

ASPECTOS GEOQUÍMICOS RELACIONADOS A LA SERPENTINIZACIÓN Y ANFIBOLITIZACIÓN DEL CUERPO ULTRAMÁFICO DE LA COCHA, SIERRA CHICA, CÓRDOBA

Patricia A. ANZIL y Roberto D. MARTINO

CICTERRA-CONICET y Cátedra de Geología Tectónica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba. E-mails: panzil@com.uncor.edu, rdmartino@com.uncor.edu

RESUMEN

El cuerpo ultramáfico de La Cocha está formado por una harzburgita espinélica, parcial a totalmente serpentinizada, compuesta de olivino, enstatita y espinelo con lentes de piroxenitas espinélicas y hornblenditas. Como encajonante se destacan gneises granatíferos sillimaníticos, intercalados con bancos de anfibolitas piroxénicas y mármoles forsteríticos. Hacia el centro del cuerpo ultramáfico hay lentes de mármol forsterítico, mármoles forsteríticos-tremolíticos y anfibolitas sin piroxeno. Cortan al conjunto diques leucocráticos tabulares e irregulares. La estructura del cuerpo ultramáfico fue definida como un pliegue reclinado de baja cilindridad, asimilable a un pliegue en vaina mayor, ahora arrasado por la erosión. El cuerpo presenta distintos grados de alteración y se identifican al menos tres eventos: los dos primeros están relacionados al ingreso de fluidos acuosos y el tercero a fluidos silicatados. En el primero, se produce serpentización parcial a total de la roca. En el segundo evento se desarrolla un sistema de venillas de serpentina, también por la incorporación de fluidos acuosos. Al aumentar la serpentización, se observa un enriquecimiento en MgO, Al₂O₃ y K₂O, pero se empobrece en los elementos traza en general y REE, especialmente en las HREE (High Rare Earth Elements). El tercer evento, está registrado por el ingreso de fluidos silicatados, en la zona de charnela de la estructura plegada mayor donde se desarrolla el clivaje de plano axial. Esto produce el enriquecimiento de la roca en anfíbol y en algunos elementos como Al₂O₃, Fe₂O₃(T), CaO, TiO₂, REE, Sr, Zr y Hf, mientras que se empobrece en MgO y K₂O.

Palabras clave: *Geoquímica, Serpentinitas, Macizo ultramáfico, La Cocha, Sierras Chicas.*

ABSTRACT: *Geochemistry of La Cocha ultramafic body, Sierra Chica, Córdoba.* La Cocha ultramafic body is a spinel harzburgite composed of olivine, enstatite and spinel, almost to completely hydrated to associations of serpentine minerals. Some hornblendite and spinel pyroxenites lenses intercalated in the serpentinite also are recognized. Garnet - sillimanite gneisses associated with pyroxene amphibolites and forsterite marbles are common country rocks. Forsterite marbles, forsterite - tremolite marbles, hornblendites and non-pyroxene amphibolites lens-like bodies are in an almost central position at the serpentinite body, also as country rocks. Finally, tabular and irregular leucocratic intrusives crosscut all mentioned rocks. The main structure of ultramafic body is a low cylindrical recumbent fold interpreted as a major sheath fold, currently cut off by erosion. The ultramafic body present different degrees of weathering and at least three events were identified. In the first stage permeating hydrous fluids affects the spinel harzburgite which was partially to totally serpentinitized. With increasing serpentinitization the rock increased in MgO, Al₂O₃ and K₂O and it was impoverished in trace elements and REE, especially HREE. Later, a second event represented by a serpentine veins systems was produced by permeating hydrous fluid too. In a third event, in the synformal hinge zone where axial plane cleavage develops, accessing silicate fluids produced enrichment in amphibol and Al₂O₃, Fe₂O₃(T), CaO, TiO₂, REE, Sr, Zr y Hf, and impoverishment in MgO and K₂O.

Keywords: *Geochemistry, Serpentinite, Ultramafic massif, La Cocha, Sierras Chicas, Central Argentina.*

INTRODUCCIÓN

La cuenca endorreica de Cachipampa (Ruiz Huidobro 1960, Raskovsky 1970) se ubica al oriente del valle Calchaquí, unos 75 km en línea recta al sudoeste de la ciudad de Salta (Fig.1). Las coordenadas geográficas del centro de la cuenca son: 65°54' longitud oeste y 25° 15' latitud sur.

Esta cuenca es un pequeño enclave interpuesto en el borde. Existen dos fajas de rocas máficas-ultramáficas (ofiolitas) en las Sierras Pampeanas de Córdoba, interpretadas como posibles suturas de terrenos acrecionales en el margen Gondwánico durante el Proterozoico al Paleozoico inferior. Se denominan faja oriental y faja occidental respectivamente, definidas por

primera vez por Villar (1975, 1985). La litología, el complejo emplazamiento tectónico y la asociación de estas fajas con rocas miloníticas, han permitido interpretarlas a algunas de ellas como asociaciones de tipo ofiolítico (Martino *et al.* 1995, Escayola *et al.* 1996). Kraemer *et al.* (1995) fueron los primeros que establecieron la importancia tectónica que tie-

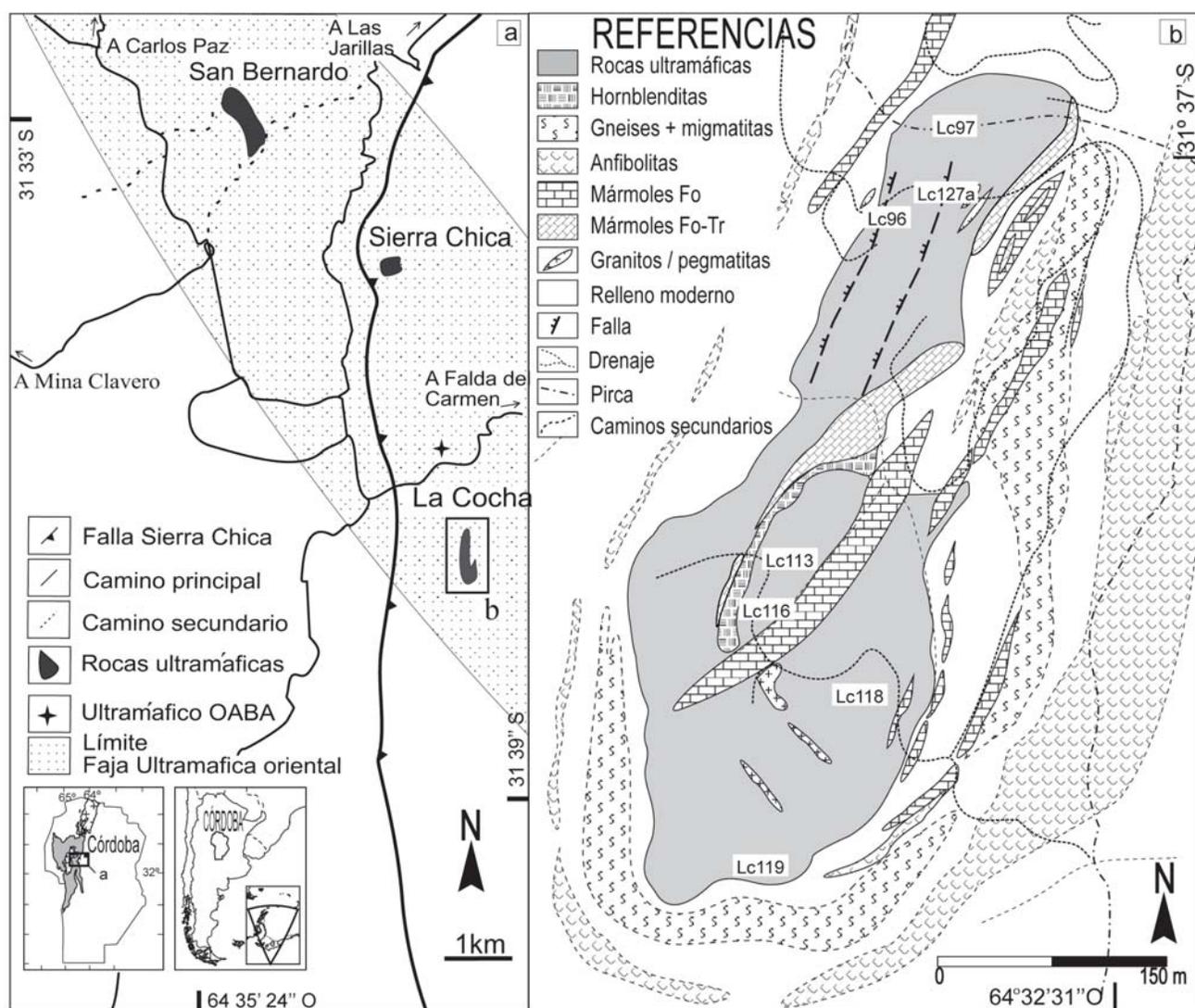


Figura 1: a) Mapa con ubicación del área de estudio con representación de parte de la faja ultramáfica oriental; b) Mapa del cuerpo ultramáfico La Cocha, con ubicación de los puntos de muestreo geoquímico.

nen estas fajas en la evolución de las sierras Pampeanas Orientales y posteriormente Escayola *et al.* (1996) y Ramos *et al.* (2000) sintetizaron sus características. Estas dos fajas tienen rumbo aproximadamente de N340°-350°, con buzamientos altos entre 50°-70° E.

El cuerpo de La Cocha pertenece a la faja oriental (Fig. 1a), que actualmente se extiende desde Río Tercero hasta Ischilín (Villar 1985, Kraemer *et al.* 1995, Martino *et al.* 1995), y separaría el terreno (*terrane*) Córdoba del cratón del Río de La Plata. Los cuerpos pertenecientes a esta faja se encuentran disgregados y emplazados en el ámbito de la sierra Chica. La roca predominante es una serpentinita producto

de alteración de una harzburgita espinélica definida por los minerales relictos entre ellos olivino, enstatita y minerales opacos (espinelo y magnetita). Se encuentran lentes de piroxenitas espinélicas y hornblenditas en el cuerpo ultramáfico y como encajonante del mismo se reconocen mármoles, anfibolitas, gneises y migmatitas de medio a alto grado.

Pugliese (1995) realizó el análisis geoquímico de roca total en La Cocha, en base a estos datos propuso un origen ofiolítico para el cuerpo y consideró que las rocas máficas y ultramáficas corresponderían a la zona de transición, presentando las mismas texturas cumulares. Más tarde Pugliese y Villar (2002) le asignan una gé-

nesis no ofiolítica relacionado a un atenuamiento cortical por extensión (*rifting*), por corresponder al campo toleítico. Los minerales del grupo del platino (PGE), en cambio, muestran un patrón aplanado muy primitivo que está poco diferenciado. Este comportamiento sería consistente con un origen mantélico y sería similar a las secuencias ultramáficas de los complejos estratificados (Pugliese y Villar 2002, 2004).

Para los autores de este trabajo, el cuerpo ultramáfico correspondería a una tectónica basal (Anzil y Martino 2009 a) asociada a cuerpos máficos, asignados a un ambiente tipo MORB (Anzil y Martino 2009 b). El cuerpo presenta una estructu-

ra interpretada como un pliegue sinformal (Anzil y Martino 2005). La roca original se clasifica como una harzburgita espinélica que presenta homogeneidad en su composición a lo largo del cuerpo. Este complejo máfico-ultramáfico se encuentra metamorfozado, con una intensa deformación e hidratación, tal como se deduce de su fuerte serpentización. En este trabajo se dan a conocer los análisis geoquímicos de roca total, sobre siete serpentinitas con diferentes estados de alteración, con la finalidad de determinar las características geoquímicas y el comportamiento de los elementos químicos de la roca frente a los procesos que la afectan. Se reconocieron al menos tres eventos metamórficos. El primero, hidrató la roca produciendo reemplazos parciales a totales a los minerales primarios por minerales del grupo de la Serpentina. Luego, con un nuevo ingreso de fluidos, se desarrolla un sistema de venas rellenas también por minerales del grupo de la Serpentina. Por último, otro evento habría anfíbolitizado la zona de charnela principal del pliegue. Se intentan determinar las características de los fluidos que invadieron al cuerpo a partir del sello geoquímico que le imprimieron a las serpentinitas.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El área de estudio se encuentra en el cerro denominado La Cocha (31°36'40"S y 64°32'40"O, 1.250 m s.n.m.), a 2 km hacia el sur del observatorio astronómico de Bosque Alegre, en la sierra Chica de Córdoba (Fig. 1b).

El cuerpo de serpentinitas y su entorno inmediato fue estudiado por primera vez por Maidana (1984) quien realiza un relevamiento general del lugar. Luego Pugliese (1995) realiza su tesis doctoral enfatizando aspectos de la geoquímica y petrogénesis de las serpentinitas definiéndolas como pertenecientes a un complejo ofiolítico. Posteriormente Escayola *et al.* (1996) sugiere que las serpentinitas no serían de naturaleza ofiolítica sino que pertenecerían a una secuencia estratifica-

da. Pugliese y Villar (2001, 2002, 2004) utilizando elementos del Grupo del Platino proponen que el cuerpo estratificado de La Cocha sería de origen mantélico y pertenecería geoquímicamente a la serie toleítica, postulando una génesis ligada a una extensión litosférica (Pugliese y Villar 2002). Anzil y Martino (2005, 2009 a) proponen en base a su petrografía y disposición, como una lente de manto oceánico obductado, probablemente forma parte de la tectonita basal de un complejo ofiolítico, que una vez emplazada fue deformada y metamorfozada junto con su encajonante.

Este afloramiento presenta una forma elongada en dirección norte (con su eje mayor en dirección N20°), con una extensión de 500 m de largo por 200 m de ancho, siendo la parte más ancha la zona sur. La estructura del cuerpo se define como un pliegue reclinado de baja cilindridad, cuyos cierres podrían pertenecer a una estructura dómica tipo "a" asimilable a un pliegue en vaina mayor, ahora arrasado por la erosión. Presenta un eje inclinado con altos ángulos al norte (N20°/68°) y plano axial con rumbo NNE buzante al este con alto ángulo (N10°/85° E) (Anzil y Martino 2005).

El cuerpo ultramáfico está compuesto por una harzburgita espinélica serpentizada. Se encuentra foliada, es de color verde oscuro a claro. Está formada principalmente por olivino serpentizado y cristales o agregados de cristales de piroxenos enstatíticos, parcial a totalmente bastitizados, con inclusiones de espinelo, con aspecto porfírico general. Presenta lentes de piroxenitas espinélicas, compuesta principalmente por piroxeno, espinelo, magnetita y olivino. También se encuentran lentes de hornblenditas formadas por hornblenda y minerales opacos (magnetita).

El encajonante metamórfico es concordante a la estructura plegada del cuerpo ultramáfico, está compuesto predominantemente por gneises granatíferos sillimaníticos, anfíbolitas con piroxenos y mármoles forsteríticos. Los gneises granatíferos sillimaníticos, son rocas de grano me-

dio, bandeadas de manera alternante en capas leucocráticas y melanocráticas. Las capas leucocráticas están formadas por porfiroblastos de granate en una matriz de cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y escasa biotita. Las capas melanocráticas están formadas por biotita y sillimanita. Las anfíbolitas con piroxenos, se encuentran como cuerpos tabulares concordantes con los gneises. Son rocas bandeadas formadas por capas verdes claras y oscuras. Las capas verdes claras presentan plagioclasa, clinopiroxeno (diópsido) y escaso ortopiroxeno (enstatita). Las capas verdes oscuras están compuestas por hornblenda predominantemente. Los mármoles forsteríticos también se encuentran como cuerpos tabulares concordantes con los gneises. Son de color blanco, compuestos por dolomita y calcita, como accesorios se encuentra forsterita parcial a totalmente serpentizada, espinelo, talco y minerales opacos.

En una posición central del cuerpo ultramáfico, se encuentran acuñados por el plegamiento mayor, una serie lentes de mármoles forsteríticos, mármoles forsteríticos - tremolíticos y anfíbolitas sin piroxeno. Los mármoles forsteríticos - tremolíticos, presentan coloración gris oscura y están compuestas por forsterita, tremolita-actinolita, calcita, dolomita y minerales opacos. Las anfíbolitas sin piroxeno, tienen grano grueso y están compuestas por hornblenda y plagioclasa.

Tanto los mármoles como las anfíbolitas ubicadas en el centro del cuerpo ultramáfico, como las que se encuentran en la periferia, pertenecen al encajonante metamórfico por las relaciones estructurales que presentan con el cuerpo. El encajonante metamórfico presenta paragénesis minerales correspondientes al pico metamórfico en facies de Anfíbolitas altas a Granulitas y sufren reacciones de desestabilización dentro de las facies de Anfíbolitas bajas a Esquistos Verdes (Anzil 2009).

METODOLOGÍA ANALÍTICA

Se realizó la cartografía del cuerpo ultramáfico y su encajonante, utilizando como

base el mapa realizado por Maidana (1984). Durante la verificación de campo se delimitaron mejor las litologías con sus contactos y se tomaron muestras para estudio petrográfico. Posteriormente se recolectaron las muestras favorables para realizar el análisis geoquímico del cuerpo ultramáfico de La Cocha. Se confeccionaron secciones delgadas para estudio petrológico y se realizaron siete análisis químicos de roca total en *Activation Laboratories Ltd* (ACTLABS) en Canadá, los elementos mayoritarios se analizaron por medio de FUS-ICP (*Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry*) y los elementos traza con FUS-ICP y con ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry*). Los datos geoquímicos no se utilizan para graficar diagramas de discriminación tectónica por la movilidad de los elementos químicos de la harzburgita ante los procesos de serpentinización. Los diagramas empleados, correlacionan elementos mayoritarios y traza, útiles en el estudio de la movilidad de los elementos, como así también los diagramas de multielementos y de tierras raras normalizados a manto primitivo, empleados en la literatura para la caracterización de estas rocas.

PETROGRAFÍA

El cuerpo de La Cocha se compone principalmente por una serpentinita desarrollada a partir de una harzburgita espinélica original. Dentro del cuerpo se han reconocido lentes de hornblenditas y piroxenitas espinélicas, estas últimas asociadas a capas de cromita. La orientación de estas lentes es concordante respecto de la foliación de la serpentinita.

La serpentinita es una roca foliada. Mineralógicamente está compuesta por olivino, ortopiroxeno, espinelo y magnetita, como producto de reemplazo se encuentran minerales del Grupo de la Serpentina (lizardita y crisotilo), tremolita, clinocloro y magnetita. Se presenta con diferente intensidad de serpentinización, lo que permite clasificarla en serpentinitas: a- con presencia de minerales primarios,

b- con reemplazos totales y c- afectadas por un evento de anfibolitización. Las serpentinitas a y b, se encuentran a lo largo de todo el cuerpo, pasando transicionalmente en forma difusa de una a otra, mientras que las serpentinitas afectadas por un evento de anfibolitización, se encuentran en la zona sur del cuerpo, asociadas a la zona de charnela del pliegue (Anzil y Martino 2005).

Las serpentinitas con presencia de minerales primarios, son de color verde oscuro, con lentes de color rojizo. Las lentes se concentran en capas irregulares, alternante con capas de agregados granulares alargados, definiendo un bandeo composicional y formando una foliación definida como S₂, de origen metamórfico. Las lentes rojizas, están formadas por cristales o agregados de cristales de ortopiroxenos (enstatita), que presentan alteración a serpentina en los bordes y planos de clivaje (Fig. 2b). La matriz granular alargada, está formada por olivino parcial a totalmente serpentinizado, desarrollando textura en red (*mesh*; Wicks *et al.* 1977). Se encuentran también espinelos euhedrales color verde, minerales opacos (magnetita) como granos aislados, escasos clinocloros asociados a los minerales opacos y tremolitas que se presentan en cristales tabulares largos, con clivaje bien desarrollado. La foliación S₂ está afectada por otra, definida como S₃, que se dispone paralela o la corta con ángulos bajos a S₂ (Anzil y Martino 2005). La foliación S₃, está formada por venas de serpentina, clasificada como lizardita 1T por métodos ópticos y por difracción de rayos-X (Anzil y Martino 2009 a). Las venas son de tipo no asbestiforme con textura en columna (*columnar*; Wicks y Whitaker 1977), con las fibras de serpentina orientadas perpendicular a la pared de la vena.

Las serpentinitas con reemplazo total de los minerales primarios, son de color verde claro con lentes de color ocre. Mantienen el bandeo composicional y es posible apreciar la foliación S₂ y S₃, como en las serpentinitas descriptas anteriormente. Las lentes están formadas por

bastitas, por reemplazo total del piroxeno, con texturas que pasan de *uniforme* (*uniform*; Wicks y O'Hanley 1988) (formadas por un cristal único de serpentina; Fig. 2c) a textura en dominio (*domainal*; Wicks y O'Hanley 1988) (cuando la serpentina presentan zonas con características ópticas distintas), indicando un aumento en el grado de recrystalización (Wicks y O'Hanley 1988). En el centro de algunas bastitas de piroxenos, se puede encontrar asociaciones de óxidos con minerales carbonáticos. El olivino está totalmente serpentinizado, formando texturas pseudomorfas en reloj de arena y en ventanas (Deer *et al.* 1992). Presenta un núcleo de serpentina tabular verdeamarillenta, rodeado por un anillo de serpentina incolora dispuesto con las fibras perpendiculares al contorno, todo el conjunto está limitado por minerales opacos (magnetita). Los espinelos son escasos y de color castaño. Se encuentran clinocloros de dos formas: como granos aislados o como coronas de minerales opacos. Los granos aislados presentan hábito tabular delgado, pueden estar flexionados y tienen minerales opacos en los bordes y entre los planos de clivaje del clinocloro. Los granos que forman coronas de minerales opacos presentan hábito tabular grueso y pueden estar flexionados.

Las serpentinitas afectadas por un evento de anfibolitización, se reconocen por la presencia de venas y parches de color verde claro (Fig. 2a). Se disponen paralelas o cortando las foliaciones S₂ y S₃ de la serpentinita. Están formadas por tremolita principalmente, asociada a serpentina y escaso clinocloro. La tremolita exhibe cristales tabulares alargados, parcialmente serpentinizados en los bordes de los granos o en planos transversales al clivaje. La serpentina se dispone a modo de venas entre el anfíbol, es de color verde a nicoles paralelos y está libre de minerales opacos. El clinocloro, presenta hábito tabular fino y puede tener minerales opacos entre los planos de clivaje. Texturalmente se diferencia claramente el agregado de tremolitas desarrollado durante la anfibolitización, de los granos aislados

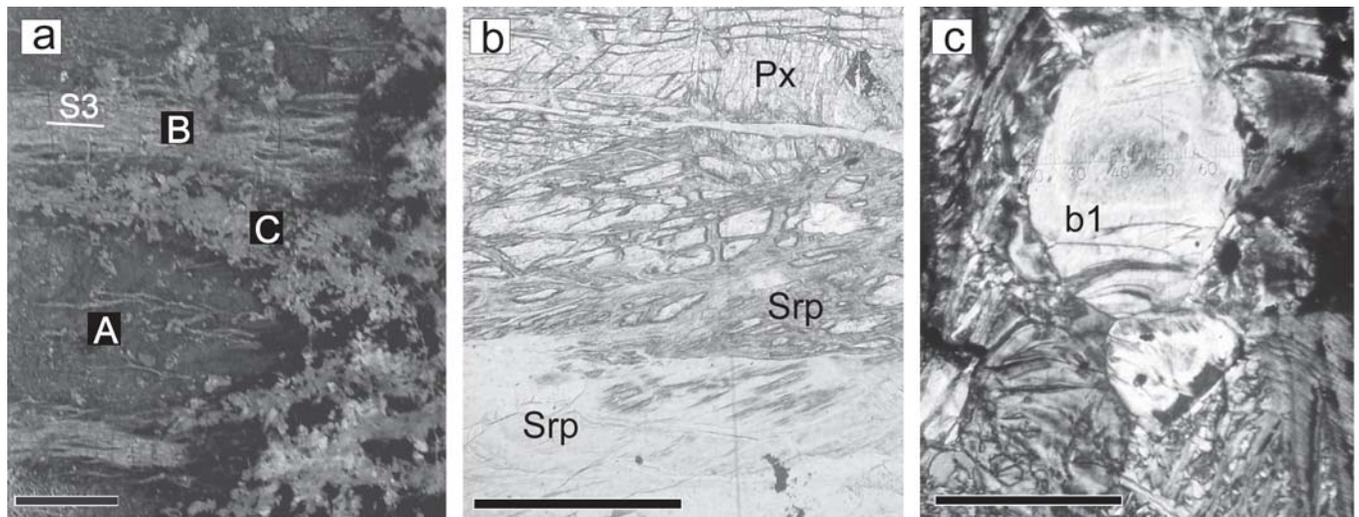


Figura 2: a) Muestra pulida donde se observan los tres eventos metamórficos mencionados en el texto: serpentización (A), venas de serpentina que definen S_3 (B) y anfibolitización (C); (barra de escala = 1 cm); b) Fotomicrografía mostrando el ortopiroxeno (Px) con bordes y planos de clivaje serpentinizados (Srp; barra de escala = 1 mm); c) Fotomicrografía mostrando bastitas de piroxenos, en el centro con textura uniforme (b1; barra de escala = 1 mm).

que se desarrollan por la serpentización.

GEOQUÍMICA

En las Sierras Pampeanas, los cuerpos ultramáficos están intensamente hidratados, con reemplazos parciales a totales de los minerales primarios, lo que provocaría cambios en la geoquímica original. Los fluidos que afectan a las rocas ultramáficas, pueden ser de tres tipos fundamentalmente: carbonatados, silicatados o acuosos. Estos fluidos generan cambios en la roca, provocando la movilidad de los elementos que la componen y le imprimen a la geoquímica una signatura específica para cada proceso. Downes (2001) realiza una síntesis de los efectos que provoca el paso de estos fluidos. Si los fluidos que ingresan a la roca son carbonatados, generarían un empobrecimiento en Nb, Hf y Zr (Ionov *et al.* 1993), con un aumento en la relación CaO/Al_2O_3 , la relación Ti/Eu disminuiría (Yaxley *et al.* 1998) y se enriquecería en elementos de tierras raras livianas (LREE). Los fluidos silicatados, afectan intensamente a los elementos incompatibles, enriqueciendo la roca en Sr, Zr, Hf, Nb y LREE. Mientras que los fluidos acuosos, producirían un enriquecimiento en elementos incompatibles solubles en agua (Rb, Sr, K y Ba), respecto de los elementos HFSE (Nb, Zr y Hf).

Existen controversias con respecto a la movilidad de los elementos frente a la serpentización, proceso que requiere el ingreso de agua al sistema. Para algunos autores (Niu 1997, 2004, Downes 2001), los elementos mayoritarios de peridotitas intensamente serpentinizadas mantendrían la signatura magmática original, a pesar de que experimenten pérdidas en MgO y sufran otros cambios. Mientras que otros autores opinan que la serpentización modificaría la signatura magmática original (Dick *et al.* 1984, Michael y Bonatti 1985, Dick 1989, Johnson *et al.* 1990, Elthon 1992, Niu *et al.* 1997). Esto pone en evidencia que existe una dificultad inherente en el estudio de la química global de este tipo de rocas y fundamentalmente al querer determinar el ambiente tectónico que sería obliterado por los procesos que actuaron.

Las muestras analizadas, ubicadas en la figura 1b, representan las serpentinitas con diferentes grados de alteración. Entre ellas, las serpentinitas con presencia de minerales primarios (muestras: LC97, LC113, LC116 y LC127a), con reemplazos totales (muestras: LC96 y LC118) y una muestra afectada por un evento de anfibolitización (muestra: LC119).

El diagrama $CaO-Al_2O_3-MgO$ de Coleman (1977), para rocas máficas y ultramáficas (Fig. 3), delimita los campos para

cumulatos máficos, komatitas, cumulatos ultramáficos y peridotitas metamórficas, correspondiendo a este último las serpentinitas de La Cocha, lo que muestra una coincidencia según lo observado en la petrología.

Los contenidos de MgO varían de 37,3 a 40,16%; SiO_2 de 37,4 a 41,2%; el Al_2O_3 varía entre 0,4 y 0,79 % mientras que la muestra LC119 tiene 2,46%. Los valores del $Fe_2O_3(T)$ son entre 6,15 y 8,65%. El TiO_2 presenta concentraciones bajas, de 0,002 a 0,01 %, excepto para la muestra LC119 que presenta 0,12 %. Los bajos contenidos en CaO (entre 0,05 y 0,29 %) se corresponden con una Harzburgita. Cabe aclarar que la mayor concentración en la muestra LC96 ($CaO = 0,29\%$) es por la presencia de CO_3Ca producto de alteración, y para la muestra LC119 ($CaO = 0,95\%$) se le atribuye, el alto contenido, a la presencia de abundante anfíbol secundario. Los valores más elevados de K_2O , Al_2O_3 y MgO los presentan aquellas rocas con mayor grado de serpentización (Fig. 4).

La muestra LC119 difiere de las otras rocas analizadas, con los contenidos más elevados en Al_2O_3 , $Fe_2O_3(T)$, CaO y TiO_2 (también de Co y Ni), mientras que posee el valor más bajo de MgO (Fig. 4).

Los procesos de fusión parcial de las rocas ultramáficas, generan cambios en la

geoquímica de la roca, que quedan representados en los diagramas por relaciones lineales negativas de Al_2O_3 , SiO_2 y CaO y positivas de Fe_2O_3 frente al MgO (Frey y Green 1974, Ringwood 1975, McDough 1990, Becker 1996). En La Cocha (Fig. 5) no se observa esta relación. El $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$, SiO_2 , CaO y K_2O no guardan una relación lineal frente al MgO . El Al_2O_3 muestra una pendiente positiva atribuida a la presencia de la fase aluminosa, espinelo, cuya distribución en la roca es heterogénea.

En La Cocha quedaron por debajo del límite de detección el Rb, Cs, U, Sr y Na, si bien son elementos incompatibles, pueden ser móviles en soluciones acuosas como la serpentinización, o alteración de fondo marino (Niu 2004). Los elementos Ba y Pb se consideran móviles durante alteraciones hidrotermales como en las mineralizaciones de sulfuro masivo y por procesos de deshidratación en zonas de subducción, pero no parecen móviles por procesos de serpentinización o alteración de fondo marino (Niu, 2004 y bibliografía allí citada), para La Cocha el Ba está presente y se determinó solo concentración de Pb en la muestra LC118.

Los elementos Sc y V (incompatibles), tanto como Ni, Cr, Cu y Co (compatibles) en diagramas frente a MgO (Fig. 6) no muestran pendientes de diferenciación, como debería esperarse para rocas que han sufrido procesos de fraccionamiento. Los datos se disponen a modo de nube y se desprende del conjunto la muestra LC119. En las relaciones del Cr y el Ni con el Al_2O_3 (Fig. 6) se observa una tendencia positiva, sin tener en cuenta como se aparta del grupo de datos la muestra LC119. El Cr en estas rocas está concentrado en su mayor cantidad en el espinelo, la correlación positiva del Cr con el Al_2O_3 evidencia que este mineral contribuye con una proporción significativa del Al_2O_3 de la composición global de la roca. La relación de Ni con Al_2O_3 también es positiva y podría estar indicando una relación con sulfuros o arseniuros en la roca.

En el diagrama multielemento normalizado a manto primitivo (Hofmann 1988)

CUADRO 1: Composición química de las serpentinitas de La Cocha.

	1- LC 97	1- LC 113	1- LC 127A	1- LC 116	2- LC 96	2- LC 118	3- LC 119
SiO_2	38,28	41,23	38,88	37,4	39,31	37,21	38,94
Al_2O_3	0,4	0,58	0,52	0,53	0,54	0,79	2,46
$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{T})$	8,65	6,72	6,15	7,06	6,11	7,46	8,2
MnO	0,097	0,125	0,097	0,088	0,095	0,098	0,109
MgO	39,37	39,85	38,71	39,73	39,53	40,16	37,34
CaO	0,08	0,06	0,27	0,15	0,29	0,05	0,95
Na_2O	<0,01	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,32	0,03
K_2O	0,02	<0,01	0,03	0,05	0,09	0,05	0,03
TiO_2	0,002	0,002	0,002	<0,01	0,002	0,01	0,123
P_2O_5	0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	<0,01	0,02
LOI	13,05	11,26	13,89	14,78	13,99	14,47	11,66
Total	99,96	99,83	98,55	99,79	99,97	101,5	99,87
Sc	4	7	7	5	7	7	11
V	13	14	22	15	11	18	55
Ba	7	7	7	5	10	15	7
Sr	<2	2	3	<2	3	2	7
Rb	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
Y	<2	<2	<2	<2	<2	<2	3
Zr	<4	<4	<4	<4	<4	<4	23
Cr	1400	2270	1800	1440	1410	1960	1880
Co	58	85	62	62	54	85	97
Ni	1030	1510	1100	1090	900	1590	1740
Cu	50	<10	<10	<10	<10	<10	80
Zn	<30	<30	30	<30	<30	40	60
Ga	1	<1	1	<1	<1	1	3
Ge	2	<1	<1	<1	<1	<1	1
Sb	5,7	6,6	3,1	6,1	4,7	0,7	10,9
Cs	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
La	<0,1	0,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1,2
Ce	<0,1	0,4	0,3	<0,1	<0,1	0,2	2,7
Pr	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,33
Nd	<0,1	0,3	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	1,5
Sm	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
Eu	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,11
Gd	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
Dy	<0,1	0,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5
Ho	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1
Er	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
Tm	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06
Yb	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,4
Lu	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0,07
U	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,2
Pb	<5	<5	<5	<5	<5	8	<5
Hf	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,6

Elementos mayoritarios: en % en peso, elementos trazas y tierras raras: en ppm.

se ubican a la derecha los elementos compatibles y a la izquierda los incompatibles (Fig. 7). Se analizó el comportamiento de la serpentinita de La Cocha (valor promedio de 6 muestras) y el de la muestra LC 119. Los elementos traza, entre ellos tierras raras, en general se movilizan dando concentraciones por debajo de los valores de determinación, por este motivo

la serpentinita promedio presenta un patrón discontinuo. La tendencia de la pendiente es negativa (enriquecida en los elementos más incompatibles), con anomalía negativa de Sr y Ti, mientras que presenta anomalía positiva de Pb debido a la presencia de este elemento solo en la muestra LC118. Se encuentra 10 órdenes de magnitud aproximadamente por deba-

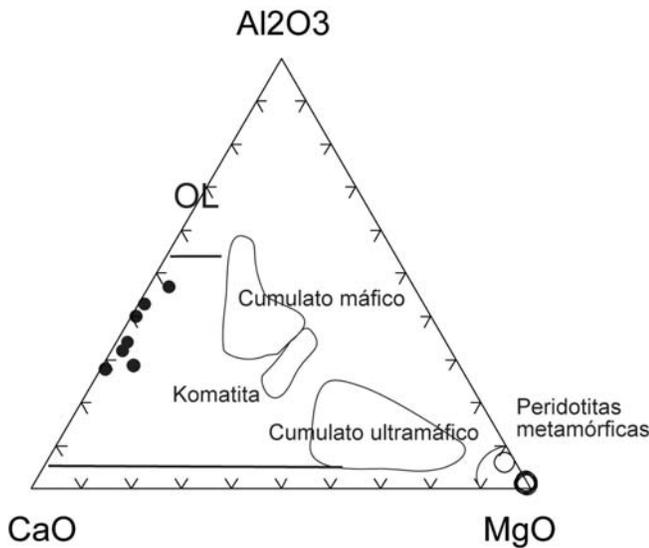


Figura 3: Diagrama triangular CaO-Al₂O₃-MgO de Coleman (1977) para rocas máficas y ultramáficas, muestra los campos de peridotitas metamórficas, cumulatos ultramáficos, cumulatos máficos y komatitas (el círculo oscuro es por la superposición de muestras).

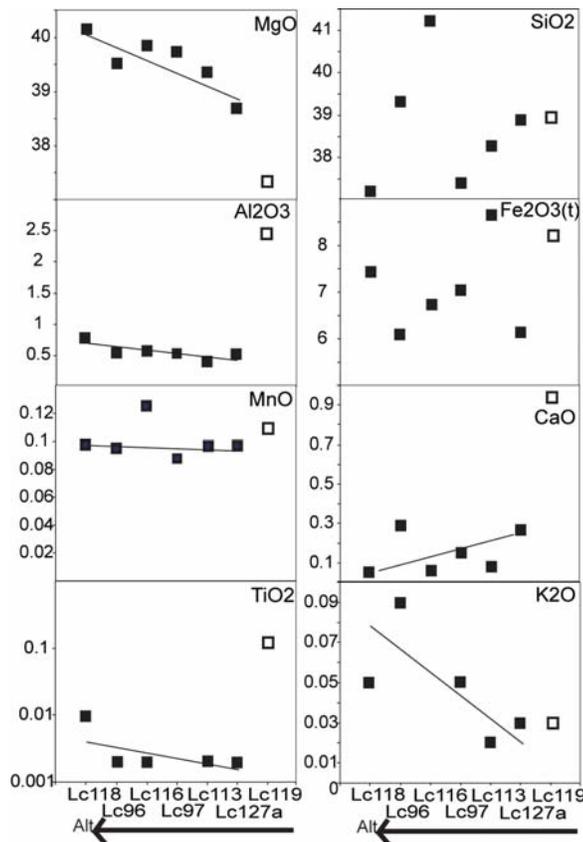


Figura 4: Diagramas de variación de concentración de los elementos mayoritarios, con las serpentinitas ordenadas según aumenta la intensidad de serpentinización de derecha a izquierda. Simbología: serpentinita LC119 (cuadrado blanco); serpentinitas (cuadros negros).

jo de la muestra LC119. Esta última presenta el patrón tendiendo a la horizontal, más completo, con anomalías positivas en Th - U y en Zr - Hf (HFSE: *High Field Strength Elements*) y anomalías negativas en K y Sr (LILE: *Large Ion Lithophile Elements*). En el diagrama de tierras raras (REE) normalizadas a manto primitivo (Sun y Mc

Donough 1989) quedan representadas las muestras LC113 y LC127a y la muestra LC119 con el mayor contenido (Fig. 8). Las serpentinitas presentan concentraciones menores al manto primitivo y con patrones incompletos sin determinar concentraciones para las tierras raras pesadas (HREE) que quedaron por debajo de los límites de detección instrumental.

La muestra LC119 en cambio presenta un patrón de distribución completo, con fraccionamiento entre las tierras raras livianas (LREE) y pesadas. Está enriquecido con respecto al manto primitivo, en los LREE con una relación (La/Sm)_n= 1,93 (normalizado a manto primitivo), mientras que los HREE están levemente empobrecidos con una relación (Sm/Lu)_n= 0,95 (normalizados a manto primitivo). Presenta una anomalía negativa en Eu (Eu/Eu* = 0,84) calculado según Taylor y McLennan (1985) como Eu/Eu* = Eu_N / (Sm_N x Gd_N) y normalizados a manto primitivo.

INTERPRETACIÓN

Las diferencias que se observan en el grado de alteración en estudios microscópicos, no son tan evidentes en los afloramientos, ya que en general la roca se encuentra intensamente serpentinizada. Hay un contacto difuso entre las serpentinitas con minerales primarios y las serpentinitas con reemplazos totales. El cuerpo se puede interpretar como homogéneo en su mineralogía y textura. En la zona de charnela del plegamiento mayor del cuerpo ultramáfico, es donde se encuentran las serpentinitas afectadas por un evento de anfibolitización. El ingreso de fluidos se habría producido a través de las superficies de foliación de plano axial. Este evento sería posterior a la serpentinización (Anzil y Martino 2005).

Los análisis geoquímicos de roca total, tanto de los elementos mayoritarios como de los minoritarios, frente al MgO (Figs. 5 y 6), muestran una distribución a modo de nube, sin relaciones lineales. Esto podría ser el resultado del comportamiento de un cuerpo homogéneo, donde no hubo diferenciación interna, ni procesos de acumulación (cumulatos). Una interpretación alternativa podría ser que la serpentinización del cuerpo ultramáfico haya obliterado por completo los caracteres ígneos primarios, dando como resultado un cuerpo en apariencia de tipo homogéneo.

Los elementos traza y tierras raras nor-

malizados al manto primitivo (Figs. 7 y 8), muestran variaciones sustanciales con respecto a una harzburgita que solo haya sufrido efectos de fusión parcial a partir del manto (Ottonello *et al.* 1984, Frey *et al.* 1985, Hartmann y Wedepohl 1993). Como diferencias, se observan enriquecimientos en los elementos incompatibles solubles en soluciones hidratadas (Ba, K) y enriquecimientos de las LREE. Este comportamiento lo podría generar la acción de fluidos acuosos relacionados a subducción (Downes 2001). Las concentraciones de los HFSE (Zr, Hf, Nb) quedaron por debajo de los límites de detección, siendo estos elementos considerados inmóviles durante la serpentinización (Niu 2004), sin embargo se habrían movilizado en las condiciones de serpentinización que afecta al cuerpo de La Cocha. La anomalía negativa de Sr, podría ser por su movilidad durante la serpentinización (Niu, 2004) o podría reflejar el fraccionamiento de algún mineral cálcico (Gargiulo y Bjerg 2006). Si en cambio, los fluidos que ingresan a la roca son de tipo silicatados, la habrían enriquecido en HFSE. Los fluidos carbonatados, producirían cambios similares en los elementos incompatibles a los que realizan los fluidos acuosos, pero estarían acompañados por un aumento en la relación CaO/Al₂O₃ y por la presencia de minerales carbonáticos en la roca, que en La Cocha no es evidente. La muestra LC96, presenta un elevado valor de CaO y minerales carbonáticos en los núcleos de los minerales serpentinizados, como se describió en la petrografía.

Las tierras raras (REE) por ser elementos incompatibles en las rocas ultramáficas, sus concentraciones son bajas y quedan debajo del límite de detección dando patrones incompletos. El enriquecimiento de los LREE para los patrones normalizados a manto primitivo (Sun y McDonough 1989) se interpretan como producto de refertilización metamórfica/metasomática posterior a procesos de fusión parcial que pueden haber sufrido las rocas. Este proceso se describe para otras serpentinitas del mundo con similares ca-

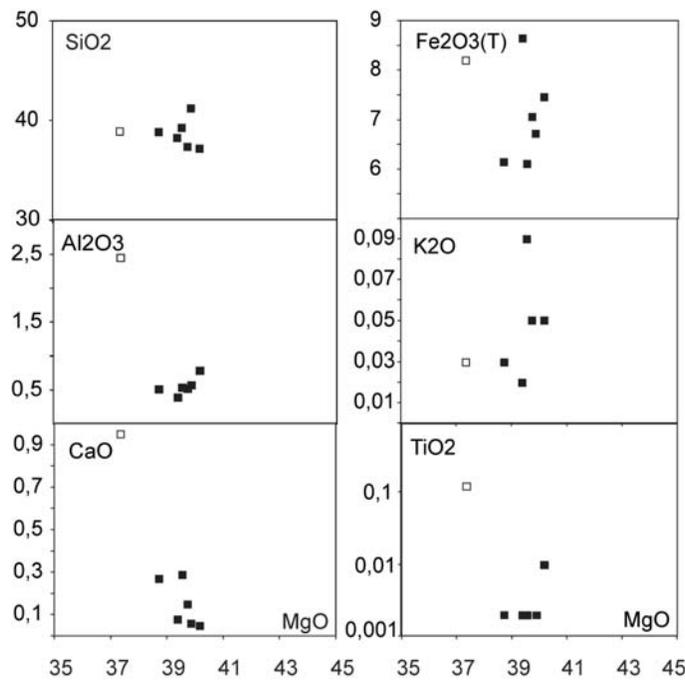


Figura 5: Diagrama de MgO frente a elementos mayoritarios (SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃ (T), K₂O y TiO₂) para rocas ultramáficas de La Cocha. Simbología: igual a Figura 4.

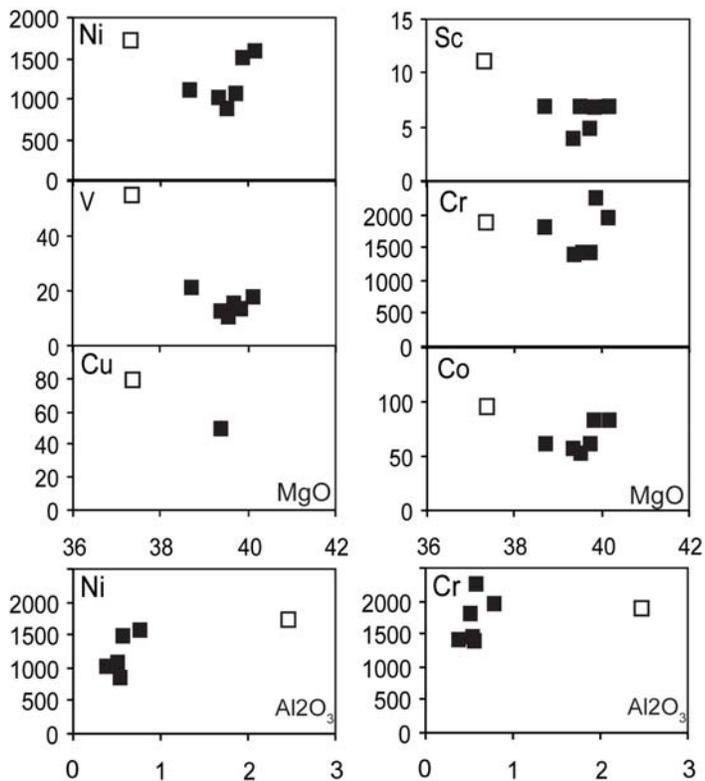


Figura 6: Diagrama de MgO comparado con elementos traza (Ni, Sc, V, Cr, Cu y Co) y Al₂O₃ frente a Cr y Ni. Simbología: igual a Figura 4.

racterísticas (Niu 2004 Song *et al.* 2007, Escayola *et al.* 2004 y bibliografía allí citada), ya que no existen modelos de fusión parcial, ni de cristalización fraccionada, que expliquen el enriquecimiento en las LREE (Niu 2004). Las HREE por su

baja concentración quedaron por debajo del límite de detección instrumental. Se infiere que la harzburgita, es una roca formada por la fusión parcial de una lherzolita rica en clinopiroxenos. A medida que la fusión parcial progresa, la roca se

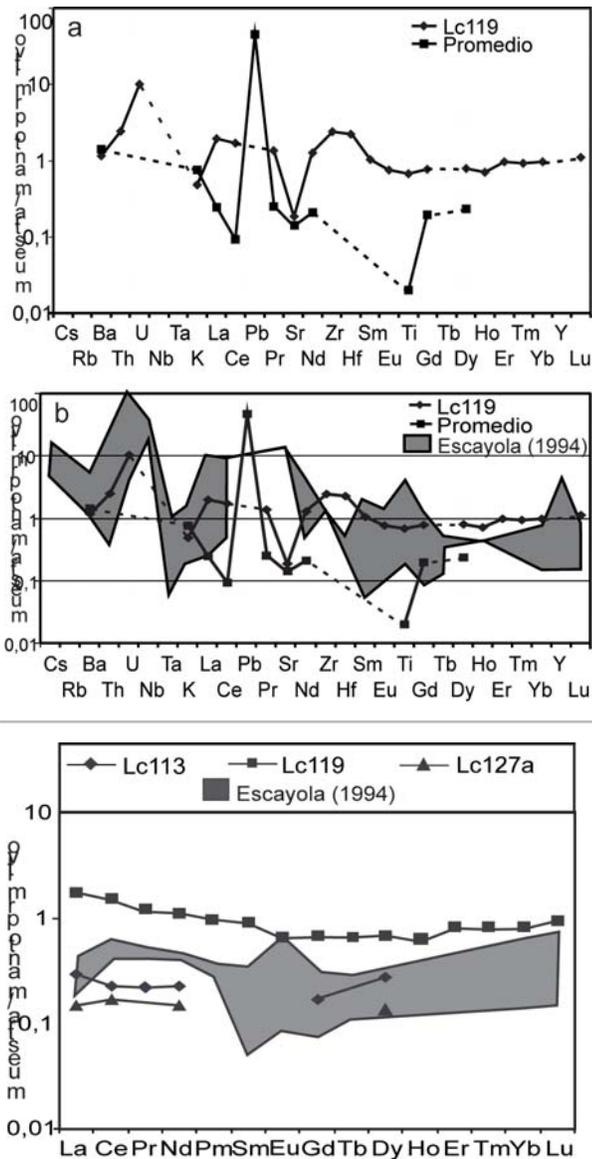


Figura 7: Diagrama multielementos normalizado a manto primitivo (Hofmann 1988) a) Comportamiento del promedio de las 6 muestras del cuerpo ultramáfico La Cocha, sin la muestra LC119 (muestras: LC97-113-127a-116-96-118; cuadrados) y de la muestra LC119 (rombos); b) Diagrama normalizado a manto primitivo con rocas de La Cocha, junto con el perfil de la ofiolita de la Sierra Grande (Escayola 1994, sombra).

Figura 8: Diagrama de tierras raras normalizado a manto primitivo (Sun y McDonough 1989). Simbología: LC119 (cuadrado); LC113 (rombo) y LC127a (triángulo) y en sombra los datos correspondientes a Escayola (1994, sombra).

va empobreciendo en este mineral y por ser éste hospedante de las HREE, la harzburgita también se empobrecería en estos elementos (Downes 2001). Además los HREE no son enriquecidos por procesos secundarios, como las LREE. Es notable el comportamiento diferente de la muestra LC119, que se aleja del grupo de serpentinitas analizadas, en todos los gráficos. Esta muestra, se ve afectada por un proceso de alteración (anfíbolitización) superpuesto a la serpentinización general que presentan el resto de las rocas. Este evento se relacionaría a la circulación de fluidos asociados a la zona de charnela del plegamiento mayor del cuer-

po (Anzil y Martino 2009). Queda evidenciado por la mineralogía (venas y parches de anfíboles), y por la geoquímica que difiere de las harzburgitas que solo sufrieron serpentinización. Las diferencias más significativas son los elevados contenidos en Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 , Co , Ni y REE. El enriquecimiento en Zr y Hf respecto del resto de las muestras analizadas, se atribuiría al pasaje de fluidos silicatados (Downes 2001). La muestra se aleja de la nube de datos de las serpentinitas en los gráficos de los elementos minoritarios (Fig. 6). El patrón de REE en el diagrama normalizadas a manto primitivo (Sun y McDonough 1989) es completo, con ele-

vados contenidos, el cual requiere de procesos de enriquecimientos metasomáticos por fases fluidas que migran reaccionando con la roca (Takazawa 1992). El enriquecimiento en las LREE es atribuido a la presencia de anfíboles (tremolita) formados por procesos metasomáticos, siendo este mineral una fase presente en la roca analizada e interpretado como un producto de alteración póstumo (Anzil y Martino 2009). Se descartó la posibilidad de que sean fluidos carbonatados, ya que al reaccionar con peridotitas generarían un empobrecimiento en Nb, Zr y Hf (Ionov *et al.*, 1993) y darían una relación de Ti/Eu baja (menor a 1000; Yaxley *et al.* 1998, Downes 2001). La muestra LC119, presenta una relación de $Ti/Eu = 6.703$, este valor estaría dentro del rango ($Ti/Eu = 2.500$ a 32.000) establecido para las peridotitas de Europa, donde se analizaron estos valores (Downes 2001).

La proveniencia de los fluidos sería atribuida a diferentes procesos y momentos en la historia geológica del cuerpo (Anzil 2009). Los fluidos acuosos podrían ser aportados por el agua de mar durante el metamorfismo oceánico que atraviesa esta porción de ofiolita (tectonita basal), desarrollando la serpentinización parcial a total. El sistema de venas de serpentina (S_3) se relaciona a un evento superpuesto a la serpentinización general de la roca. El cuerpo ultramáfico serpentinizado una vez emplazado en la corteza continental y asociado a la circulación de fluidos silíceos, aportados por el encajonante durante el pico metamórfico, generaría por metasomatismo la anfíbolitización localizada en la zona sur. Se comparan las harzburgitas y lherzolitas serpentinizadas de los cuerpos La Mabel, Los Congos y La Bélgica, pertenecientes a las ofiolitas de la faja ultramáfica occidental (Escayola 1994), con La Cocha correspondiente a la faja ultramáfica oriental. Se establece esta comparación, entre cuerpos ultramáficos serpentinizados que han sufrido similares procesos metamórficos y que están emplazados en el ámbito de las Sierras Pampeanas. El comportamiento de los elementos incompatibles

(Ba-Th-U principalmente) es similar (Fig. 7). Las REE normalizadas a manto primitivo, dan contenidos intermedios entre las muestras LC113 - LC127a y LC119 (Fig. 8).

CONCLUSIONES

La harzburgita espinélica serpentinizada de La Cocha, mantiene una homogeneidad composicional a lo largo del cuerpo, con diferencias en la intensidad de serpentinización. Esto permite hacer una clasificación entre las serpentinitas que presentan minerales primarios, las que están totalmente serpentinizadas, y las que muestran un evento de anfibolitización. Estas diferencias petrográficas, quedarían reflejadas en la geoquímica de roca total al analizar muestras que poseen los diferentes eventos.

Algunos autores (Niu 1997, 2004, Downes 2001), proponen que los fluidos acuosos no modificarían las firmas magmáticas originales de la roca y no habría movilidad de los elementos mayoritarios, HFSE y REE. Sin embargo en este cuerpo, se interpretó que estos elementos habrían sido afectados por la serpentinización. La movilidad de los elementos generaría la imposibilidad de determinar un ambiente de formación certero. Por este motivo no se aplicaron diagramas de discriminación tectónica y se debe recurrir a las características petrológicas y estructurales para estimar el ambiente tectónico. Se identifican al menos tres eventos metamórficos: los dos primeros están vinculados a fluidos acuosos y el tercero a fluidos silicatados. El primero, produce la serpentinización parcial a total de la harzburgita espinélica. El segundo evento metamórfico, desarrolla un sistema de venas de serpentina, definiendo la foliación S3. El incremento en la serpentinización causaría un aumento en el contenido de K_2O , Al_2O_3 y MgO , una disminución en CaO , mientras que TiO_2 y MnO no parecen ser afectados. El Fe_2O_3 y SiO_2 no muestran una relación con el grado de serpentinización de la roca. Durante la serpentinización, se habría producido un empobrecimiento en los elementos traza (sobre todo en

los HFSE) y de las HREE, mientras que se habrían enriquecido levemente en Ba y en las LREE. El tercer evento metamórfico, está referido a la invasión de fluidos silicatados, en la zona de charnela del plegamiento aprovechando la debilidad estructural asociado a la foliación de plano axial. Queda evidenciado por la presencia de venas y parches ricos en anfíboles (tremolitas), serpentina y clinocloro. Este fluido habría enriquecido a la roca en Al_2O_3 , $Fe_2O_3(T)$, CaO , TiO_2 y en algunos elementos traza (entre ellos las REE) y la empobreció en MgO y K_2O .

Es posible relacionar las características de la geoquímica de La Cocha, con las de otros cuerpos ultramáficos correspondientes a la faja ultramáfica occidental que han sufrido procesos de metamorfismo/metasomatismo similares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por CONICET (CONICET-PIP 6310), SECyT (Universidad Nacional de Córdoba) y FONCyT (PICT-R 179), instituciones cuyos subsidios permitieron afrontar los gastos de campaña y analíticos de este trabajo. Se agradecen las sugerencias y comentarios de los árbitros, la Dra. Luisa Villar del SEGEMAR y el Dr. Pablo González de la Universidad Nacional de la Plata.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Anzil, P. 2009. Metamorfismo, deformación y evolución tectónica de rocas ultramáficas y su encajonante metamórfico asociado en la Sierra Chica Central, Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, (inédito), 336 p., Córdoba.
- Anzil, P. y Martino, R. 2005. Estructura del cuerpo ultramáfico de La Cocha, Sierra Chica de Córdoba, Argentina. 16° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 53-58, La Plata.
- Anzil, P. y Martino, R. 2009 a. The megascopic and mesoscopic structure of La Cocha ultramafic body, Sierra Chica of Córdoba, Argentina. *Journal South American Earth Sciences*

24 (4): 398-406.

- Anzil, P. y Martino, R. 2009 b. Petrografía y geoquímica de las anfibolitas del Cerro La Cocha, Sierra Chica, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (en prensa).
- Becker, H. 1996. Geochemistry of garnet peridotite massifs from lower Austria and the composition of deep lithosphere beneath a Paleozoic convergent plate margin. *Chemical Geology* 134: 49-65.
- Coleman, R. 1977. Ophiolites: ancient oceanic Lithosphere? Springer-Verlag, 229 p. Berlín-New York.
- Deer, W., Howie, R. y Zussman, J. 1992. An introduction to the Rock-forming Minerals. Longman Scientific and Technical, 2nd edition, 696p.
- Dick, H. 1989. Abyssal peridotites, very slow spreading ridges and ocean ridge magmatism. En Saunders, A. y Norry, M. (eds) *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, Special Publications 42: 71-105, London.
- Dick, H., Fisher, R. y Bryan, W. 1984. Mineralogical variability of the uppermost mantle along mid-ocean ridges. *Earth and Planetary Science Letters* 69: 88-106.
- Downes, H. 2001. Formation and modification of the shallow sub-continental lithospheric mantle: a review of geochemical evidence from ultramafic xenolith suites and tectonically emplaced ultramafic massifs of western and central Europe. *Journal of Petrology* 42(1): 233-250.
- Elthon, D. 1992. Chemical trends in abyssal peridotites: refertilization of depleted suboceanic mantle. *Journal of Geophysical Research* 97 (6): 9015-9025.
- Escayola, M. 1994. Faja Ultramáfica de la Sierra Grande de Córdoba entre Intiyaco y Ea. San Miguel, Calamuchita, Córdoba, Argentina. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, (inédito), 227 p., Córdoba.
- Escayola, M., Ramé, G. y Kraemer, P. 1996. Caracterización y significado geotectónico de las fajas ultramáficas de las Sierras Pampeanas de Córdoba. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 3: 421-438.
- Escayola, M., Proenza, J. Schalamuk, A. y Cábana, C. 2004. La secuencia ofiolítica de la Faja ultramáfica de Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. En Pereira, E., Castroviejo, R. y Ortiz, F. (eds.) *Complejos ofiolíticos en Ibero-*

- américa, guías de prospección para metales preciosos, Proyecto XIII.1-CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo), 133-156, Madrid.
- Frey, F. y Green, D. 1974. The mineralogy, geochemistry and origin of lherzolite inclusions in Victorian basanites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 38: 1023-1059.
- Frey, F., Suen, J. y Stockman, H. 1985. The Ronda high temperature peridotite: geochemistry and petrogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49: 2469-2491.
- Gargiulo, M. y Bjerg, E. 2006. Petrografía y geoquímica de rocas máficas y ultramáficas de Cordillera Frontal, Mendoza. 8° Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Actas 351-358, Buenos Aires.
- Hartmann, G. y Wedepohl, K. 1993. The composition of peridotite tectonites from the Ivrea Complex, northern Italy: residues from melt extraction. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57: 1761-1782.
- Hofmann, A. 1988. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters* 90: 297-314.
- Ionov, D., Dupuy, C., O'Reilly, S., Kopylova, M. y Genshaft, Y. 1993. Carbonated peridotite xenoliths from Spitsbergen: implications for trace element signature of mantle carbonate metasomatism. *Earth and Planetary Science Letters* 119: 283-294.
- Johnson, K., Dick, H. y Shimizu, N. 1990. Meeting in the oceanic upper mantle: an ion microprobe study of diopside in abyssal peridotites. *Journal of Geophysical Research* 95: 2661-2678.
- Kraemer, P., Escayola, M. y Martino, R. 1995. Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30°40' - 32°40'), Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50(1-4): 47-59.
- Maidana, J. 1984. Geología del Cerro La Cocha, Bosque Alegre, Provincia de Córdoba. Trabajo Final, Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, (inédito), 52 p., Córdoba.
- Martino, R., Kraemer, P., Escayola, M., Giambastiani, M. y Arnosio, M. 1995. Transecta de las Sierras Pampeanas de Córdoba a los 32° LS. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50(1-4): 60-77.
- McDonough, W. 1990. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 101: 1-18.
- Michael, P. y Bonatti, E. 1985. Peridotite composition from the North Atlantic: regional and tectonic variations and implications for partial melting. *Earth and Planetary Science Letters* 73: 91-104.
- Niu, Y. 1997. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: evidence from abyssal peridotites. *Journal of Petrology* 38(8): 1047-1074.
- Niu, Y. 2004. Bulk major and trace element compositions of abyssal peridotites: implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean Ridges. *Journal of Petrology* 45(12): 2423-2458.
- Niu, Y., Langmuir, C. y Kinzler, R. 1997. The origin of abyssal peridotites. *Earth and Planetary Science Letters* 152: 251-265.
- Ottonello, G., Ernst, W. y Joron, J. 1984. Rare earth and 3d transition element geochemistry of peridotitic rocks: I. peridotites from the Western Alps. *Journal of Petrology* 25(2): 345-372.
- Pugliese, L. 1995. Geoquímica y petrogénesis del complejo máfico - ultramáfico estratificado del Cerro La Cocha de Bosque Alegre, en la Sierra Chica de Córdoba. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba, (inédito), 340 p., Córdoba.
- Pugliese, L. y Villar, M. 2001. El complejo máfico ultramáfico estratificado del Cerro La Cocha, Departamento de Punilla, Provincia de Córdoba. 9° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas 1: 5-15, Montevideo.
- Pugliese, L. y Villar, M. 2002. Aspectos petrológicos y geoquímicos del complejo máfico-ultramáfico estratificado del Cerro La Cocha, Provincia de Córdoba, Argentina. 6° Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Actas 1: 353-360, Buenos Aires.
- Pugliese, L. y Villar, M. 2004. Elementos del grupo del platino en el complejo máfico-ultramáfico de Cerro La Cocha, Departamento de Punilla, Provincia de Córdoba. 7° Congreso de Mineralogía y Metalogenia, Actas 1: 119-120, Río Cuarto.
- Ramos, V., Escayola, M., Mutti, D. y Vujovich, G. 2000. Proterozoic-early Paleozoic ophiolites of the Andean basement of southern South America. En Dilek, Y., Moores, E.M. y Ni-colas, A. (eds): *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*. Geological Society of America, Special Paper 349: 331-349.
- Ringwood, A. 1975. *Composition and petrology of the Earth's Mantle*. McGraw-Hill, 618 p., New York.
- Song, S., Su, L., Niu, Y., Zhang, L. y Zhang, G. 2007. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet peridotite in the North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, northwestern China. *Lithos* 96: 243-265.
- Sun, S. y McDonough, W. 1989. Chemical and isotropic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, Special Publication 42: 313-345, London.
- Takazawa, E., Frey, F., Shimizu, N., Obata, M. y Bodinier, J. 1992. Geochemical evidence for melt migration and reaction in the upper mantle. *Nature* 359: 55-58.
- Taylor, S. y McLennan, S. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*. Blackwell, 312 p., Oxford.
- Villar, M. 1975. Las fajas y otras manifestaciones ultrabásicas de la república Argentina y su significado metalogenético. 2° Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 3: 135-156.
- Villar, M. 1985. Las fajas ultrabásicas Argentinas, tipos de ultramáficas, metalogenia. 4° Congreso Geológico Chileno, Actas 4: 610-633.
- Wicks, F. y O'Hanley, D. 1988. Serpentine minerals: structures and petrology. En: Bailey S.W (Ed) *Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas)*. *Reviews in Mineralogy* 19: 91-167.
- Wicks, F. y Whittaker, E. 1977. Serpentine textures and serpentinization. *Canadian Mineralogist* 15: 459-488.
- Wicks, F., Whittaker, E. y Zussman, J. 1977. An idealized model for serpentine textures after olivine. *Canadian Mineralogist* 15: 446-458.
- Yaxley, G., Green, D. y Kamenetsky, V. 1998. Carbonate metasomatism in the southeastern Australian lithosphere. *Journal of Petrology* 39: 1917-1930.

Recibido: 16 de marzo, 2009

Aceptado: 22 de septiembre, 2009