

CRISOTILO EN SERPENTINITAS DE MINA LA BÉLGICA, PROVINCIA DE CÓRDOBA

Leticia LESCANO^{1,2}, Silvina MARFIL^{1,2}, Pedro MAÍZA¹, Jorge SFRAGULLA^{3,4} y Aldo BONALUMI^{3,4}

¹ Departamento de Geología-Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. E-mail: leticia.lescano@uns.edu.ar.

² Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires.

³ Secretaría de Minería, provincia de Córdoba.

⁴ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.

RESUMEN

Mina La Bélgica se ubica sobre el flanco oriental de la sierra de Comechingones, en el departamento Calamuchita (provincia de Córdoba). Está emplazada en un cuerpo serpentinitico de la faja ultramáfica occidental de las Sierras Pampeanas de Córdoba. En el presente trabajo se estudiaron las rocas serpentiniticas de Mina La Bélgica, poniendo especial énfasis en el crisotilo, único polimorfo del grupo de la serpentina con características asbestiformes. Se desarrolla en vetillas dentro de la roca serpentinitica, en fracturas y zonas de cizalla. Tiene hábito fibroso, y los cristales crecen perpendicularmente a las paredes de las fracturas (asbestos *cross-fiber*). Se tomaron muestras del material de las vetillas y de la serpentinita y se estudiaron por microscopía óptica, difracción de rayos X, análisis químicos, MEB-EDS y análisis térmicos (TG-DTA). En secciones delgadas se observaron vetillas “*cross* y *slip fiber*” y asbestiformes. Su desarrollo cristalino es variable. Genéticamente se formaron en varias etapas, ya que son frecuentes los cortes y reemplazos entre ellas asumiéndose varios pulsos del proceso mineralizador.

Palabras clave: *Serpentina, asbesto, Argentina*

ABSTRACT

Chrysotile on serpentinitic rocks in La Bélgica mine, Córdoba province

La Bélgica mine is located on the eastern flank of the sierra de Comechingones, in the department of Calamuchita (Córdoba province). It is emplaced in a serpentinitic body of the western ultramafic belt of the Sierras Pampeanas de Córdoba. In this work, the serpentinitic rocks of La Bélgica mine were studied, with special emphasis on chrysotile, the only asbestiform polymorph of the serpentine group. Chrysotile is developed in veinlets within the serpentine rock, in fractures and shear zones. The habit is fibrous and the crystals grow perpendicularly to the walls of the fracture (*cross-fiber* asbestos). Samples from the veins and the serpentinita were taken and studied by optical microscopy, X-ray diffraction, chemical analysis, SEM-EDS and thermal analysis TG-DTA. On thin sections, cross and slip fibers as well as asbestiform veinlets show a variable crystalline growth. Frequently, cuts and replacements between these veinlets and fiber microstructures indicate that they were formed at several stages of mineralization.

Keywords: *Serpentine, asbesto, Argentine*

INTRODUCCIÓN

Villar (1975) definió tres fajas de rocas ultrabásicas en la provincia de Córdoba, llamadas fajas oriental, central y occidental. Los afloramientos de la faja oriental se restringen a la Sierra Chica, en la cual se han reconocido manifestaciones de talco que comienzan al sur de la localidad de Calmayo y siguen en los alrededores de Los Molinos. Más al norte, se encuentran los cuerpos de serpentinita de Loma Negra, La Cocha y Bosque Alegre y los afloramientos más septentrionales de esta faja lo constituyen las rocas talcosas de cerro Sapo y la mina La Sal-

tona, cerca de La Falda (explotadas por vermiculita). La faja central es la más extensa y de mayor envergadura, comienza al norte de Alpa Corral, en la serpentinita de Los Permanentes (mina El Cromo), y continúa al oeste de Río de los Sauces con el cuerpo de San José (explotado por serpentinita). Al norte de esta localidad se conocen los afloramientos serpentiniticos del distrito cerro San Lorenzo (conocidos como Resistencia, El Destino, La Maga, y 12 de Noviembre, explotados por cromita y actualmente por serpentinita para uso siderúrgico). Afloramientos de rocas similares se conocen en las cercanías del embalse Río Grande (distrito

Río Grande, minas Tigre Muerto, Árbol Seco, El Rodeo, Ume Pay, Los Guanacos y otras, algunas explotadas en el pasado por cromita y actualmente por vermiculita), la estancia San Miguel (La Bélgica) y en el distrito Atos Pampa (Los Congos, Los Huequitos y otras). Más al norte, en la zona de Río del Medio se cita la mina Coco Solo (asbesto anfibólico) y las minas de serpentinita La Cocha, Cerro Negro y Estancia San Bernardo, estas últimas intensamente explotadas por “verde Alpe”. La faja culmina al norte del batolito de Achala, en los cuerpos de talco, asociados a vermiculita, de Pampa de Olaen (Rosarito, La Cuarta, Juancho y otros

menores) y la corrida que va desde Pampa del Agua Fría hasta Candelaria (Carmarú, Guasta, La Mendocina, Candelaria). La faja occidental está formada por depósitos talcosos pequeños como los de Cerro Colorado (al este de Luyaba), Cabildo (al este de Altautina), Tenacidad (al oeste de Pocho), El Talco (al sur de Agua de Ramón), y algo más al este, la serpentinita de Tala Cañada (Sfragulla *et al.* 2009, Anzil *et al.* 2014).

Estas fajas posteriormente fueron denominadas faja ultramáfica oriental y occidental por Kraemer *et al.* (1995) y a grandes rasgos coinciden con la Sierra Chica (faja oriental) y Sierra Grande (faja occidental). Estos cinturones ultramáficos han sido interpretados como posibles suturas entre terrenos acrecionados en el margen del antiguo continente Gondwana entre el Proterozoico y Paleozoico inferior (Kraemer *et al.* 1995, Ramos *et al.* 2000, Escayola y Kraemer 2003). Recientemente Martino *et al.* (2010) demostraron que las rocas ultramáficas aflorantes en el sector central de la faja oriental se encuentran como cuerpos plegados, aislados entre sí y localmente concordantes con la foliación metamórfica, por lo que no se podrían correlacionar como partes de una única faja regional. Su hipótesis es que los cuerpos ultramáficos serían escamas del manto superior emplazadas tectónicamente en un prisma de acreción, por lo que sugieren evitar la división de las rocas ultramáficas de las sierras de Córdoba en fajas. Escayola *et al.* (2007) definen la edad de las rocas ultramáficas en 647 ± 77 Ma (isocrona Sm-Nd). Si bien hay discusiones sobre el significado de esta edad, no se cuenta con datos más precisos.

La provincia de Córdoba es la única productora de serpentinita en Argentina y existen numerosos trabajos que describen los complejos serpentiniticos, entre los que pueden citarse los de Di Fini (1957), D'Aloia y Bianucci (1969), Fernández Gianotti (1972), Díaz y Andrade (1973), Villar (1975), Bonalumi y Gigena (1987), Mutti y Di Marco (1992), Mutti (1992a y b, 1999) y Anzil *et al.* (2014). Se han descripto minerales asbestiformes (crisotilo) en los cuerpos ultramáficos de

Los Guanacos (Pages y Ré 1953), 25 de Mayo (Dufilho 1985), Árbol Seco (Aiassa y Ferreira Centeno 1985), La Bélgica (Angelelli *et al.* 1980), Los Congos (Escayola 1994) entre otros. Sfragulla *et al.* (2009), mencionan la presencia de crisotilo asbestiforme en las serpentinitas de La Bélgica, Árbol Seco y en la mina de vermiculita Inés II.

La mina La Bélgica fue uno de yacimientos de asbesto-crisotilo más importantes de Argentina, denunciada por amianto en el año 1947 y su explotación a cielo abierto se extendió hasta fines de los años 70. En la actualidad se encuentra abandonada, como la mayoría de los yacimientos de asbestos, y ha sido dada de baja como mina por la Secretaría de Minería de la provincia de Córdoba. Está emplazada en la faja central de rocas ultramáficas de las Sierras Pampeanas de Córdoba (Villar 1975, 1985), posteriormente denominada faja ultramáfica occidental (Kraemer *et al.* 1995). La geología del cuerpo fue estudiada por Escayola (1994, 1997) quien describe serpentinitas derivadas de harzburgitas y websteritas que han sufrido cuatro episodios metamórficos, el último de los cuales es de tipo retrógrado asociado al dominio frágil (evento retrógrado M4, Anzil *et al.* 2014) con circulación de fluidos en fracturas, lo que generó rellenos de crisotilo y talco.

El objetivo del presente trabajo es estudiar y caracterizar los minerales asbestiformes del grupo de la serpentinita de la mina La Bélgica.

MARCO GEOLÓGICO Y UBICACIÓN

La mina La Bélgica se ubica en el departamento Calamuchita, sobre el flanco oriental de la sierra de Comechingones en cercanías de la estancia San Miguel, entre las localidades de Villa Yacanto y Atos Pampa ($36^{\circ}3'0,67''S$ - $64^{\circ}44'55,99''O$) (Fig. 1). El cuerpo ultramáfico, de forma lenticular, tiene 300 m de largo por 100 m de ancho, con rumbo submeridional (Escayola 1994). Se emplaza dentro de las rocas anatécicas que forman el macizo de Atos Pampa-Cerro Pelado (Bonalumi y

Gigena 1987), asociadas a gneises granatíferos, anfíbolitas y mármoles, afectadas hacia el oeste por la faja de deformación Guacha Corral (Anzil *et al.* 2014).

El crisotilo se desarrolla en fracturas o vetillas, presenta hábito asbestiforme, con fibras que superan los 2 cm de largo (Bonalumi y Gigena 1987) desarrolladas perpendicularmente a las paredes de dichas fracturas (asbestos *cross-fiber*). Considerando la facilidad de disgregamiento *in situ* y la movilidad que presenta el crisotilo al ser incorporado como material particulado en el polvo atmosférico (Fig. 2a), es importante evaluar la posible dispersión ambiental del asbesto, especialmente cuando alcanza el tamaño crítico perjudicial para la salud. En la figura 2b se muestra un corte de la serpentinita donde se reconocen las vetillas de crisotilo y su hábito cristalino.

MATERIALES Y MÉTODOS

La mina La Bélgica fue una de las más importantes productoras de crisotilo en Argentina y su mena se utilizó para muchos productos industriales. Si bien actualmente no se encuentra en producción, aún se conservan dos frentes de cantera a cielo abierto (de aproximadamente 8 m de ancho por 10 m de alto cada uno) y destapes menores de pocos metros circundantes. En el presente trabajo, se recolectaron 25 muestras de la roca de caja serpentinitica y de las venillas de crisotilo de dimensiones macroscópicas.

La caracterización mineralógica microscópica se realizó con un microscopio petrográfico Olympus trinocular B2-UMA. Se separaron los minerales de la roca de caja en forma manual, para su purificación y concentración, con un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT. Se molieron las especies en mortero de ágata hasta el tamaño requerido para cada experiencia. Para el análisis por difracción de rayos X (DRX) se utilizó un difractómetro Rigaku D-Max III - C con radiación de $Cu K\alpha_{(1,2)}$ y monocromador de grafito en el haz difractado, con 35 Kv y 15 mA. La caracterización morfológica se realizó con un microscopio electrónico

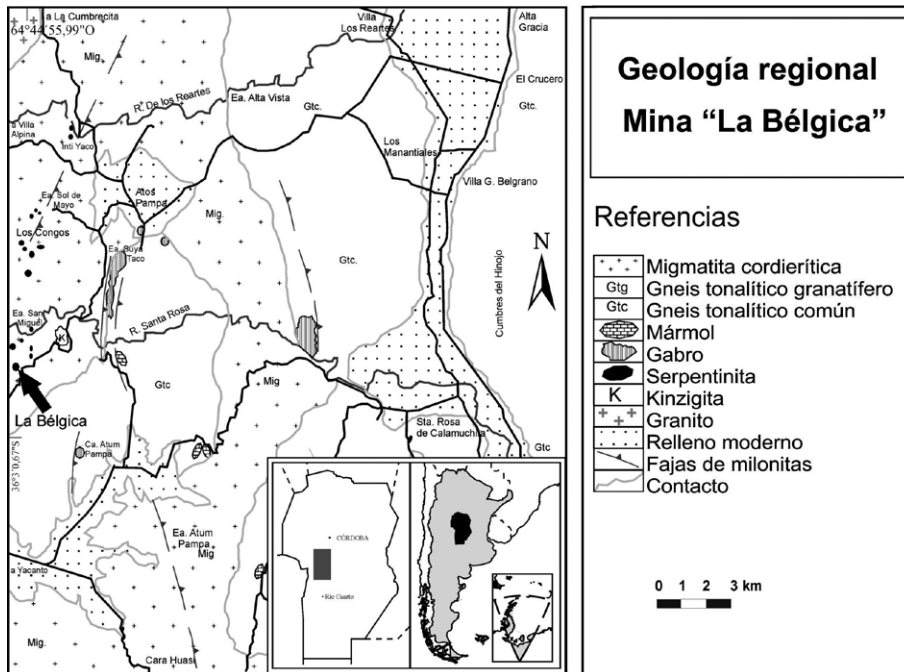


Figura 1: Ubicación de la mina La Bélgica.

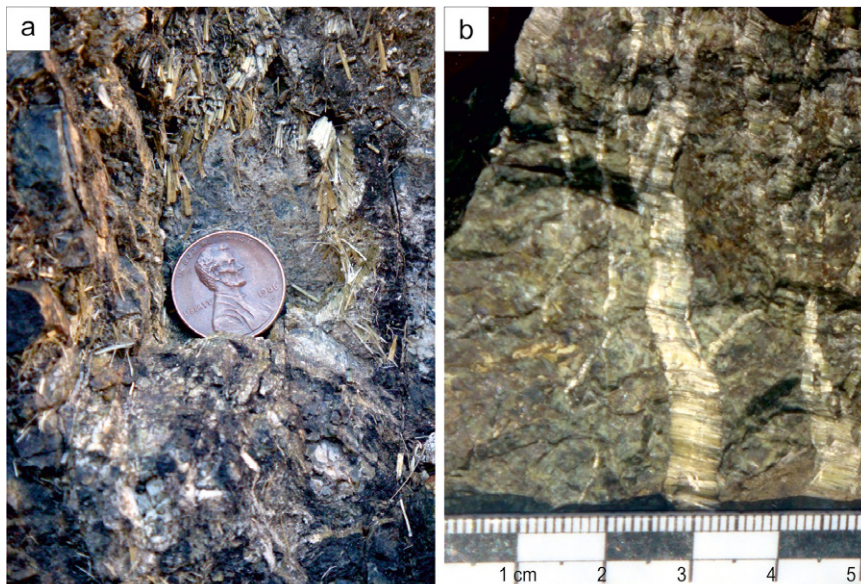


Figura 2: a) Crisotilo disperso por la degradación de las fibras en antiguas labores de mina La Bélgica; b) Serpentinita con varias vetillas de crisotilo desarrollado en texturas *cross-fiber*.

co de barrido (MEB), JEOL JSM 35 CP equipado con un detector para EDS (*energy-dispersive spectroscopy*) para el análisis químico cualitativo de microáreas (rango de detección elemental: entre B y U), sobre muestras metalizadas con oro. Los análisis térmicos se realizaron con un equipo Seiko modelo Exstar 6300, a una velocidad de 10°C/min, hasta 1000°C y un NETZSCH 409/c, a una velocidad de

10°C/min, hasta 1000°C. Los análisis químicos de elementos mayoritarios y traza se realizaron mediante ICP en *Activation Laboratories Ltd.*, Canadá.

RESULTADOS

Microscopía de polarización

El estudio de las texturas de las serpentinitas se realizó basándose en la clasifica-

ción de Wicks y Whittaker (1977) quienes las dividen en pseudomórfica, no-pseudomórfica y en vetillas. O’Hanley y Wicks (1995), mencionan que las texturas en vetillas de crisotilo se forman a partir del crecimiento del mineral, debido a un metamorfismo de progrado, desde una peridotita primaria y las consideran como no-asbestiformes. En cambio las texturas asbestiformes se forman a partir de un metamorfismo retrógrado, asociado a la generación de fracturas, en cuyo relleno cristaliza crisotilo junto con carbonatos, brucita y talco, genéticamente relacionados. Si las fibras de asbestos cristalizan transversalmente a las fracturas, se las denomina *cross-fiber*, mientras que si la dirección de crecimiento es subparalela a la longitud, se denominan *slip-fibers*. En las figuras 3a y b, se observan vetillas subparalelas, no asbestiformes, con bandeamiento irregular, a veces asimétrico, donde el crisotilo cristalizó en forma transversal. También se destacan otras vetillas transversales correspondientes a un evento posterior con características texturales y morfológicas semejantes, sin desplazamiento, es decir, que las fracturas donde se desarrolló el mineral no experimentaron cizalla ni tectonismo posterior. La extinción de los cristales es paralela (Fig. 3c). El carbonato se presenta como último estadio de cristalización e incluso es posible reconocer una carbonatación aún más tardía, asociada posiblemente a procesos exógenos. Las vetillas de carbonatos son, en algunos casos, paralelas a las vetillas de crisotilo no asbestiforme, en otros casos las cortan de manera discordante o a veces presentan un desarrollo masivo. En los bordes del carbonato se reconocen óxidos e hidróxidos de hierro. En la serpentinita se observan texturas no-pseudomórficas entrelazadas, con minerales opacos euhedrales bien cristalizados. Los cristales de antigorita, con elongación positiva y hábito planar, contienen crisotilo tipo *slip-fibers*. A su vez, dentro de las vetillas de carbonato, es frecuente observar guías de clorita magnesiana incolora (Fig. 3d). En menor medida, se reconocen texturas pseudomórficas, con bastitas y piroxenos

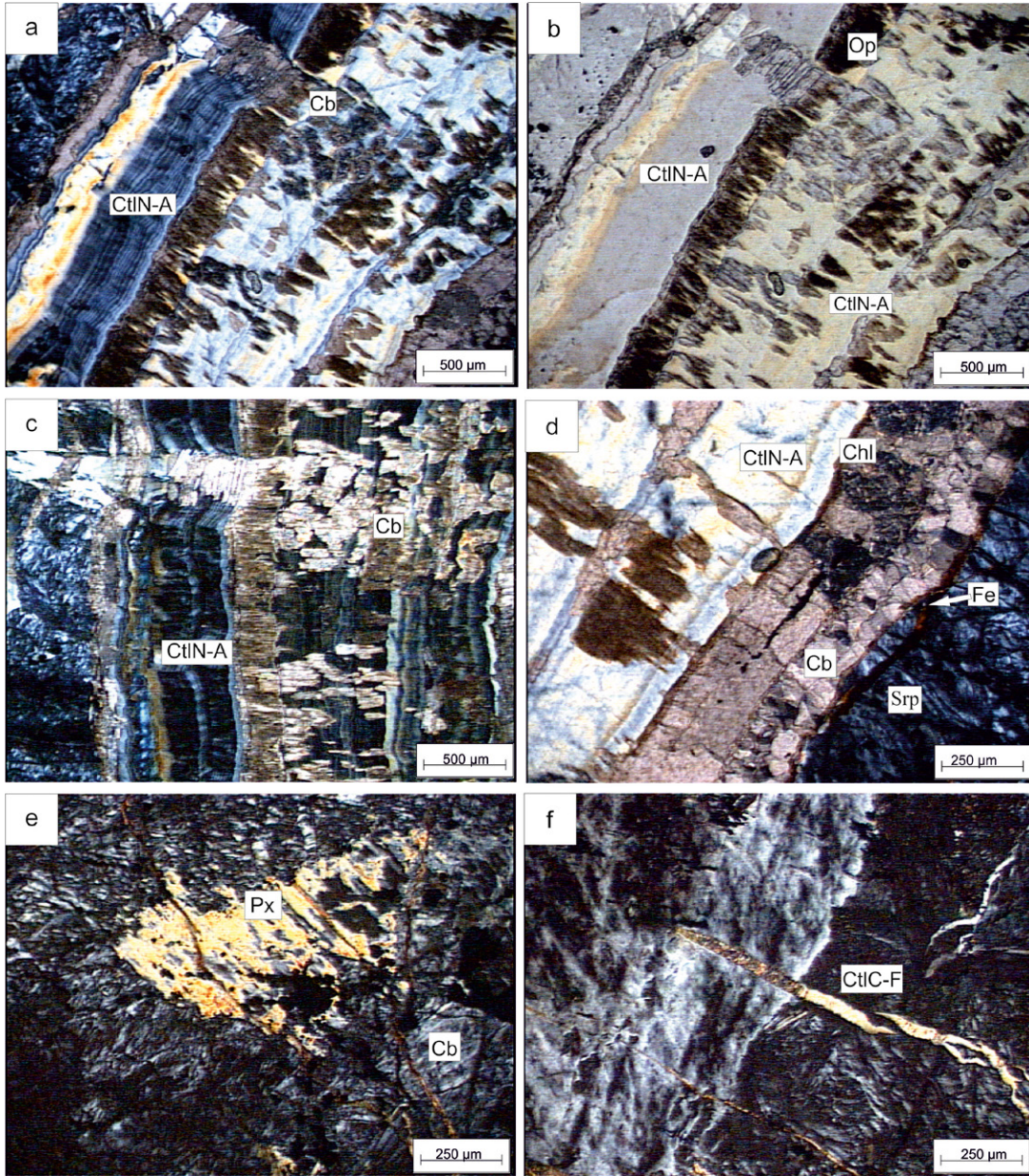


Figura 3: a) Textura en vetillas no-asbestiformes de crisotilo, con nicoles cruzados; b) La misma, con luz paralela; c) Vetilla de crisotilo con extinción paralela, atravesada por una vetilla de carbonato; d) Vetilla de carbonato paralela a la no-asbestiforme; e) Relictos de piroxenos parcialmente serpentinizados; f) Vetillas *cross-fiber*. (CtIN-A: crisotilo no asbestiforme, CtIC-F: crisotilo *cross-fiber*, Cb: carbonato, Chl: clorita, Srp: serpentina, Px: piroxeno, Op: minerales opacos, Fe: óxidos de hierro.

levemente serpentinizados. Son abundantes los minerales opacos y las vetillas de carbonatos atravesando relictos de piroxenos (Fig. 3e). En la figura 3f, se muestra una vetilla no-pseudomórfica atravesada por otra de crisotilo, con textura *cross-fiber* y carbonato asociado.

La textura de la matriz es, en parte, no-pseudomórfica interpenetrativa, compuesta por cristales de antigorita de baja birrefringencia, elongados y anhedrales, fibrosos, con aspecto de placas u hojas y dispuestos al azar. También se reconoce una textura no-pseudomórfica entrelazada, compuesta por cristales de antigo-

rita y lizardita, de dimensiones variables e irregulares (Fig. 4a). En esta textura se desarrollan cristales de antigorita, como si fueran parches relícticos articulados entre sí por un proceso de recrystalización (Fig. 4b).

Además, se reconocen venillas de crisotilo *cross-fiber*, emplazadas en líneas de debilidad, relacionadas con eventos póstomos de la serpentización y posteriores a la formación de la lizardita y antigorita de la matriz. Estas venillas cortan una de crisotilo con textura no-asbestiforme (Fig. 4c).

En algunos sectores se observa una tran-

sición entre las dos texturas no-pseudomórficas (entrelazada e interpenetrativa) formadas por bastitas con relictos de piroxenos totalmente serpentinizados, constituidos por lizardita. Este mineral transicionalmente recrystaliza a antigorita. A su vez las vetillas *cross-fiber* cortan la asociación anteriormente mencionada (Fig. 4d). En los bordes se distinguen óxidos de hierro y en la matriz minerales opacos.

En la figura 5 se observa una vetilla no-asbestiforme bandeada, simétrica, de 250 μ m de espesor con minerales opacos en los sectores externos. A su vez dentro de

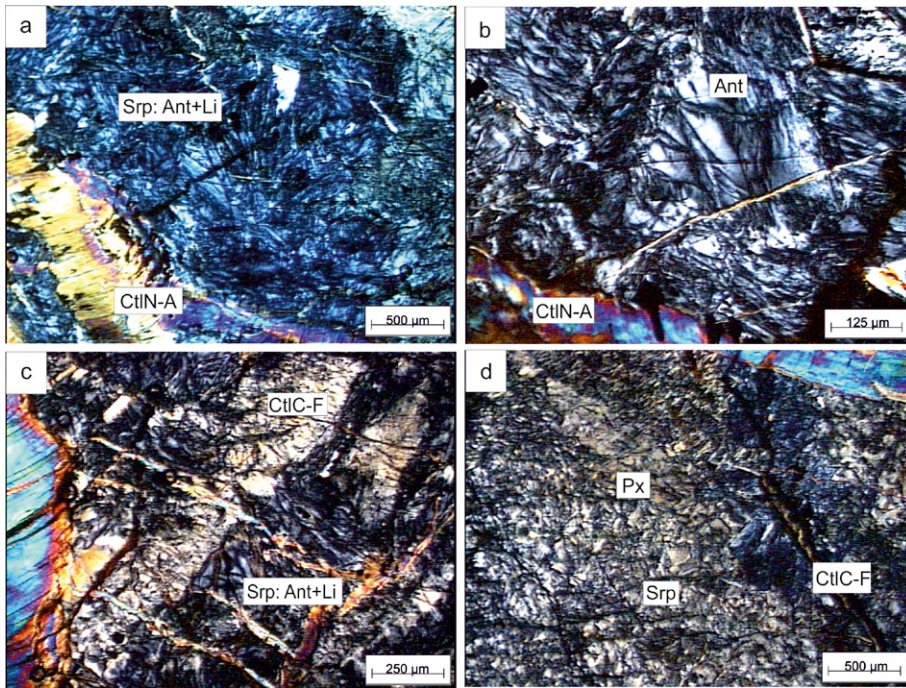


Figura 4: a) Textura no-pseudomórfica interpenetrativa y entrelazada; b) Parches de antigorita; c) Vetillas de crisotilo asbestiforme *cross-fiber*; d) Relictos de piroxenos serpentinizados. (Srp: serpentina, Ant: antigorita, Li: lizardita, CtIN-A: crisotilo no asbestiforme, CtIC-F: crisotilo *cross-fiber*, Px: piroxeno).

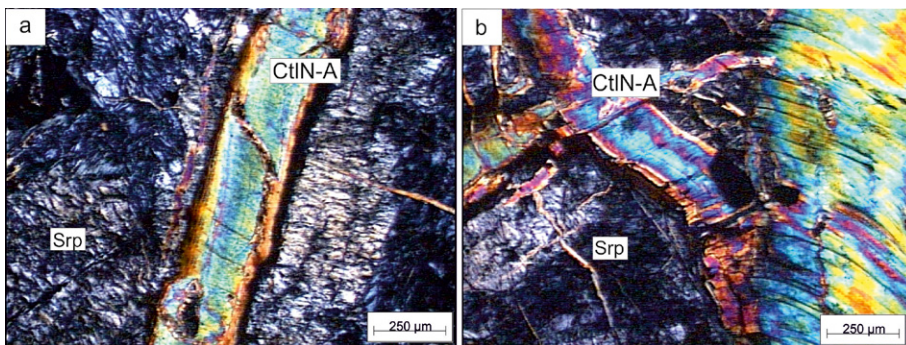


Figura 5: a) Vetilla de crisotilo simétrica contenida en la pasta de lizardita; b) Vetillas de crisotilo de diferentes pulsos de cristalización. (Sr: serpentina, CtIN-A: crisotilo no asbestiforme).

ésta, se presenta una vetilla menor, con minerales opacos en su interior. También pueden observarse fibras asbestiformes irregulares, de hasta 4 μm de ancho, paralelas a las no-asbestiformes. La matriz está constituida por finos cristales que forman una fábrica interpenetrativa de lizardita (Fig. 5a). Se reconocen carbonatos en forma de vetillas dentro de la matriz. En la figura 5b se muestra varias vetillas no-asbestiformes entrecruzadas que corresponden a diferentes etapas de cristalización de crisotilo. También hay vetillas *cross-fiber* entre la serpentinita. Su espesor es variable, siendo mayores las que pre-

sentan textura tipo no-asbestiforme.

Análisis químicos

Se analizó la composición química de las vetillas de crisotilo y de la roca serpentinita de la mina La Bélgica. El crisotilo es un silicato de magnesio ($\text{Mg}_3\text{SiO}_5(\text{OH})$), con contenidos de SiO_2 entre 38 y 40%, de MgO entre 38 y 42% y una pérdida de peso entre 12 y 14%. En el cuadro 1 se muestra los resultados de los análisis de tres muestras de crisotilo separadas de diferentes vetillas, donde se reconocen valores de SiO_2 entre 32 y 42 % y de MgO entre 33 y 40 %. El resto de los óxidos su-

peran los valores de la muestra analizada por Brindley y Zussman (1957) relacionado a impurezas, principalmente de óxidos e hidróxidos de hierro, como magnetita y goethita, observadas en secciones delgadas. El hierro total de las tres muestras alcanza un valor máximo de 11%. La pérdida de peso es coherente con la estudiada por los autores mencionados anteriormente. En cuanto a la serpentinita, se observa un aumento en el contenido de Fe_2O_3 total relacionado al incremento de minerales opacos en la pasta y un leve aumento en el calcio relacionado a los carbonatos póstumos de la serpentinitización, a los que debe sumarse el incorporado por los procesos exógenos que afectaron las rocas. En el cuadro 1 se indican los valores obtenidos.

Difractometría de rayos X

Por difracción de rayos X se determinó que el mineral fibroso que constituye las vetillas es crisotilo. Presenta serias dificultades para la molienda, ya que las fibras se aglutinan y se desagregan generando en el mortero una malla tejida desordenada de fibras pequeñas. En la figura 6 se muestra el difractograma obtenido con los valores de “d” en \AA correspondientes.

En el cuadro 2, se comparan los valores del espaciado interplanar (d \AA) del crisotilo de mina La Bélgica con los de las fichas ICDD (1986). El plano (002) de intensidad 100% de las fichas ICDD es 7,2 \AA y el (004) 3,64 \AA coincidentes con las muestras analizadas. En el crisotilo estudiado estas reflexiones se invierten, característica atribuida a la potencial orientación de las partículas al montarlas en el porta muestra y a las dificultades intrínsecas de la molienda del material. El resto del espectro es totalmente coincidente. El crisotilo es un polimorfo del grupo de la serpentinita, junto con la lizardita y la antigorita. Los tres presentan una estructura laminar tipo 1:1 compuesta por una capa tetraédrica y una octaédrica. A partir de la diferencia de las dimensiones entre estas capas, se genera un desajuste geométrico cuya compensación da como resultado tres morfologías diferentes

(Wicks y O'Hanley 1988) con pequeñas variaciones en la estructura que pueden ser identificadas por difracción de rayos X. Por lo tanto esta técnica es considerada una herramienta útil para diferenciar estos polimorfos.

En el cuadro 3 se compara los valores de espaciado interplanar del crisotilo con los de lizardita y antigorita de las fichas ICDD. Se observa que los valores en 7 Å son comparables con lizardita pero el pico en 2,50 Å con intensidad de 100% no aparece el difractograma de mina La Bélgica. Si se compara con las fichas ICDD de antigorita, se observa que el pico de 7 Å tiene similar intensidad, pero en la antigorita la reflexión más intensa se encuentra en 2,52 Å y en el crisotilo no aparece. A su vez, entre los 6 Å y los 5 Å se reconocen tres picos de intensidad 40% que no se registran en el crisotilo de La Bélgica.

Microscopía electrónica de barrido

La morfología de las fibras de crisotilo se analizó utilizando microscopía electrónica de barrido (MEB). En la figura 7a, se reconocen paquetes comprimidos de fibras naturales de las vetillas, elongadas, con sus extremos abiertos, donde se puede ver la incipiente separación de las mismas. Por EDS se determinó que cualitativamente la composición de este mineral coincide con la del crisotilo, siendo muy claras las reflexiones de Mg, Si, Fe y O (Fig. 7b). Las fibras son mayores a 200 µm, poco densas y muy flexibles (Fig. 7c y d). El proceso de separación y purificación, genera una red de fibras de diferente tamaño donde las más pequeñas miden unos pocos micrones de largo, son extremadamente finas dando una relación largo/ancho superior a 100.

Análisis térmico gravimétrico y térmico diferencial

El crisotilo presenta impurezas mineralógicas reconocidas en el análisis térmico diferencial (TG-DTA). El pico exotérmico en 326°C está relacionado a la oxidación del hierro, que corresponde a la magnetita reconocida con microscopio de polarización como impureza dentro de las fibras. Además, en 392°C se obser-

CUADRO 1: Análisis químicos del crisotilo y de la roca serpentinitica de mina La Bélgica.

Óxidos	Crisotilo (1)	Crisotilo (2)	Crisotilo (3)	Roca total (1)	Roca total (2)
SiO ₂	42,7	42,07	36,1	29,33	25,7
Al ₂ O ₃	0,38	1,19	0,62	0,68	0,83
Fe ₂ O _{3(T)}	3,26	6,72	11,11	18,38	43,46
MnO	0,076	0,11	0,04	0,07	0,141
MgO	40,2	33,33	33,51	29,7	21,97
CaO	0,04	0,15	0,18	0,96	0,07
Na ₂ O	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,12
K ₂ O	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06
TiO ₂	0,007	0,03	0,01	0,02	0,02
P ₂ O ₅	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
LOI	13,96	15	11,88	19,28	8,01
Total	100,7	99,03	93,87	98,7	99,78

* Elementos mayoritarios expresados en porcentaje en peso (%).

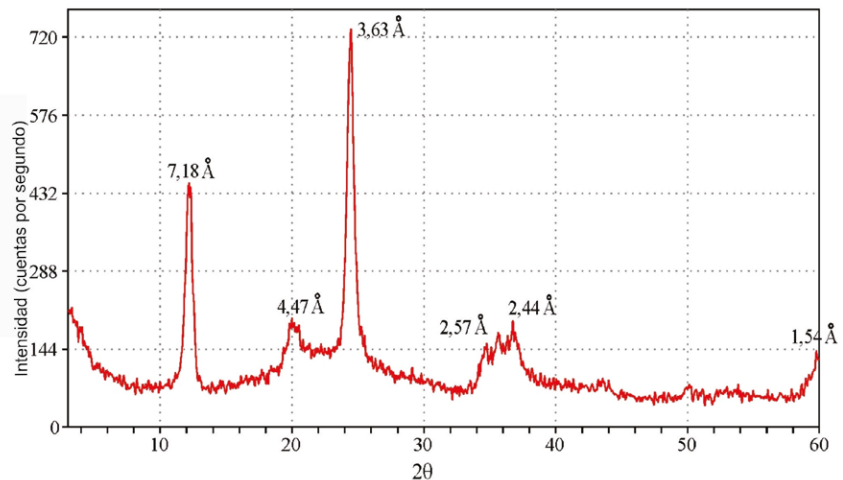


Figura 6: Difractograma del crisotilo de la mina La Bélgica con los principales valores de "d" expresados en Å.

CUADRO 2: Comparación del crisotilo La Bélgica con las fichas ICDD.*

Crisotilo Mina La Bélgica			Crisotilo-20 (ICDD 25-645)		Crisotilo-2M (ICDD 21-1262)		Crisotilo -2M (ICDD 31-808)		Crisotilo-20 (ICDD 25-645)	
d Å	Intensidad	hkl	d Å	Intensidad	d Å	Intensidad	d Å	Intensidad	d Å	Intensidad
7,18	67,2	002	7,36	100	7,28	55	7,31	100	7,1	100
4,47	12,6	020	4,56	50	4,54	100	4,57	50	4,40	40
3,63	100	004	3,66	80	3,64	35	3,65	70	3,55	68
2,57	7,6	210	2,54	20	2,62	35	-	-	-	-
2,44	14,3	202	2,50	50	2,45	35	2,45	10	2,50	51
1,81	4,8	051	1,82	30	1,82	10	1,82	30	-	-
1,53	4,4	029	1,53	65	1,53	45	1,53	50	1,54	33

* (ICDD 1986).

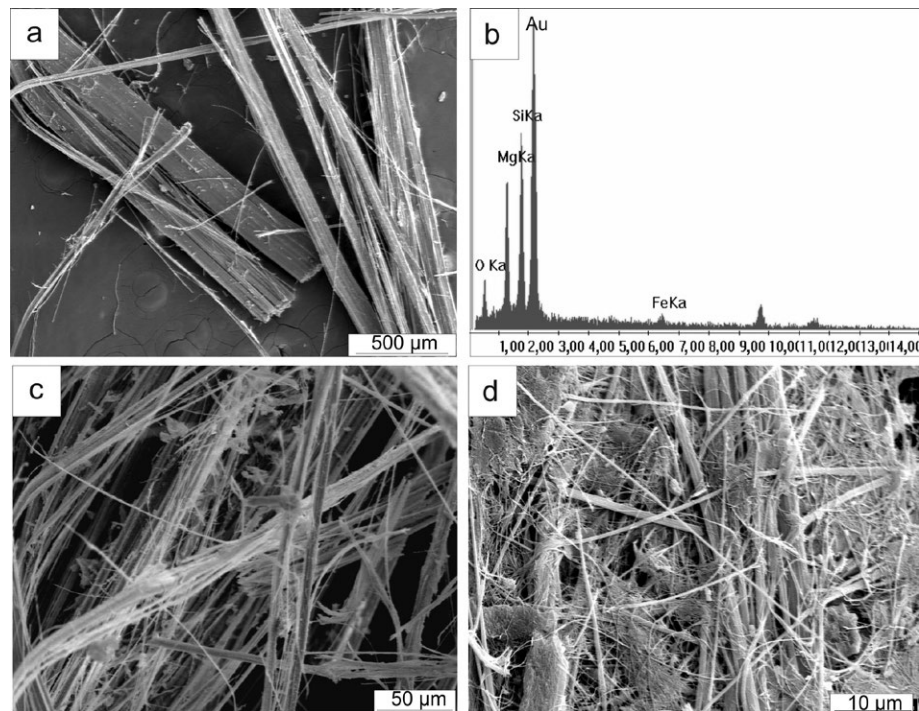
va un pequeño pico exotérmico relacionado a la deshidroxilación de la brucita. El crisotilo se compara con curvas de DTA y TG típicas de este mineral asbestiforme estudiado en detalle por Hodgson

y Robertson (1972). Estos autores describen un pico endotérmico en 593°C y un exotérmico en 647°C relacionado a la mayor reacción de deshidroxilación del mineral, acompañado de una pérdida de pe-

CUADRO 3: Comparación del crisotilo La Bélgica con fichas ICDD de lizardita y antigorita.

Crisotilo mina La Bélgica		Lizardita 1T (ICDD 18-779)		Lizardita 6T (ICDD 9-444)		Lizardita 6T Al (ICDD 13-4)		Antigorita 1M (ICDD 21-963)	
d Å	Intensidad	d Å	Intensidad	d Å	Intensidad	d Å	Intensidad	d Å	Intensidad
7,18	67,2	7,40	100	7,33	100	7,09	100	7,29	100
-	-	-	-	-	-	-	-	6,43	40
-	-	-	-	-	-	-	-	5,82	40
-	-	-	-	-	-	-	-	5,15	40
-	-	4,6	80	4,6	60	4,60	40	4,64	20
4,47	12,6	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	3,9	50	3,9	5	3,86	20	-	-
3,63	100	3,67	80	3,66	100	3,55	70	3,61	80
2,57	7,6	2,50	100	2,50	100	2,49	80	2,59	20
-	-	-	-	-	-	-	-	2,52	100
2,44	14,3	-	-	2,45	10	-	-	2,45	60
-	-	2,15	80	2,15	60	2,13	35	2,17	60
1,81	4,8	1,79	50	1,81	5	-	-	1,81	20
-	-	-	-	-	-	-	-	1,69	60
1,53	4,4	1,53	80	1,53	80	1,53	50	-	-

*(ICDD 1993).

**Figura 7:** Imágenes MEB de crisotilo. a) Paquetes de fibras de las vetillas tipo no asbestiformes naturales; b) EDS del crisotilo; c) Fibras separadas manualmente, extensas y flexibles; d) Fibras de tamaño variable, aglutinadas.

so de un 11% comparable con la que se muestra en los análisis térmicos teóricos para este tipo de minerales industriales. El gran pico exotérmico en 826°C refleja una repentina liberación de energía cuando la mayor parte del crisotilo deshidroxilado recristaliza a forsterita (Fig. 8).

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El crisotilo es el único polimorfo del grupo de la serpentina que presenta características asbestiformes. A partir de los

resultados obtenidos por microscopía óptica, difracción de rayos X, análisis químicos, MEB-EDS y análisis térmicos, se concluyó que el mineral fibroso de las vetillas de mina La Bélgica es crisotilo. Se compararon los resultados obtenidos por DRX con las fichas de lizardita y antigorita (constituyentes de la serpentinita). Si bien sus espectros son muy parecidos, presentan sutiles diferencias que permiten su diferenciación confirmando que se trata de crisotilo. En secciones delgadas se observaron vetillas *cross* y *slip fibery* asbestiformes. Su desarrollo cristalino es variable, alcanzando en algunos casos los 3 cm de ancho, observadas tanto *in situ*, en fracturas o zonas de cizalla, como en los fragmentos rocosos que constituyen las escombreras. En la matriz de la roca serpentinitica se determinó la coexistencia de lizardita y antigorita.

Con microscopio electrónico se observaron fibras muy extensas, poco densas y flexibles. También se apreció la morfología que se desarrolla durante el proceso de degradación y la característica de las terminaciones de las fibras. El proceso de separación manual permitió formar una red de fibras de diferente tamaño donde las más pequeñas miden unos pocos micrones de largo, conservando una relación largo/ancho superior a 100.

Genéticamente, se formaron en varias etapas, ya que son frecuentes los cortes y reemplazos entre ellas asumiéndose varios pulsos del proceso mineralizador. Merenko (1958) estudió y describió la serpentinitización en vetillas de crisotilo y minerales asbestiformes y mencionó el desarrollo de texturas de tipo *slip fiber*, como las observadas en este yacimiento. A su vez, la presencia de antigorita relicta en algunos sectores de las secciones delgadas es indicativa del inicio de la deshidratación de la roca original, debido a que este mineral necesita menor cantidad de H₂O que los otros del grupo para transformarse, e indica mayor temperatura y presión del sistema (Caruso y Chernosky 1979).

La temperatura juega un papel muy importante en la formación de crisotilo. No todas las rocas serpentinitizadas presentan

este mineral. Wicks y Whittaker (1977) mencionan que los depósitos de asbestos crisotilo se encuentran confinados a rocas serpentiniticas y se forman en condiciones especiales de metamorfismo, a baja presión y temperatura. Además son importantes las condiciones tectónico-estructurales necesarias para generar las fracturas y cizallas en las que se desarrollarán estas fibras. Las vetillas son el resultado de la combinación de varios procesos, como precipitación, reemplazo y disolución de minerales. Su desarrollo implica el reemplazo progresivo de cristales y la incorporación de oxhidrilos en las estructuras minerales dando lugar a un aumento del volumen en la roca. Conclusiones similares son mencionadas por Cogulu y Laurent (1984), quienes estudiaron vetillas de crisotilo en un yacimiento en Quebec, que presenta similitudes con mina La Bélgica, tanto genéticas como mineralógicas y morfológicas. Estas últimas son de fundamental importancia en la evaluación de estos materiales al momento de definir su disposición final.

A partir de enero de 2003, entró en vigencia la resolución N° 823 del Ministerio de Salud prohibiéndose, en todo nuestro país, la producción, importación, comercialización y uso de fibras de asbesto variedad crisotilo y productos que las contengan. Como consecuencia, todas las minas que explotaban crisotilo debieron cesar su producción. Sin embargo en la actualidad, sus escombreras y relaves han quedado expuestos a los agentes exógenos, implicando un potencial riesgo para la salud de las personas que residen en poblados cercanos. Teniendo en cuenta que las fibras de crisotilo en la actualidad se encuentran distribuidas en las escombreras, con posibilidades de dispersarse fácilmente por largas distancias, los resultados obtenidos en este estudio deberían ser tenidos en cuenta en futuros monitoreos ambientales en los alrededores de la mina.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Agencia Nacional del Promoción Científica y Tecno-

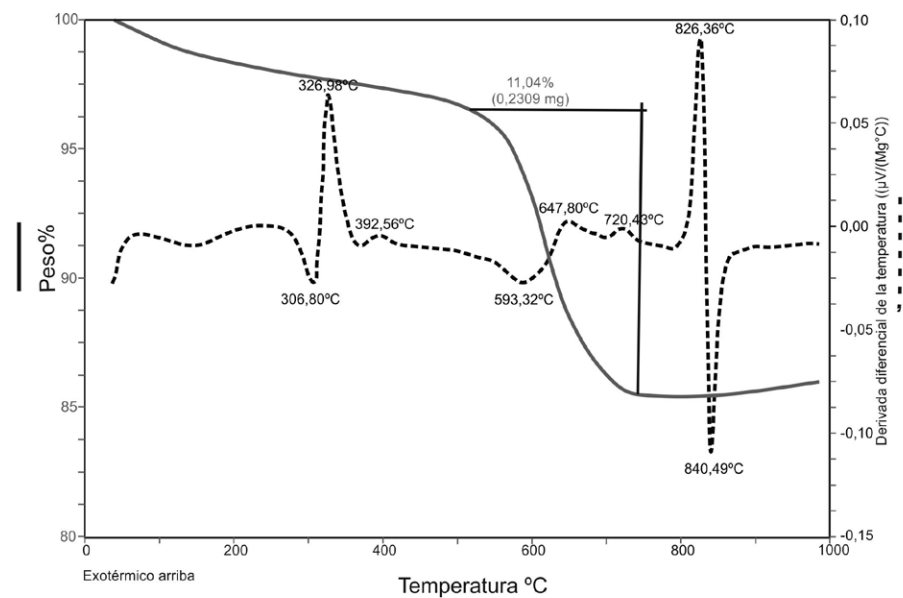


Figura 8: Análisis térmico gravimétrico y térmico diferencial del crisotilo de la mina La Bélgica.

lógica, a la Universidad Nacional del Sur, a la Universidad Nacional de Córdoba, a la Secretaría de Minería de Córdoba y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires por el apoyo brindado.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aiassa, D.J. y Ferreira Centeno, J.P. 1985. Estudio petrológico de la serpentinita de Árbol Seco. Trabajo final, Carrera de Geología. Universidad Nacional de Córdoba (inédito), 60 p., Córdoba.
- Angelelli, V., Schalamuk, I. y Fernández, R. 1980. Los yacimientos no metalíferos y rocas de aplicación de la región Centro - Cuyo. Secretaría de Estado de Minería. Anales 19, 261 p., Buenos Aires.
- Anzil, P., Guerreschi, A. y Martino, R.D. 2014. Las rocas ultramáficas de la Sierra de Córdoba. En: Martino, R.D. y Guerreschi, A.B. (eds.): 19° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: Geología y recursos naturales de la provincia de Córdoba: 129-150, Córdoba.
- Bonalumi, A.A. y Gigena, A.A. 1987. Relación entre las metamorfitas de alto grado y las rocas básicas y ultrabásicas del departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. Revista de la Asociación Geológica Argentina 42:73-78.
- Brindley, G.W. y Zussman, J. 1957. A structural study of the thermal transformation of serpentine minerals to forsterite. American Mineralogist: 42, 461 p., USA.
- Caruso, L.J. y Cherrnosky, J. Jr. 1979. The stability of lizardite. The Canadian Mineralogist 17: 757-769.
- Cogulu, E. y Laurent, R. 1984. Mineralogical and chemical variations in chrysotile veins and peridotite host-rocks from the asbestos belt of southern Quebec. Canadian Mineralogist 22: 173-183.
- D'Aloia, M. y Bianucci, A. 1969. Estudio geológico minero del yacimiento de cromita "Atos-Pampa", (pedanía Los Reartes, departamento Calamuchita, provincia de Córdoba), 4° Jornadas Geológicas Argentinas, Actas 1: 253-268.
- Díaz, F.G. y Andrade, R. 1973. Comunicación acerca de las características petrogenéticas del cuerpo serpentínico de Bosque Alegre. Boletín de la Asociación Geológica de Córdoba 2: 48-60.
- Di Fini, A. 1957. Cromita, descripción mineralógica, ubicación de yacimientos. Dirección Provincial de Minería (inédito), 60 p., Córdoba.
- Duflho, A.C. 1985. Estudio petro-estructural de la serpentinita 25 de Mayo. Trabajo Final, Carrera de Geología. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba (inédito), 70 p., Córdoba.
- Escayola, M.P. 1994. La faja ultramáfica de la Sierra Grande de Córdoba entre Inti Yaco y Estancia San Miguel, Provincia de Córdoba, Re-

- pública Argentina. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba (inédita), 227 p., Córdoba.
- Escayola, M.P. 1997. Evolución metamórfica de la secuencia ophiolítica de la faja ultramáfica occidental de las Sierras Pampeanas de Córdoba entre los 31° 50' y 32°30' de latitud sur. República Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 52: 322-332.
- Escayola, M.P. y Kraemer, P.E. 2003. Significado geotectónico de las suturas de Sierras Pampeanas Orientales en la faja orogénica Córdoba: Posible correlación con orógenos brasileños. Revista Brasileira de Geociencias 33 (1-Suplemento): 69-76.
- Escayola, M.P., Pimentel, M. y Annstrong, R. 2007. Neoproterozoic backarc basin: sensitive high-resolution ion microprobe D-Pb and Sm-Nd isotopic evidence from the Eastern Pampean Ranges, Argentina. Geology 35: 495-498.
- Fernández Gianotti, J. 1972. Diferenciación metamórfica en el contacto de la serpentinita del Cerro Los Guanacos, departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 123-134.
- Hodgson, A.A. y Robertson, R.H.S. 1972. Mineral industries in differential thermal analysis. International center for diffraction data (ICDD) 1986. Mineral powder diffraction file. Data book. Swarthmore, 1391 p., Pennsylvania.
- International Center for Diffraction Data (ICDD) 1993. Mineral powder diffraction file. Databook, Park Lane. Swarthmore, 2389 p., Pennsylvania.
- Kraemer, P., Escayola, M. y Martino, R. 1995. Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30°40' - 32°40'LS). Revista de la Asociación Geológica Argentina 50: 47-59.
- Martino, R.D., Guerreschi, A.B. y Anzil, P.A. 2010. Metamorphic and tectonic evolution at 31° 36'S across a deepcrustal zone from the Sierra Chica of Córdoba, Sierras Pampeanas, Argentina. Journal of South American Earth Sciences 30: 12-28.
- Merenko, B.Y. 1958. The genesis of chrysotile asbestos. Transaction Academy of Science USSR (Transaction by Geological Survey Canada), 22 p., Canada.
- Mutti, D.L. 1992a. Las rocas ultrabásicas y básicas de la provincia de Córdoba: interpretaciones geoquímicas e implicancias geotectónicas. 1° Reunión de Mineralogía y Metalogenia, Actas 2: 411-432. La Plata.
- Mutti, D.L. 1992b. El Complejo gabro peridotítico de Bosque Alegre, provincia de Córdoba. Revista de la Asociación Geológica Argentina 47: 153-167.
- Mutti, D.L. 1999. Depósitos de cromitas de Córdoba. En: Zappettini, E. (ed.) Recursos Minerales de la República Argentina, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 193-206, Buenos Aires.
- Mutti, D.L. y Di Marco, A.C. 1992. Asociación serpentinita anfibolita: unidades cogenéticas dominantes de las fajas ultrabásicas central y oriental de Córdoba, Argentina. 1° Reunión de Mineralogía y Metalogenia, Actas 2: 433-448, La Plata.
- O'Hanley, D.S. y Wicks, F.J. 1995. Conditions of formation of lizardite, chrysotile and antigorite, Cassiar, British Columbia. Canadian Mineralogist 33: 753-773.
- Pages, C. y Ré, N. 1953. Estudio geológico-minero de las minas de cromita "Los Guanacos", "El Rodeo", "UmePay" y "Árbol seco" departamento Calamuchita, provincia de Córdoba. Dirección General de Fabricaciones Militares (inédito), 41 p., Buenos Aires.
- 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., Nicolas, 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.
- Sfragulla, J., Bonalumi, A., Briolini, N. y Cabrerá, J. 2009. Prospección de rocas ultrabásicas de Córdoba, orientada a su aplicación industrial. Actas del 9° Congreso Argentino de Geología Económica, Actas: 287-292, Catamarca.
- Villar, L.M. 1975. Las fajas y otras manifestaciones ultrabásicas en la Rep. Argentina y su significado metalogenético. Congreso Iberoamericano de Geología Económica, Actas 3: 135-156.
- Villar, M.L. 1985. Las fajas ultrabásicas argentinas, tipos de ultrabásicas y Metalogenia. 4° Congreso Geológico Chileno, 610-633, Antofagasta.
- Wicks, F.J. y Whittaker, E.J.W. 1977. Serpentinite textures and serpentinization. Canadian Mineralogist 15: 459-488.
- Wicks, F. y O'Hanley, D. 1988. Serpentine minerals: structures and petrology. En: Bailey S.W. (Ed.). Hydrated phyllosilicates (exclusive of micas). Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America 19: 91-167.

Recibido: 02 de diciembre, 2014

Aceptado: 10 de junio, 2015