^\circ$  S, c. 170 Ma, U-Pb SHRIMP en circón, Castro *et al.* 2011a), así como con las rocas más jóvenes del Batolito Subcordillerano y de las formaciones Lonco Trapial y Garamilla en las zonas Preandina y Extraandina (Fig. 1).

La Formación Lago La Plata en el cordón de Esquel está compuesta por lavas andesíticas



con textura porfírica con fenocristales de plagioclasa (60%), clinopiroxeno (15%), anfíbol (10%), olivina (5%), minerales opacos (5%) y un 5% compartido entre biotita y apatita (Zaffarana *et al.* 2020). Los fenocristales están inmersos en una pasta de textura pilotáxica a traquítica. La plagioclasa es euhedral a subhedral, tiene textura cribada y zonación composicional. Los clinopiroxenos son subhedrales a euhedrales, tienen zonación composicional y un débil pleocroísmo. El anfíbol está casi totalmente reemplazado por cloritas. La olivina está presente como inclusión en la plagioclasa y en el clinopiroxeno.

Los minerales opacos son euhedrales. Los cristales de biotita son muy escasos, subhedrales y pleocroicos de castaño claro a castaño oscuro. La pasta está alterada a una paragénesis propilítica constituida por carbonatos, cloritas y arcillas. Las texturas amigdaloides son comunes, donde las amígdalas están rellenas con cuarzo y cloritas.

## COMPOSICIÓN QUÍMICA

Las formaciones Lonco Trapial y Garamilla tienen una composición química muy similar, dado que ambas definen una serie calcoalcalina de gran amplitud composicional que va de andesitas basálticas a riolitas (rango de sílice comprendido entre 50 y 81% en base anhidra) que quedan comprendidas dentro de la serie subalcalina y con un contenido de potasio mediano a alto (las muestras de andesitas basálticas pertenecen solamente a la Formación Lonco Trapial según las muestras analizadas por Zaffarana *et al.* 2020; Fig. 3a-b). De todas maneras, la distinción entre las dos formaciones es básicamente geográfica, ya que se sigue el criterio de González *et al.* (1999) que fuera detallado más arriba: en la región en la que predominan las riolitas, lo que sucede básicamente en el ámbito de la provincia de Río Negro, las rocas están mapeadas como Formación Garamilla, mientras que cuando predominan las andesitas, lo cual es más frecuente en el dominio de la provincia del Chubut, las rocas se mapearon como Formación Lonco Trapial.

En el diagrama de Winchester y Floyd (1977) (Fig. 3c) se puede observar que la Formación Lonco Trapial está compuesta por andesitas/riodacitas, dacitas y traquiandesitas muy subordinadas. En ese diagrama se grafican tanto las composiciones riolíticas ( $\text{SiO}_2 > 70\%$  en base anhidra) como las ácidas a mesosilícicas ( $\text{SiO}_2 < 70\%$  en base anhidra). Allí se observa que las rocas de la Formación Lonco Trapial tienen menor contenido de circonio que las volcanitas de la provincia de Río Negro que fueron asignadas a la Formación Garamilla y al Complejo Volcánico Marifil, cuyas altas relaciones  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  permite clasificar a algunas de sus rocas como riolitas peralcalinas (comenditas/panteleritas; Fig. 3c). También se incluyen en ese diagrama las rocas de la región Preandina y Andina, observándose que las muestras de las formaciones Piltriquitrón y Lago La Plata tienen menor relación  $\text{Nb}/\text{Y}$  que las rocas de la

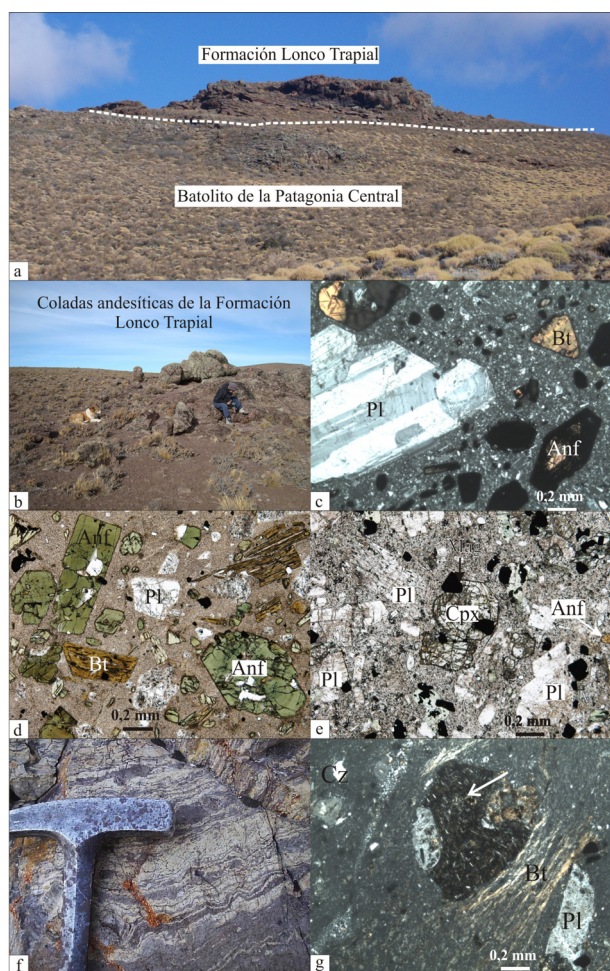


Fig. 2. Afloramientos y petrografía de la Formación Lonco Trapial en el ámbito de la provincia de Chubut. a) Vista del contacto erosivo entre las lavas andesíticas de la Formación Lonco Trapial (arriba) y los granitos del Batolito de la Patagonia Central (Rapela *et al.* 1991; 1992; Zaffarana *et al.* 2014; 2017) en el área de Gastre. b) Detalle de las lavas andesíticas de la Formación Lonco Trapial en la sierra homónima en el norte de la provincia de Chubut cerca del límite con la provincia de Río Negro (latitud 42,04° S, longitud 69,15° O). c) y d) Secciones delgadas de lavas andesíticas con anfíbol como mineral máfico predominante. Fotografías tomadas con nicoles cruzados. e) Fotomicrografía con nicoles paralelos de una lava andesítica con clinopiroxeno como mineral máfico predominante. f) Ignimbrita riolítica con fuerte soldamiento. g) Corte delgado (fotografía con nicoles cruzados) de una ignimbrita riolítica con litoclastos de rocas máficas (flecha blanca) y cristaloclastos de cuarzo, biotita y plagioclasa. Cz: cuarzo, Pl: plagioclasa, Mag: magnetita, Anf: anfíbol, Cpx: clinopiroxeno, Bt: biotita.





zona Extraandina, denotando un carácter subalcalino más marcado.

Las rocas mesosilícicas de la Formación Lonco Trapial (entre 57 y 63% de sílice) están moderadamente enriquecidas en tierras raras livianas, exhiben un fraccionamiento moderado de las tierras raras pesadas y tienen una anomalía negativa de europio ausente o poco marcada ( $[La/Sm]_N=2,21-4,61$ ;  $[Gd/Yb]_N=1,40-3,06$ ;  $Eu/Eu^*=0,81-1,08$ ; Fig. 4a). En el diagrama multielemental normalizado al manto primitivo, las rocas de la formación Lonco Trapial tienen picos negativos en Nb y Ta (Fig. 4b). Se observa que las rocas más antiguas de la unidad (andesita G3-134 que tiene una edad de ~192 Ma; Zaffarana *et al.* 2018) están menos enriquecidas en tierras raras y en elementos incompatibles que las rocas más jóvenes de la unidad (muestra G2-63, de ~178 Ma; Zaffarana *et al.* 2018; Fig. 4a, b).

Las rocas ácidas de la Formación Lonco Trapial (contenido de sílice mayor al 70%) presentan mayor enriquecimiento en tierras raras livianas que las rocas mesosilícicas de la misma unidad, y prácticamente no presentan fraccionamiento de las tierras raras pesadas ( $[La/Sm]_N=3,26-6,51$ ;  $[Gd/Yb]_N=1,27-1,96$ ; Fig. 4c). La anomalía negativa de Eu está presente ( $Eu/Eu^*=0,4-0,9$ ; Fig. 4c). Las rocas ácidas de esta unidad carecen, por lo general, de picos negativos de Ba y de Sr, y presentan anomalías negativas de Ti y de P (no todas las rocas, Fig. 4d)

Las rocas mesosilícicas (entre 57 y 63% de sílice) de la Formación Garamilla y del Complejo Volcánico Marifil tienen un enriquecimiento moderado en tierras raras livianas, bajo fraccionamiento de las tierras raras pesadas y casi no presentan anomalía negativa de Eu ( $[La/Sm]_N=2,71-4,09$ ,  $[Gd/Yb]_N=1,92-3,82$ ;  $Eu/Eu^*=0,8-0,97$ ; Fig. 4e). Asimismo, las rocas mesosilícicas de esas formaciones muestran anomalías negativas de Nb y Ta y picos positivos de Zr y P (sobre todo el Complejo Volcánico Marifil, Fig. 4f). Las rocas ácidas de estas formaciones están moderadamente enriquecidas en tierras raras livianas, y tienen una pendiente muy baja o plana para las tierras raras pesadas; como rasgo destacable presentan una fuerte anomalía negativa de Eu que contrasta con la anomalía negativa poco marcada que presentan las riolitas de la Formación Lonco Trapial ( $[La/Sm]_N=2,61-6,49$ ,  $[Gd/Yb]_N=0,43-2,55$ ;  $Eu/Eu^*=0,08-0,77$ ; Fig. 4g). Un rasgo para destacar es que las riolitas de la Formación Garamilla

y del Complejo Volcánico Marifil tienen anomalías negativas de Ba y de Sr, además de presentar anomalías negativas de Ti y de P (Fig. 4h).

Las rocas mesosilícicas (sílice entre 57 y 63%) de la región Andina y Preandina correspondientes a las formaciones Piltriquitrón y Lago La Plata y al Batolito Subcordillerano presentan enriquecimiento moderado en tierras raras livianas, pendientes chatas en las tierras raras pesadas y anomalías negativas de Eu poco marcadas ( $[La/Sm]_N=1,72-3,26$ ;  $[Gd/Yb]_N=1,15-1,96$  y  $Eu/Eu^*=0,77-1,01$ ; Fig. 4i). Las rocas mesosilícicas de las unidades del dominio occidental presentan picos negativos en Nb y Ta y enriquecimientos K, Cs, Rb y Ba (Fig. 4j). Las rocas ácidas (contenido de sílice mayor al 70%) de las formaciones Piltriquitrón y Lago La Plata así como del Batolito Subcordillerano son generalmente similares a las riolitas de la Formación Lonco Trapial, ya que presentan enriquecimientos moderados de tierras raras livianas, pendientes muy bajas o planas para las tierras raras pesadas y anomalías negativas de Eu poco marcadas ( $[La/Sm]_N=2,29-5,27$ ;  $[Gd/Yb]_N=1,09-1,20$  y  $Eu/Eu^*=0,83-0,96$ ; Fig. 4k); tienen picos negativos en Sr y en Ba pero poco marcados, y presentan anomalías negativas de Ti y de P (Fig. 4l).

Las relaciones La/Ta generalmente mayores a 25 de las formaciones Lonco Trapial y Garamilla y del Complejo Volcánico Marifil las ubican en el campo de las rocas de arco, pero también se observan en la Formación Lonco Trapial muestras con cocientes La/Ta menores a 20 (Fig. 3d). Las unidades de la faja occidental Andina y Preandina también presentan relaciones La/Ta generalmente mayores a 25, por lo que están comprendidas dentro del campo de los magmas de arco (Fig. 3d).

En el diagrama que grafica la relación Ce/Pb versus Nb/Yb se observa que, a pesar de la dispersión presente en los datos de la Formación Lonco Trapial, la misma tiene valores de Nb/Yb generalmente mayores que las rocas de la faja occidental Andina y Preandina conformada por las formaciones Lago La Plata y Piltriquitrón y por el Batolito Subcordillerano (Fig. 3e). En este diagrama se observa que las rocas de la faja occidental tienen características de subducción más marcadas que las rocas de la faja Extraandina central.

En el diagrama que muestra la relación Ba/La versus la relación Th/La, se observa que las formaciones Lonco Trapial y Garamilla y el Com-



plejo Volcánico Marifil tienen relaciones Ba/La muy variables, y relaciones Th/La menos variables, entre moderadas a bajas (Fig. 3f). Las altas relaciones Ba/La las ubica en el campo de los magmas modificados por fluidos provenientes de la losa subductada (Fig. 3f). Las rocas de la faja occidental Andina y Preandina tienen en general menor relación Ba/La y una relación Th/La un poco mayor (Fig. 3f).

### IMPRONTA GEOQUÍMICA DE LA FORMACIÓN LONCO TRAPIAL

Los patrones de elementos traza presentados en la Fig. 3d-f muestran que la Formación Lonco Trapial es calcoalcalina pero también aparecen algunos rasgos asociados a magmas de intraplaca. Lo mismo se puede aseverar a partir de los estudios de química mineral realizados en los anfíboles y clinopiroxenos de esta formación (Zaffarana *et al.* 2018). Por otra parte, las características de arco dentro de la Formación Lonco Trapial serían más fuertes a medida que la sucesión volcánica se hace más joven, si se tiene en cuenta lo graficado en las Fig. 4a-b. Todas las secuencias del Jurásico Temprano a Medio del norte de Patagonia presentan características mixtas entre subducción e intraplaca (Fig. 3c-f).

### RELACIÓN ENTRE LAS ANDESITAS Y LAS RIOLITAS

Las unidades del Jurásico Temprano a Medio del sector central y oriental de la provincia de Chubut están compuestas por andesitas y por riolitas, las cuales son coetáneas y están prácticamente interdigitadas. Los datos geocronológicos señalados precedentemente señalan esta sincronidad entre rocas mesosilícicas y félsicas, como por ejemplo la edad de  $177,26 \pm 0,96$  Ma del dique riolítico asignado a la Formación Lonco Trapial (Lagorio *et al.* 2018, Zaffarana *et al.* 2020).

Con respecto al origen de las riolitas por cristalización fraccionada, en las secuencias de rocas estudiadas se observa que el fraccionamiento de diferentes minerales habría influido en su evolución petrogenética. Por ejemplo, en las rocas mesosilícicas de todas las unidades se observa que el fraccionamiento de anfíbol fue tanto o más importante que el fraccionamiento

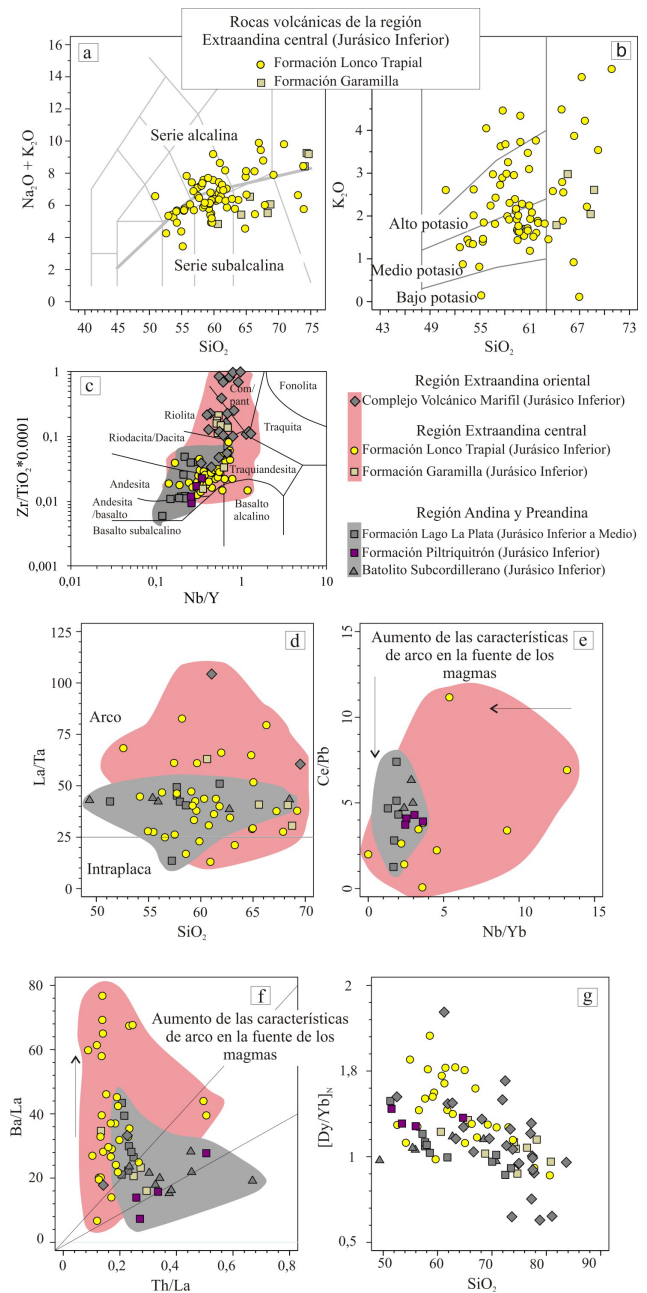


Fig. 3. Geoquímica de elementos mayoritarios y traza de las formaciones jurásicas del norte de Patagonia. a) Clasificación TAS, base anhidra, la línea que separa los campos de rocas alcalinas y subalcalinas es de Irvine y Baragar (1971). b) Diagrama potasio-silíce en base anhidra con campos definidos por Peccerillo y Taylor (1976). Las rocas de la faja volcánica Extraandina pertenecen al campo de potasio medio a alto. c) Diagrama de Winchester y Floyd (1977) utilizado para clasificar rocas volcánicas alteradas. d) Diagrama La/Ta versus sílice. e) Diagrama Ce/Pb versus Nb/Yb. f) Diagrama Ba/La versus Th/La. g) Diagrama  $[Dy/Yb]_N$  versus sílice. Se compilan análisis de la Formación Lonco Trapial (datos compilados de Dejonghe *et al.* 2002 y de Zaffarana *et al.* 2018; 2020, Pavón Pivetta *et al.* 2019) y Garamilla (datos compilados de Zaffarana *et al.* 2020), de la Formación Lago La Plata (Echaurren *et al.* 2017, Zaffarana *et al.* 2020), Piltriquitrón (Zaffarana *et al.* 2020), Complejo Volcánico Marifil (Pankhurst y Rapela 1995, Márquez *et al.* 2010; 2011, Navarrete *et al.* 2019), Batolito Subcordillerano (Haller *et al.* 1999, Rapela *et al.* 2005). Com/Pant: comendita/pantelerita (riolitas peralcalinas).

de plagioclasa. La depresión en las tierras raras intermedias (Fig. 4a, e, i), y la pendiente negativa en el diagrama  $[Dy/Yb]_N$  vs. sílice (Fig. 3g)

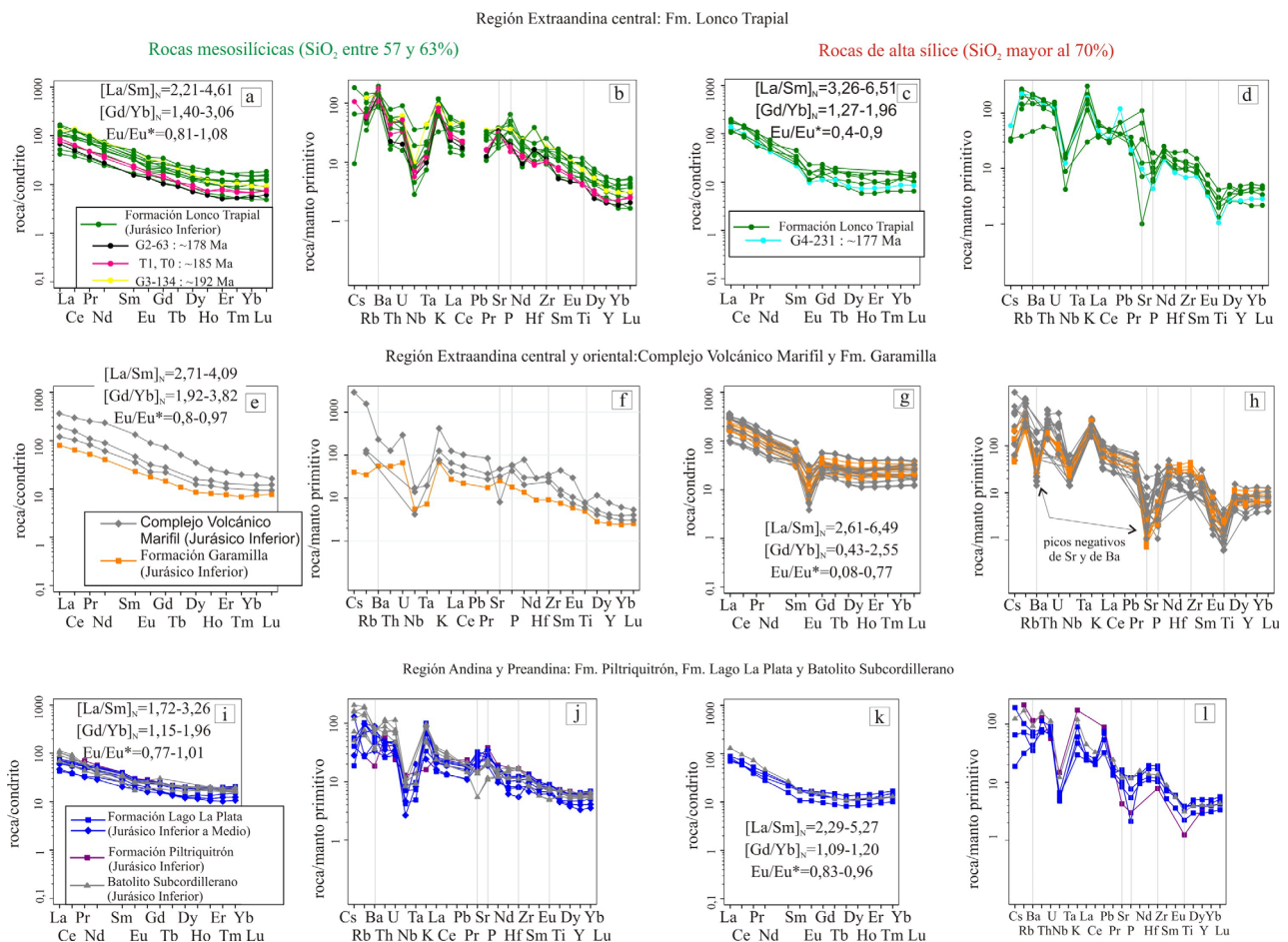


Fig. 4. Geoquímica de elementos traza de las rocas ígneas mesozoicas de la provincia de Chubut (y sur de la provincia de Río Negro). Se compilan análisis citados en el epígrafe de la Fig. anterior. Normalización al condrito de McDonough y Sun (1995) y normalización al manto primitivo de Sun y McDonough (1989). En la Formación Lago La Plata representada en las figuras i-l, los cuadrados corresponden a los datos de Zaffarana *et al.* 2020 y los diamantes a los datos de Echaurren *et al.* (2017).

apoyan el fraccionamiento de anfíbol, mientras que, por otro lado, la falta de anomalías negativas de Eu, Sr y Ba (Fig. 4b, f, j) no reflejan fraccionamiento de plagioclasa como parte del proceso evolutivo dominante de las rocas mesosilíceas. En los fundidos andesíticos ricos en agua la cristalización de plagioclasa se retrasa por lo menos 100° C (Sisson y Gove 1993, Molina *et al.* 2009). En cambio, respecto a las rocas ácidas, las riolitas del Complejo Volcánico Marifil y de la Formación Garamilla y en menor medida de la Formación Lonco Trapial, exhiben anomalías negativas de Eu más pronunciadas, así como picos negativos de Sr y de Ba compatibles con el fraccionamiento de feldespatos (Fig. 4c, d, g, h). También para las rocas ácidas se habría registrado fraccionamiento de apatita, titanita y circón, sobre la base de las anomalías negativas de P y Ti (Fig. 4c, d, g, h).

Es interesante mencionar que para las riolitas formadas por cristalización fraccionada, dos tipos de evoluciones petrogenéticas distintas han

sido descriptas en la literatura. Por un lado, existen riolitas típicas de zonas de subducción, que son del tipo «cold-wet-oxidized», o sea que cristalizan a partir de magmas ricos en agua, en condiciones oxidantes y a temperaturas relativamente bajas, mientras que por el otro las riolitas típicas de ambientes tectónicos de intraplaca cristalizan en condiciones reductoras, pobres en agua y a mayor temperatura («hot-dry-reduced»; Christiansen 2005, Christiansen y McCurry 2008, Bachmann y Bergantz 2008). En las riolitas de zonas de subducción, el alto contenido de agua de los magmas inhibe o retrasa la cristalización de plagioclasa y determina que la evolución magmática esté dominada por la cristalización de anfíbol y titanita. En general, este tipo de riolitas tienen un patrón de tierras raras carente de anomalías negativas de Eu significativas, y deprimido en tierras raras intermedias y pesadas, como el que presentan las rocas con más del 70% de sílice de la Formación Lonco Trapial, de la Formación Lago La Plata y del



Batolito Subcordillerano (Fig. 4c, k). En cambio, el bajo contenido de agua de las riolitas de zonas de intraplaca produce una evolución controlada por la cristalización de plagioclasa, generando un patrón de tierras raras de tipo gaviota o «seagull» (Glazner *et al.* 2008), el cual tiene anomalías negativas de Eu muy marcadas y alto enriquecimiento en tierras raras livianas y alto contenido de tierras raras pesadas, como el presente en las riolitas del Complejo Volcánico Marifil y de la Formación Garamilla (Fig. 4g).

Hasta aquí se han analizado los notorios efectos del fraccionamiento de algunos minerales sobre la evolución petrogenética de los magmas jurásicos del norte de Patagonia. Sin embargo, si bien la cristalización fraccionada habría afectado la evolución de las suites de rocas estudiadas, también se analiza el posible efecto de contaminación cortical en el origen de las riolitas. En el caso particular de la Formación Lonco Trapial, se ha explorado su evolución petrogenética a través de modelos de cristalización fraccionada que utilizan balances de masas (Zaffarana *et al.* 2020). Los resultados indican que no es posible producir una dacita a partir de una andesita a través de cristalización fraccionada sin invocar también contaminación cortical, ya que cerraría razonablemente bien el balance de masas de elementos mayoritarios, pero no se podrían ajustar los elementos traza. Mucho menos posible es formar una riolita a partir de una dacita por cristalización fraccionada pura, ya que ni siquiera se puede lograr el ajuste del balance de masas de los elementos mayoritarios. Los resultados de ese modelado sugieren que la evolución petrogenética de la Formación Lonco Trapial debe haber estado controlada tanto por cristalización fraccionada como por contaminación cortical. Según determinaciones geotermobarométricas, el espesor cortical máximo en la región de Gastre durante el Jurásico Temprano habría sido de alrededor de 28 km (Zaffarana *et al.* 2018). Este espesor cortical moderado a alto que debieron atravesar los magmas jurásicos justificaría dicho proceso de contaminación cortical tanto para los de las formaciones Lonco Trapial y Garamilla (Zaffarana *et al.* 2018 y Zaffarana *et al.* 2020) como también los del Complejo Volcánico Marifil (Rapela y Pankhurst 1993, Pankhurst y Rapela 1995). El proceso de contaminación cortical se analiza a continuación, cuando se trata la composición isotópica de los magmas jurásicos.

## COMPOSICIÓN ISOTÓPICA Y FUENTE DE LOS MAGMAS JURÁSICOS

Las relaciones isotópicas son muy útiles para precisar la fuente y los procesos petrogenéticos que dieron origen a las rocas del Jurásico Temprano a Medio del norte de la Patagonia. Las andesitas de la Formación Lonco Trapial en la región de Gastre presentan relaciones de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  entre 0,7056 y 0,7064, un  $\epsilon\text{Nd}$  inicial promedio de -3,78 (Fig. 5a) y un  $T_{\text{DM}}$  de 1,3 Ga (Zaffarana *et al.* 2020). Según el gráfico de la Fig. 5a, la composición isotópica de la Formación Lonco Trapial se encuentra dentro del campo de la composición de la corteza inferior. Los TDM obtenidos para la Formación Lonco Trapial cubren un rango que va desde 1,056 hasta 1,458 Ga (promedio 1,3 Ga), lo que sugiere que en el origen de esta faja volcánica central de Patagonia intervino el retrabajo de una corteza continental de edad Mesoproterozoica, como ya fuera señalado por Pankhurst y Rapela (1995) para el Complejo Volcánico Marifil. En el gráfico de la figura 5a se incluyeron también las composiciones isotópicas de xenolitos granulítico-piroxénicos de la corteza inferior pertenecientes a intrusivos alcalinos terciarios de la sierra de Los Chacays obtenidas por Pankhurst y Rapela (1995). Las composiciones isotópicas de las granulitas se solapan con las del Complejo Volcánico Marifil, y también con las de la Formación Lonco Trapial. Según Pankhurst y Rapela (1995), las granulitas piroxénicas representarían la fuente residual de los magmas del Complejo Volcánico Marifil. Más recientemente Castro *et al.* (2011b) presentaron datos de nódulos granulíticos de la localidad de Paso de Indios, también incluidos dentro de basaltos alcalinos terciarios. Sus datos geoquímicos, que incluyen una edad U-Pb en circón de  $176 \pm 5\text{Ma}$ , sugieren que la corteza inferior del norte de la Patagonia habría experimentado un proceso de fusión a altas temperaturas durante el Jurásico temprano. Las composiciones de los xenolitos obtenidas en ambos casos, extremadamente empobrecidas en elementos litófilos, se consideran representativas de la corteza inferior residual luego del evento de fusión.

Pankhurst y Rapela (1995) habían inferido que el fundido en equilibrio con las granulitas habría tenido una composición andesítica, mientras que para Castro *et al.* (2011b), los fundidos parciales obtenidos a partir de las granulitas serían de composición granítica o granodiorítica.



Todos esos argumentos indican que la fusión de una corteza inferior de edad Mesoproterozoica debería ser considerada como una alternativa

importante para la fuente de los magmas del Jurásico temprano a medio de la región Extraandina central y oriental del norte de la Patagonia.

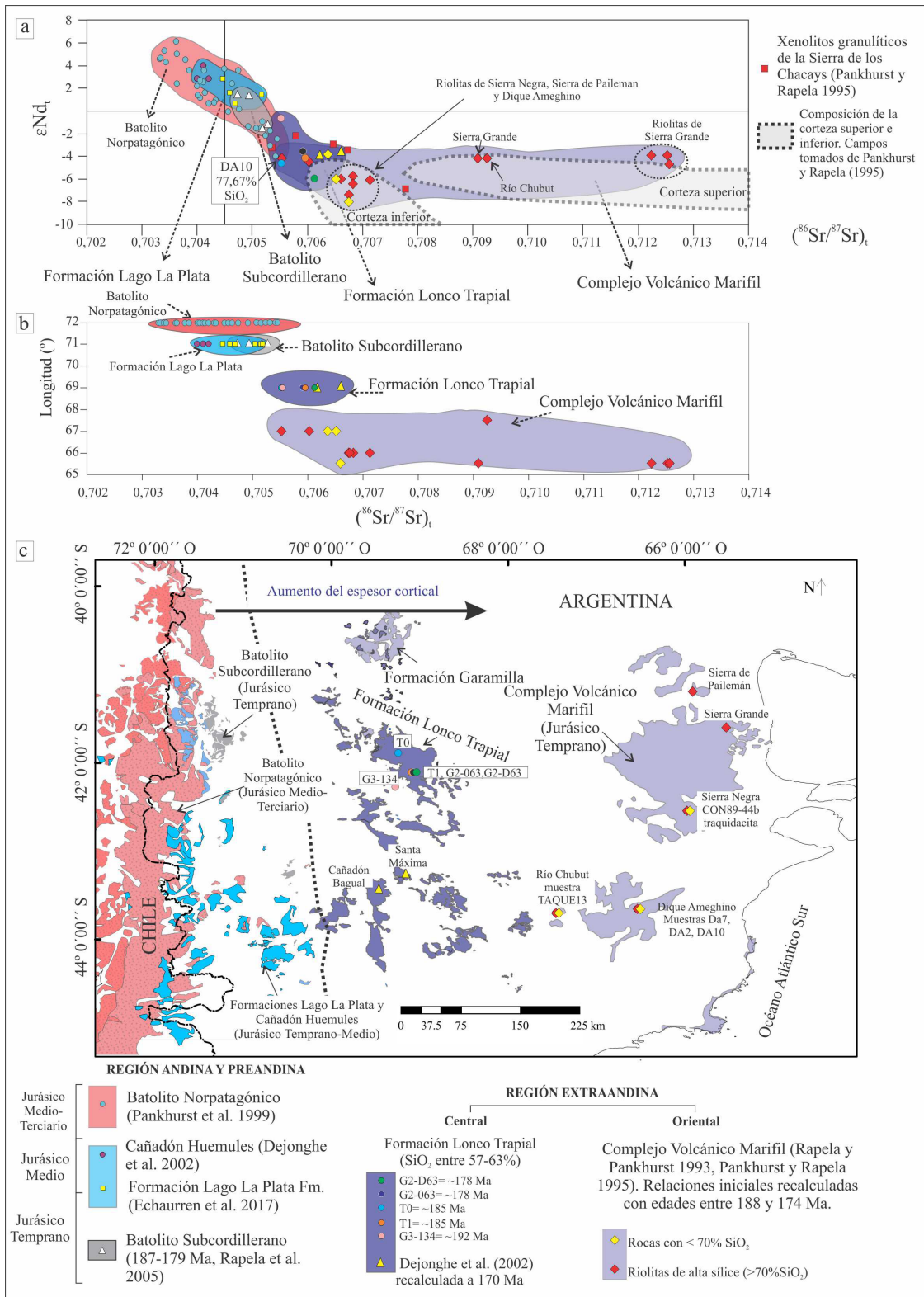


Fig. 5. Geoquímica isotópica de las rocas ígneas jurásicas de las provincias de Río Negro y Chubut. a) Diagrama de isótopos de Sr-Nd b) Relación inicial de Sr versus la longitud c) Mapa de unidades de la zona andina a extraandina respetando los colores utilizados en las figuras a y b. Se incluyeron los afloramientos del Batolito Norpatagónico. La Formación Garamilla y el Complejo Volcánico Marifil tienen el mismo color debido a su comportamiento geoquímico similar. La fuente de los datos proviene de Rapela y Pankhurst (1993) y de Pankhurst y Rapela (1995) para el Complejo Volcánico Marifil, de Dejonghe et al. (2002) y Zaffarana et al. com. pers. para la Formación Lonco Trapial, de Rapela et al. (2005) para el Batolito Subcordillerano, de Dejonghe et al. (2002) y de Echaurren et al. (2017) para la Formación Lago La Plata y la Formación Cañadón Huemules, y de Pankhurst et al. (1999) para el Batolito Norpatagónico.



Las muestras de la Formación Lonco Trapial en el ámbito de la cuenca de Cañadón Asfalto muestreadas por Bouhier *et al.* (2017) son ligeramente más radigénicas que las de la Formación Lonco Trapial en la región de Gastre presentadas por Zaffarana *et al.* (2020). Bouhier *et al.* (2017) también destacaron la participación de la corteza continental en la fuente de los magmas de la Formación Lonco Trapial en el ámbito del Depósito Epitermal Navidad.

De la compilación de datos isotópicos de rocas Jurásicas del norte de la Patagonia que se muestra en la Fig. 5a, se puede observar que las rocas de la faja occidental Andina y Preandina presentan composiciones isotópicas más empobrecidas que las rocas de la región Extraandina. Esta diferencia en la fuente de los magmas mesozoicos ya había sido señalada por Bruce *et al.* (1991) y por Rapela *et al.* (2005), quienes mostraron que tanto el Batolito Subcordillerano como las rocas volcánicas y plutónicas más jóvenes del Cretácico y del Terciario de las zonas Andina y Preandina derivan de fuentes empobrecidas en elementos litófilos. En el gráfico de la Fig. 5b se puede observar que la relación inicial de Sr aumenta de oeste a este, cosa que también se señala en el mapa de la Fig. 5c.

La composición isotópica de las muestras mesosilícicas de la Formación Lonco Trapial, exhiben aumento en los valores de Sr junto a disminución de los de Nd (Fig. 5a), lo cual sería compatibles con asimilación asociada a los procesos de diferenciación, consistente con lo que concluyeron Dejonghe *et al.* (2002), particularmente sobre la base de los isótopos de Pb.

En el gráfico de la Fig. 5b se puede observar que la relación inicial de Sr aumenta de oeste a este, rasgo que también se señala en la Fig. 5a y en la distribución de unidades del mapa de la Fig. 5c. Como se señaló en el ítem anterior, se supone que las rocas del Jurásico Temprano a Medio como las rocas del Batolito Norpatagónico del sector occidental Andino y Preandino se formaron por la subducción hacia el este de la corteza oceánica por debajo del margen occidental de Gondwana. En cambio, las rocas del Jurásico Temprano a Medio del sector Extraandino se habrían formado por procesos extensionales que ocurren detrás del paleoarco magmático, probablemente a partir de una fuente mantélica más profunda en términos de las relaciones geoquímicas Sr/Y y  $[Sm/Yb]_N$  (Zaffarana *et al.* 2020).

## REGIÓN FUENTE DE LOS MAGMAS JURÁSICOS Y SU AMBIENTE TECTÓNICO

Como se dijo anteriormente es importante señalar que existe un control geográfico en la distribución de las rocas, ya que las andesitas se ubican predominantemente en la faja Extraandina central, mientras que las riolitas predominan en la faja Extraandina oriental y en el sector norte de la faja Extraandina central (Fig. 5c).

Las rocas mesosilícicas del sector occidental Andino y Preandino se habrían formado por la subducción hacia el este de la corteza oceánica por debajo del margen occidental de Gondwana. Surge del presente estudio que las rocas de aquellos sectores presentan un carácter calcoalcalino más marcado que las rocas del dominio oriental Extraandino (Complejo Volcánico Marifil y Formación Garamilla). Esto se evidencia en la menor relación Nb/Y y Nb/Yb de las rocas de la zona occidental con respecto a las rocas de la región Extraandina central y oriental (Fig. 3c, e). Además, las riolitas de la zona occidental Andina y Preandina son típicas de zonas de subducción.

Las andesitas y riolitas de la Formación Lonco Trapial, que están en el sector central, presentan características geoquímicas que indican un origen en un ambiente de arco magmático. De todos modos, es importante señalar que si bien los patrones de elementos traza presentados en la Fig. 3d-f muestran que la Formación Lonco Trapial tiene mayormente carácter calcoalcalino, se observan asimismo algunos rasgos asociados a magmas de intraplaca en algunas muestras (relación La/Ta < 20, Fig. 3d; Ta/Hf > 0,15, Zaffarana *et al.* 2018). Lo mismo se puede observar en los estudios de química mineral realizados en los anfíboles y clinopiroxenos de esta formación (Zaffarana *et al.* 2018). Además, cabe señalar que las características relacionadas con subducción en las rocas de la Formación Lonco Trapial serían más marcadas a medida que la sucesión volcánica se hace más joven, si se tiene en cuenta lo graficado en las Fig. 4a-b.

En cuanto a las riolitas, los trabajos que se vienen realizando en las riolitas de la Provincia Volcánica Chon Aike sugieren que las mismas se habrían formado en ambiente de intraplaca por un proceso de fusión cortical (por ej. Pankhurst y Rapela 1995, Seitz *et al.* 2018). El ambiente de intraplaca queda bien caracterizado a través del característico patrón multielemental tipo «gavio-



ta», consistente con condiciones reductoras, pobres en agua y de alta temperatura (Fig. 4h).

En cuanto a la impronta de subducción que registran todos los magmas jurásicos, se considera muy probable, particularmente para aquellos de las zonas Extraandina central y oriental, y por lo tanto alejados del borde de subducción ubicado en el margen occidental de Gondwana durante el Jurásico, atribuir su origen a los episodios de subducción previos. El manto de Patagonia fue metasomatizado luego de la Orogenia Gondwánica (Keidel 1921, Cawood 2005, Cawood y Buchan 2007), y aproximadamente a lo largo del río Chubut, coincidente con los afloramientos de la Formación Lonco Trapial, estaría localizado el margen sudoccidental de Gondwana Occidental con subducción hasta el Carbonífero Tardío (i.e. Varela *et al.* 2005, Pankhurst *et al.* 2006, Vizán *et al.* 2017, Renda *et al.* 2019). Dicha subducción habría afectado el área que actualmente se extiende desde el borde andino hasta el océano Atlántico (véase particularmente la reconstrucción presentada en Renda *et al.* 2019), modificando previamente la fuente mantélica de volcanismo jurásico. Es importante destacar, como comentario final, el origen mixto de la fuente de los magmas de la Formación Lonco Trapial, que involucra fusión tanto del manto como de la corteza inferior. A este proceso de fusión luego se le suma la contaminación con la corteza superior durante el ascenso a la superficie.

Posteriormente los procesos de diferenciación que tuvieron lugar durante el evento volcánico le imprimieron las características propias a cada episodio, y por lo tanto, a las rocas que conforman las distintas unidades. Mientras que los magmas jurásicos de la zona Andina y Preandina presentan las características de arco más claras (reflejan asimismo la subducción jurásica en dicho borde), los de Lonco Trapial exhiben ya algunos rasgos de intraplaca, que se hacen más marcados hacia los magmas del Complejo Volcánico Marifil, cuyas riolitas reflejan magmas pobres en agua y generados a mayor temperatura bajo condiciones reductoras, típicos de los ambientes de intraplaca.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los proyectos PIP CONICET 112-200901-00766, PICT 2014-1394 y por el Proyecto Torandes (CGL 2012-

38396-C03) del Plan de I + D + i Español con fondos de la UE-FEDER. Se agradece especialmente a María Helena Hollanda por su ayuda con algunos análisis geoquímicos en Acmelabs. También se agradece a Alberto Saal y a Gerson Greco por sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito original. Nos gustaría agradecer a los dueños de los campos que nos permitieron estudiar las rocas que allí afloran, así como a los veterinarios de la localidad de General Roca, Río Negro, por compartir sus recursos con nosotros para poder realizar algunos de los muestreos en la región de Ingeniero Jacobacci y alrededores. Este trabajo está dedicado a nuestro querido compañero y mentor Rubén Somoza.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Alric, V.I., Haller, M.J., Feraud, G., Bertrand, H. y Zubia, M. 1996. Cronología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  del vulcanismo jurásico de la Patagonia Extraandina. XIII Congreso Geológico Argentino, Actas 5: 243-250, Buenos Aires.
- Aragón, E., González, P.D., Aguilera, Y. E., Cavarozzi, C. y Llambías, E. J. 2000. Andesitas Alvar: volcanismo alcalino jurásico en el área de Paso del Sapo, provincia del Chubut. Revista de la Asociación Geológica Argentina 55(1-2): 44-58.
- Bachmann, O. y Bergantz G.W. 2008. Rhyolites and their source mushes across tectonic settings. *Journal of Petrology* 49(12): 2277-2285.
- Benedini, L., y Gregori, D. 2013. Significance of the Early Jurassic Garamilla formation in the western Nordpatagonian Massif. *Journal of South American Earth Sciences* 45: 259-277.
- Blesa A. 2004. Geology and mineralization of the Esquel area, Patagonia, Argentina. Tesis Doctoral, Colorado School of Mines (inérita), 211 pp., Golden, Colorado.
- Bouhier, V.E., Franchini, M.B., Caffè, P.J., Maydagán, L., Rapela, C.W. y Paolini, M. 2017. Petrogenesis of volcanic rocks that host the world-class Ag-Pb Navidad District, North Patagonian Massif: Comparison with the Jurassic Chon Aike Volcanic Province of Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 338: 101-120.
- Bruce, R.M., Nelson, E.P., Weaver, S.G. y Lux, D.R. 1991. Temporal and spatial variations in the southern Patagonian batholith; Constraints on magmatic arc development. En: Harmon, W. y Rapela C.W. (Eds.), *Andean Magmatism and its Tectonic Setting*. Geological Society of America, Special Publication 265: 1-12.
- Busteros, A., Franchi, M. y Lema, H.A. 1993. El magmatismo calcoalcalino del área de José de San Martín, provincia del Chubut. XII Congre-



- so Geológico Argentino, Actas IV: 128-133, Mendoza.
- Castro, A., Moreno-Ventas, I., Fernández, C., Vujovich, G., Gallastegui, G., Heredia, N., Martino, R., Becchio, R., Corretgé, L.G., Díaz-Alvarado, J., Such, P., García-Arias, M. y Liu, D.Y. 2011a. Petrology and SHRIMP U e Pb zircon geochronology of Cordilleran granitoids of the Bariloche area, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 32(4): 508-530.
- Castro, A., Aragón, E., Díaz-Alvarado, J., Blanco, I., García-Casco, A., Vogt, K., Liu, D.-Y., 2011b. Age and composition of granulite xenoliths from Paso de Indios, Chubut Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 32 (4): 567-574.
- Cawood, P.A. 2005. Terra Australis orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and lapetus margins of Gondwana during the neoproterozoic and paleozoic. *Earth Science Reviews* 69: 249-279.
- Cawood, P.A. y Buchan, C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. *Earth Science Reviews* 82: 217-256.
- Christiansen, E.H. 2005. Contrasting processes in silicic magma chambers: evidence from very large volume ignimbrites. *Geological Magazine* 142: 669-681.
- Christiansen, E.N. y McCurry M. 2008. Contrasting origins of Cenozoic silicic volcanic rocks from the western Cordillera of the United States. *Bulletin of Volcanology* 70: 251-267.
- Cortés, J.M. 1981. El substrato precretácico del extremo noreste de la Provincia del Chubut. *Revista de La Asociación Geológica Argentina* 36(3): 217-235.
- Coira, B.L. 1979. Descripción de la Hoja 40d, Ingeniero Jacobacci, provincia del Río Negro., Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 168, Buenos Aires, 101 pp.
- Cúneo, R., Ramezani, J., Scasso, R., Pol, D., Escapa, I., Zavattieri, A.M. y Bowring, S.A. 2013. High-precision U-Pb geochronology and a new chronostratigraphy for the Cañadón Asfalto Basin, Chubut, central Patagonia: Implications for terrestrial faunal and floral evolution in Jurassic. *Gondwana Research* 24(3-4): 1267-1275.
- D'Elia, L., Muravchik, M., Franzese, J.R. y Bilmes, A. 2012. Volcanismo de sin-rift de la Cuenca Neuquina, Argentina: relación con la evolución Triásico Tardío-Jurásico Temprano del margen andino. *Andean Geology* 39: 106-132.
- D'Elia, L., Bilmes, A., Franzese, J.R., Veiga, G. D., Hernández, M. y Muravchik, M. 2015. Early evolution of the southern margin of the Neuquén Basin, Argentina: Tectono-stratigraphic implications for rift evolution and exploration of hydrocarbon plays. *Journal of South American Earth Sciences* 64: 42-57.
- De la Cruz, R. y Suárez, M. 1997. El Jurásico de la cuenca de Neuquén en Lonquimay, Chile: Formación Nacientes del Biobío (38-39 ° S). *Revista Geológica de Chile* 24(1): 3-24.
- Dejonghe, L., Darras, B., Hughes, G., Muech, P., Scoates, J.S. y Weis, D. 2002. Isotopic and fluid-inclusion constraints on the formation of polymetallic vein deposits in the Central Argentinian Patagonia. *Mineralium Deposita* 37(2): 158-172.
- Echaurren, A., Oliveros, V., Folguera, A., Ibarra, F., Creixell, C. y Lucassen, F. 2017. Early Andean tectonomagmatic stages in north Patagonia: insights from field and geochemical data. *Journal of the Geological Society* 174(3): 405-421.
- Féraud, G., Alric, V., Fornari, M., Bertrand, H. y Haller, M. 1999. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of the Jurassic volcanic province of Patagonia: migrating magmatism related to Gondwana break-up and subduction. *Earth and Planetary Science Letters* 172(1-2): 83-96.
- Franchi, M. y Page, R. 1980. Los basaltos Cretácicos y la evolución magmática del Chubut occidental. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 35(2): 208-229.
- Franzese, J.R., Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Spalletti, L.A., Fanning, M. y Muravchik, M. 2002. Nuevas evidencias geocronológicas del magmatismo gondwánico en el Noroeste del Macizo Norpatagónico. XV Congreso Geológico Argentino, Actas: 1-5, El Calafate.
- Franzese, J.R., Veiga, G.D., Schwarz, E. y Gómez-Pérez, I. 2006. Tectonostratigraphic evolution of a Mesozoic graben border system: the Chachil depocentre, southern Neuquén Basin, Argentina. *Journal of the Geological Society of London* 163: 707-721.
- Freytes, E. 1971. Informe geológico preliminar sobre la Sierra de Tepuel (Deptos. Languiñeo y Tehuelches, Prov. de Chubut). Yacimientos Petrolíferos Fiscales (inédito).
- Ghiara, M., Haller, M.J., Stanzione, D., Barbieri, M., Menditti, I., Castorina, F., Trudu, C., Demichelis, A.H. y Meister, C.M. 1999. Calc-alkaline volcanic rocks from Cerro Ver, Patagonian Cordillera (43°10'S): Geochemistry and Geochronology. 14° Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 178-181, Salta.
- Giacosa, R., 1997. Geología y petrología de las rocas pre-cretácicas de la región de sierra Paiemán, Provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 52(1): 65-80.
- Glazner, A. F., Coleman, D. S., Bartley, J. M., 2008. The tenuous connection between high-silica rhyolites and granodiorite plutons. *Geology*, 36: 183-186.
- González, P.D., Coluccia, A. y Franchi, M. 1999. Geología y Recursos Minerales de la Hoja 4169-III 'Ingeniero Jacobacci' (Provincia de Río Negro). Escala: 1:250.000. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 311, Buenos Aires, 82 pp.
- Gordon, A. y Ort, M.H. 1993. Edad y correlación del plutonismo subcordillerano en las provincias de Río Negro y Chubut (41°-42° 30' L.S.). XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso





- de Exploración de Hidrocarburos, Actas IV: 120-127, Mendoza.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A. y Digregorio, R.E. 1984. Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica del oeste de la provincia del Neuquén. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 236-259, Buenos Aires.
- Gust, D.A., Biddle, K.T., Phelps, D.W. y Uliana, M.A. 1985. Associated middle to late Jurassic volcanism and extension in southern South America. *Tectonophysics* 116: 223-253.
- Haller, M.J. y Lapido, O.R. 1982. The Jurassic-Cretaceous volcanism in the Septentrional Patagonian Andes. *Earth Science Reviews* 18(3-4): 395-410.
- Haller, M.J., Linares, E., Osters, H. y Page, S. 1999. Petrology and Geochronology of the Sub-Cordilleran Plutonic Belt of Patagonia. II South American Symposium on Isotope Geology, Actas: 210-214, Córdoba.
- Herbst, R. 1966. La flora liásica del Grupo Pampa de Agnia, Chubut, Patagonia. *Ameghiniana* 4(9): 337-349.
- Irvine, T.N. y Baragar, W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523-548.
- Keidel, J. 1921. Sobre la distribución de los depósitos glaciares del Pérmico conocidos en la Argentina y su significación para la estratigrafía de la serie del Gondwana y la paleogeografía del Hemisferio Austral. *Academia Nacional de Ciencias, Boletín* 25: 239-368, Córdoba.
- Lagorio, S., Busteros, A., Silva Nieto, D., Giacosa, R., Zaffarana, C. y Márquez, M. 2018. New Early Jurassic U-Pb age in rhyolitic dykes from the northeastern sector of Gastre (Chubut, Argentina) and its possible relation to the mineralization of the Los Manantiales district. 15° Quadriennial IAGOD Symposium, Resumen A87, Salta.
- Lesta, P.J. y Ferello, R. 1972. Región extrandina de Chubut y norte de Santa Cruz. En Leanza A.F. (Ed.), I Simposio Geología Regional Argentina. *Academia Nacional de Ciencias, Córdoba*: 601-653.
- Linares, E., 1977. Catálogo de edades radiométricas denominadas para la República Argentina. Años 1974-1976 realizado por el INGEIS sin publicar, años 1972-1974. *Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial, Serie B*.
- Linares, E. y González, R.R. 1990. Catálogo de edades radiométricas de la República Argentina 1957-1987. *Asociación Geológica Argentina, Publicaciones Especiales Serie B, Didáctica y Complementaria* 19, Buenos Aires.
- Lizuaín, A. 1980. Las Formaciones Suprapelozoicas y Jurásicas de la Cordillera Patagónica, Provincias de Río Negro y Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 25(2): 174-182.
- Lizuaín, A. 1981. Características y edad del plutonismo en los alrededores de Lago Puelo, Cordillera Patagónica (provincia de Chubut). VII Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 607-616, Buenos Aires.
- Lizuaín, A. 1983. Geología de la Cordillera Patagónica entre las localidades de Lago Puelo y Leleque. Tesis de Posgrado, Universidad de Buenos Aires, 128 pp, Buenos Aires.
- Lizuaín, A. 1999. Estratigrafía y evolución geológica del Jurásico y Cretácico de la Cordillera Patagónica septentrional. En: Caminos R. (Ed.), *Geología Argentina*. Subsecretaría de Minería de la Nación, Servicio Geológico Minero Argentino, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Buenos Aires: 433-556.
- Lizuaín, A. y Silva Nieto, D.G. 1996. Estratigrafía Mesozoica del río Chubut medio (Sierra de Traquetrén), Provincia del Chubut. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas I: 479-493, Buenos Aires.
- Llambías, E.J., Leanza, H.A. 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 Asociación Geológica Argentina* 62(2): 217-235.
- López de Luchi, M.G. y Rapalini, A.E. 1997. Jurassic dyke swarms in the Sierra de Mamil Choique, North Patagonian Massif: lithology, age and paleomagnetism. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 3: 1674-1679, Antofagasta.
- López De Luchi, M.G. y Rapalini, A.E. 2002. Middle Jurassic dyke swarms in the North Patagonian Massif: The Lonco trapial formation in the Sierra de Mamil Choique, Río Negro province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 15(6): 625-641.
- Malvicini, L. y Llambías, E. 1974. Geología y génesis del depósito de manganeso Arroyo Verde, provincia del Chubut. V Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 185-202, Villa Carlos Paz.
- Márquez, M.J., Massaferro, G.I. y Fernández, M.I. 2010. El volcanismo del Complejo Marifil en Arroyo Verde, vertiente suroriental del Macizo de Somún Curá, Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66(3): 314-324.
- Márquez, M.J., Massaferro, G.I., Fernández, M.I., Menegatti, N. y Navarrete, C.R. 2011. El centro volcánico Sierra Grande: Caracterización petrográfica y geoquímica del magmatismo extensional liásico, noreste de la patagonia. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68(4): 555-570.
- Márquez, M.J., Zubia, M.A., Giacosa, R.E., Trevisiol, S.A. y Fernandez, M.I. 2016. Características geológicas y metalogenéticas del Depósito Navidad (Ag-Pb-Zn-Cu) Macizo de Sumún Curá, Chubut, Argentina. *Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas Recursos Minerales* 40, Buenos Aires, 50 pp.
- McDonough, W.F. y Sun, S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology* 120: 223-253.



- Molina, J.F., Scarrow, J.H., Montero, P.G. y Bea, F. 2009. High-Ti amphibole as a petro- genetic indicator of magma chemistry: evidence for mildly alkalic-hybrid melts during evolution of Variscan basic-ultrabasic magmatism of Central Iberia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 158: 69-98.
- Mpodozis, C. y Ramos, V.A. 1989. The Andes of Chile and Argentina. En: Ericksen, G.E. *et al.* (Eds.), *Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources*. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series 11, Houston, Texas: 59-90.
- Mpodozis, C. y Ramos, V.A. 2008. Tectónica Jurásica en Argentina y Chile: Extensión, subducción oblicua, rifting, deriva y colisiones? *Revista de La Asociación Geológica Argentina* 63(4): 481-497.
- Navarrete, C., Gianni, G., Encinas, A., Márquez, M., Kamerbeek, Y., Valle, M. y Folguera, A. 2019. Triassic to Middle Jurassic geodynamic evolution of southwestern Gondwana: From a large flat-slab to mantle plume suction in a rollback subduction setting. *Earth-Science Reviews*, 194: 125-159.
- Niemeyer, H. y Skarmeta, J. 1984. Hojas Península de Taitao y Puerto Aisén: Región de Aisén del General Carlos Ibañez del Campo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica 60-61, Santiago.
- Nullo, F. y C. Proserpio 1975. La Formación Taquetrén en Cañadón del Zaino (Chubut) y sus relaciones estratigráficas en el ámbito de la Patagonia, de acuerdo a la flora, República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 30: 133-150.
- Nullo, F.E. 1978. Descripción Geológica de la Hoja 41d, Lipetrén, provincia de Río Negro (1:200000). Secretaría del Estado de Minería, Ministerio de Economía, Boletín 158, Buenos Aires, 88 pp.
- Page, R. y Page, S. 1993. Petrología y significado tectónico del Jurásico volcánico del Chubut central. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 48(1): 41-58.
- Page, S. y Page, R., 1999. Las Diabasas y Gabros del Jurásico de la Precordillera del Chubut. En: Caminos, R. (Ed.): *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales - SEGEMAR, Buenos Aires, *Anales* 29(17): 489-495.
- Pankhurst, R.J. y Rapela, C.R. 1995. Production of Jurassic rhyolite by anatexis of the lower crust of Patagonia. *Earth and Planetary Science Letters* 134: 23-36.
- Pankhurst, R.J., Caminos, R. y Rapela, C.W. 1993. Problemas geocronológicos de los granitoides gondwánicos de Nahuel Niyeu, Macizo Norpatagónico. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, *Actas*: 99-104, Mendoza.
- Pankhurst, R.J., Leat, P.T., Sruoga, P., Rapela, C.W., Márquez, M.J., Storey, B.C. y Riley, T.R. 1998. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica/ : A silicic large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 81: 113-116.
- Pankhurst, R.J., Weaver, S.D., Hervé, F. y Larrondo, P. 1999. Mesozoic - Cenozoic evolution of the North Patagonian Batholith in Aysén, southern Chile. *Journal of the Geological Society of London* 156: 673-694.
- Pankhurst, R.J., Riley, T.R., Fanning, C.M. y Kelley, S.P. 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the break-up of Gondwana. *Journal of Petrology* 41(5): 605-625.
- Pankhurst, R.J., Rapela, C.W., Fanning, C.M. y Márquez, M. 2006. Gondwanide continental collision and the origin of Patagonia. *Earth Science Reviews* 76: 235-257.
- Peccerillo, A. y Taylor, S.R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58: 63-81.
- Pivetta, C. P., Gregori, D., Benedini, L., Garrido, M., Strazzere, L., Gerales, M., Costa Dos Anderson S. y Marcos, P. 2019. Contrasting tectonic settings in Northern Chon Aike Igneous Province of Patagonia: subduction and mantle plume-related volcanism in the Marifil formation. *International Geology Review* (en prensa): 1-27.
- Proserpio, C.A. 1978. Descripción Geológica de la Hoja 42d, Gastre, provincia del Chubut (1:200000). Secretaría del Estado de Minería, Ministerio de Economía, Boletín 159, Buenos Aires, 76 pp.
- Rapela, C.W. y Pankhurst, R.J. 1992. The granites of northern Patagonia and the Gastre Fault System in relation to the break-up of Gondwana. *Geological Society of London, Special publication* 68(1): 209-220.
- Rapela, C. y Pankhurst, R.J. 1993. El vulcanismo riolítico del Noreste de la Patagonia: un evento Meso-Jurásico de corta duración y origen profundo. 12° Congreso Geológico Argentino, *Actas* 4: 179-188, Mendoza
- Rapela, C.W. y Kay, S.M. 1988. Late Paleozoic to Recent Magmatic Evolution of Northern Patagonia. *Episodes* 11(3): 175-182.
- Rapela, C.W., Dias, G.F., Franzese, J.R., Alonso, G.A. y Benvenuto, A.R. 1991. El Batolito de la Patagonia Central: Evidencias de un magmatismo triásico-jurásico asociado a fallas transcurrentes: *Revista Geológica de Chile* 18: 121-138.
- Rapela, C.W. y Pankhurst, R.J. 1992. The granites of northern Patagonia and the Gastre Fault System in relation to the break-up of Gondwana. En: Storey, B.C. *et al.* (Eds.): *Magmatism and the Causes of Continental Break-Up: Geological Society of London Special Publication* 68: 209-220,



- Rapela, C.W., Pankhurst, R.J., Fanning, C.M. y Hervé, F. 2005. Pacific subduction coeval with the Karoo mantle plume: the Early Jurassic Subcordilleran belt of northwestern Patagonia. En: Vauhan, A.P.M. *et al.* (Eds.), *Terrane Processes at the Margins of Gondwana*. Geological Society of London, Special publication 246: 217-239.
- Renda, E.M., Alvarez, D., Prezzi, C., Oriolo, S. y Vizán, H. 2019. Inherited basement structures and their influence in foreland evolution: A case study in Central Patagonia, Argentina. *Tectonophysics* 772: 228-232.
- Riley, T.R., Leat, P.T., Pankhurst, R.J. y Harris, C. 2001. Origins of Large Volume Rhyolitic Volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by Crustal Melting. *Journal of Petrology* 42(6): 1043-1065.
- Rolando, A.P., Hartmann, L.A., Santos, J.O.S., Fernandez, R.R. y Etcheverry, R.O. 2002. SHRIMP zircon U ± Pb evidence for extended Mesozoic magmatism in the Patagonian Batholith and assimilation of Archean crustal components. *Journal of South America Earth Sciences* 15: 267-283.
- Rolleri, E.O. 1970. Discordancia en la base del Neopaleozoico al este de Esquel. *Cuarta Jornada Geológica Argentina*, Actas 2: 273-277, Buenos Aires.
- Sacomani, L.E., Panza, J.L.A., Parisi, C., Pezzuchi, H.D. y Ardolino, A.A. 2007. Hoja Geológica 4366-III, Las Plumas, provincia del Chubut. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 291, Buenos Aires, 74 pp.
- Sato, A.M., Basei, M.A.S., Tickyj, H., Llambías, E.J. y Varela, R. 2004. Granodiorita El Sótano: Plutón jurásico deformado aflorante en el basamento de Las Grutas, Macizo Norpatagónico Atlántico. *Revista de La Asociación Geológica Argentina* 59(4): 591-600.
- Schioma, M. y Llambías, E. J. 2008. New ages and chemical analysis on Lower Jurassic volcanism close to the dorsal de Huincul, Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(4): 644-652.
- Seitz, S., Putlitz, B., Baumgartner, L. y Bouvier, A.S. 2018. The role of crustal melting in the formation of rhyolites: Constraints from SIMS oxygen isotope data (Chon Aike Province, Patagonia, Argentina). *American Mineralogist* 103: 2011-2027.
- Sisson, T.W. y Grove, T.L. 1993. Experimental investigations of the role of H<sub>2</sub>O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 113: 143-166.
- Spalletti, L.A., Franzese, J.R., Morel, E., D'Elia, L., Zúñiga, A. y Fanning, C.M. 2010. Consideraciones acerca de la sedimentología, paleobotánica y geocronología de la Formación Piedra del Águila (Jurásico Inferior, Neuquén, República Argentina). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66: 305-313.
- Spikermann, J.P., Strelin, J., Marshall, P., Carrillo, R., Montenegro, T., Lago, M., Villalba, E., Pérez, A. 1988. Geología del área del Batolito Aleusco, Departamento de Languiño, provincia de Chubut. *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología*, 19: 39-48.
- Spikermann, J. P., Strelin, J., Marshall, P., Carrillo, R., Montenegro, T., Lago, M., Villalba, E., Pérez, A. 1989. Caracterización geológica y petrológica del Batolito Aleusco, Departamento Languiño, Provincia de Chubut. *Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología* 20: 33-42.
- Strazzere, L., Gregori, D., Benedini, L., Marcos, P., y Barros, M. 2017. Edad y petrografía del Complejo Volcánico Marifil en la Sierra de Pailemán, Comarca Nordpatagónica, Río Negro, Argentina. *XX Congreso Geológico Argentino, Sesión Técnica 8, Volcanología: San Miguel de Tucumán*.
- Strazzere, L., Gregori, D., Benedini, L., Marcos, P., Barros, M., Geraldés, M. y Pavón Pivetta, C. 2018. The Puesto Piris Formation: evidence of basin-development in the North Patagonian Massif during crustal extension associated with Gondwana breakup: *Geoscience Frontiers* 10(1): 299-314.
- Suárez, M. y Emparan, C. 1995. The stratigraphy, geochronology and paleophysiography of a Miocene fresh-water intrerarc basin, southern Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 8: 17-31.
- Suárez, M. y Márquez, M. 2007. A Toarcian retro-arc basin of Central Patagonia (Chubut), Argentina: Middle Jurassic closure, arc migration and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* 34(1): 63-79.
- Suárez, M., De la Cruz, R., Aguirre-Urreta, B. y Fanning, M. 2009. Relationship between volcanism and marine sedimentation in northern Austral (Aisén) Basin, central Patagonia: Stratigraphic, U-Pb SHRIMP and paleontologic evidence. *Journal of South American Earth Sciences* 27: 309-325.
- Suero, T. 1948. Descubrimiento del Paleozoico superior en la zona Extraandina de Chubut. *Boletín de Informaciones Petrolíferas* 25(287): 31-48.
- Sun, S. y McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En: Saunders, A.D. y Norry, M.J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special publication 42: 313-345.
- Turner, J.C. 1983. Descripción geológica de la Hoja 44d, Colan Conhué, Provincia del Chubut. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 197, Buenos Aires, 79 pp.
- Uliana, M.A. y Biddle, K.T. 1987. Permian to Late Cenozoic evolution of northern Patagonia: main tectonic events, magmatic activity, and



- depositional trends. En: MCKenzie, G.D. (Ed.), *Gondwana Six: Structure, Tectonics and Geophysics*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series, Volumen 40: 271-286.
- Varela, R., Basei, M.A.S., Cingolani, C.A., Siga Jr., O. y Passarelli, C.R. 2005. El basamento cristalino de los Andes norpatagónicos en Argentina: geocronología e interpretación tectónica. *Andean Geology* 32(2): 167-187.
- Vizán, H., Prezzi, C. B., Geuna, S. E., Japas, M. S., Renda, E. M., Franzese, J., y Van Zele, M. A. 2017. Paleotethys slab pull, self-lubricated weak lithospheric zones, poloidal and toroidal plate motions, and Gondwana tectonics. *Geosphere* 13(5): 1541-1554.
- Winchester, J.A. y Floyd, P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-343.
- Zaffarana, C.B. y Somoza, R. 2012. Palaeomagnetism and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating from Lower Jurassic rocks in Gastre, central Patagonia: Further data to explore tectonomagmatic events associated with the break-up of Gondwana. *Journal of the Geological Society* 169(4): 371-379.
- Zaffarana, C.B., Somoza, R. y López de Luchi, M. 2014. The Late Triassic Central Patagonian Batholith: Magma hybridization,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages and thermobarometry. *Journal of South America Earth Sciences* 55: 94-122.
- Zaffarana, C. B., Somoza, R., Orts, D. L., Mercader, R., Boltshauser, B., González, V. R. y Puigdomenech, C. 2017. Internal structure of the Late Triassic Central Patagonian batholith at Gastre, southern Argentina: Implications for pluton emplacement and the «Gastre fault system». *Geosphere*, 13(6): 1973-1992.
- Zaffarana, C., Gallastegui, G., Gregori, D., Maris, S., Poma, N., Nieto, D. G. S., y Haller, M. 2020. Petrogenetic study of the Lonco Trapial volcanism and its comparison with the Early-Middle Jurassic magmatic units from northern Patagonia. *Journal of South America Earth Sciences*, 101: 102624.
- Zaffarana, C., Gallastegui, G., Lagorio, S., Poma, S., Busteros, A., Serra Varela, S., Orts, D., Silva Nieto, D., Giacosa, R., Ruiz González, V., Puigdomenech, C., Boltshauser, B. y Somoza, R. 2018. Geochemical signature and reservoir conditions of Early Jurassic calc-alkaline volcanic rocks from Lonco Trapial Formation, Central Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences*, 88: 415-445.
- Zappettini, E.O., Dalponte, M., Leanza, H.A. y Lagorio, S. 2011. Edad y correlación de la Formación Colomichicó, sector septentrional de la Cordillera del Viento, Neuquén, Argentina. 18° Congreso Geológico Argentino, Actas: 2-3: 1374-1375, Neuquén.
- Zappettini, E.O., Lagorio, S.L., Dalponte, M., Orestes, J. y Belousova, E. 2018. Evidencias de magmatismo precuciano (Pliensbachiano - Toarciano) en el norte de la Cordillera del Viento, provincia del Neuquén: caracterización geoquímica, isotópica e implicancias tectónicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 75(4): 533-558.