

HETEROGENEIDADES TEXTURALES Y COMPOSICIONALES EN PRODUCTOS PIROCLÁSTICOS DE LA ERUPCIÓN DE 1960 DEL SISTEMA CORDÓN CAULLE (40°30'S, 72°10'O)

Romina DAGA^{1,2}, Antonio CASTRO³, Jesús DE LA ROSA³, Sergio RIBEIRO GUEVARA¹, M. Lidia SÁNCHEZ⁴ y María ARRIBÉRE¹

¹ Laboratorio de Análisis por Activación Neutrónica, Centro Atómico Bariloche, CNEA, Río Negro, E-mails: romina@cab.cnea.gov.ar, ribeiro@cab.cnea.gov.ar, arribere@cab.cnea.gov.ar

² CONICET.

³ Departamento de Geología, Universidad de Huelva, Huelva, España. E-mails: dorado@uhu.es, jesus@uhu.es

⁴ Departamento de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba. E-mail: msanchez@unrc.edu.ar

RESUMEN

Los depósitos de cenizas volcánicas son excelentes marcadores estratigráficos y cronológicos ya que pueden ser dispersados a cientos de kilómetros de su fuente. Sin embargo, su correlación puede ser problemática. Si bien la mayoría de los estudios basan estas correlaciones en análisis geoquímicos de roca total, las partículas volcánicas juveniles poseen gran heterogeneidad en cuanto a la forma de los fragmentos, textura y composición de la matriz y las fases minerales. Trabajos previos en niveles volcánicos identificados en una secuencia del lago Nahuel Huapi permitieron identificar los productos de la erupción del año 1960 del Sistema Cordón Caulle, presentando una gran variabilidad en el tipo de partículas volcánicas juveniles identificadas, como pómez blanca, marrón, escorias y trizas vítreas, con variaciones en la composición de roca total de cada tipo de partícula. Con esta información como base, en el presente trabajo se presentan los primeros análisis morfológicos, texturales y composicionales de los diferentes productos juveniles con el objeto de identificar el origen de las variaciones morfológicas y de geoquímica de roca total de las mismas. Los resultados permitieron asociar dichas diferencias a variaciones en el contenido de cristales y tamaño, forma y distribución de vesículas. Dicha variación, a su vez, fue relacionada a procesos de fraccionamiento previos a la erupción de 1960 del Sistema Cordón Caulle, generando información de valiosa utilidad para el uso de estos niveles como marcadores cronoestratigráficos.

Palabras clave: *Cenizas volcánicas, textura, geoquímica, datación, lagos.*

ABSTRACT

Textural and compositional heterogeneities in pyroclastic products from 1960 Cordón Caulle eruption (40°30'S, 72°10'W).

Volcanic ash deposits are excellent stratigraphical and chronological markers as they can be dispersed hundreds of kilometers from its source, but sometimes the correlation with the source can be problematic. While most of the studies support these correlations in whole rock geochemical analyses, juvenile volcanic particles have great heterogeneity in fragment shapes, texture, and groundmass and mineral phases composition. Previous works on volcanic deposits identified in a lacustrine sedimentary sequence of lake Nahuel Huapi allowed the identification of products from the 1960 Cordón Caulle volcanic complex eruption, showing high variability in the juvenile volcanic particles, like white and brown pumice, scoria and glass shards, with variation in the whole rock composition. With this information as a background, this paper presents the first morphological, textural and compositional analyses of different juvenile products in order to identify the origin of morphological and whole rock geochemical variations. The results allowed the association of such differences with variations in crystal content and size, shape and distribution of vesicles. Such variations, in turn, were related to processes of fractionation previous to the 1960 Cordón Caulle eruption, thus providing valuable information to use these layers as chronostratigraphic markers.

Keywords: *Volcanic ashes, texture, geochemistry, dating, lakes.*

INTRODUCCIÓN

La gran variabilidad de procesos actuando durante un evento eruptivo queda

reflejada en los diferentes productos piroclásticos generados, los cuales pueden ser dispersados a grandes distancias. La fracción fina de estos productos puede

alcanzar cientos a miles de kilómetros desde su fuente, por lo cual su correlación con la contraparte proximal puede ser problemática, pero a su vez de consi-

derable utilidad con propósitos cronológicos (Boygle 1999, Machida 1999, Shane 2000, Pollard *et al.* 2006). Por otra parte, la caracterización textural de los productos piroclásticos se ha convertido en una herramienta fundamental para el estudio de los procesos físicos que controlan los estilos eruptivos en erupciones explosivas (Polacci *et al.* 2001, Rosi *et al.* 2004, Lautze y Houghton 2007).

Los depósitos piroclásticos primarios pueden formar delgadas cubiertas sobre una amplia variedad de ambientes, entre ellos cuerpos de agua, en los cuales la ausencia de procesos modificadores fuertes permite el desarrollo de un registro sedimentario continuo como también la preservación de las características texturales, químicas y petrográficas de los materiales que alcanzan el fondo de un lago (Olago *et al.* 2000). El estudio previo de secuencias sedimentarias lacustres recientes en áreas de Patagonia Norte, muy influenciadas por los volcanes activos de la Zona Volcánica Sur, ha demostrado la presencia de numerosos niveles piroclásticos primarios y volcániclos resedimentados sineruptivos, ofreciendo la posibilidad de ser utilizados como herramientas de fechado. En particular, en el sitio Brazo Rincón (lago Nahuel Huapi), fueron identificados 4 niveles piroclásticos primarios, de los cuales 3 fueron asociados a la actividad eruptiva histórica del Sistema Fisural Cordón Caulle (CC; parte del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle; Daga *et al.* 2006). La diversidad en las partículas volcánicas juveniles identificadas en dichos estudios, representadas por trizas vítreas, fragmentos pumíceos blancos y marrones, y partículas escoriáceas, refleja la complejidad de los procesos actuantes durante un único evento. La correlación de los niveles volcánicos se llevó a cabo principalmente a través de la geoquímica de la fracción vítrea, ya que provee la información más representativa de la fuente y no cambia con la distancia a la misma (Ortega-Guerrero y Newton 1998). Pero la caracterización geoquímica de los demás fragmentos primarios mostró composiciones elementales ligeramente diferentes para cada tipo de

partícula correspondiente a una misma erupción (Daga *et al.* 2006, Daga 2009). Con el objeto de analizar el origen de estas variaciones morfológicas y geoquímicas en partículas correspondientes a un único evento volcánico se plantea la realización del análisis textural de los diferentes tipos de fragmentos del nivel piroclástico lacustre correspondiente a la erupción del año 1960 del Sistema Cordón Caulle. El mismo se realizó mediante observaciones macroscópicas, microscopía electrónica de barrido y análisis geoquímicos puntuales mediante microsonda de electrones, principalmente para propósitos de fechado y correlación con otros ambientes donde sean identificados los depósitos de esta erupción.

MARCO GEOLÓGICO

El lago Nahuel Huapi es el lago de origen glacial de mayor importancia dentro del Parque Nacional Nahuel Huapi (PN-NH), comprendido en las provincias de Neuquén y Río Negro (Fig. 1), sector norte de Patagonia. El Brazo Rincón corresponde al más septentrional de los brazos del lago Nahuel Huapi, localizándose a 40°44' S y 71°46' O, en el sector noroeste del Parque Nacional en la provincia de Neuquén. La zona de Patagonia Norte está localizada en la Zona Volcánica Sur (ZVS) de los Andes (Stern 2004) (Fig. 1), la cual se extiende desde los 33° a los 46° de latitud Sur e incluye numerosos volcanes activos desde el Mioceno al presente. El Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, el complejo Carrán-Los Venados, y los volcanes Osorno y Calbuco son sistemas volcánicos cercanos a la zona de estudio y han estado activos durante los últimos miles de años. Consecuentemente, estos volcanes constituyen una potencial fuente de cenizas volcánicas a los lagos. Diversas erupciones volcánicas han sido registradas en documentos históricos y literatura científica desde los inicios del siglo XVI (Gerlach *et al.* 1988, Tormey *et al.* 1991, López Escobar *et al.* 1992, González-Ferrán 1995, Petit-Brehuil Sepúlveda 2004). El Complejo Volcánico Puyehue-Cordón

Caulle (CVPCC) es el sistema que se encuentra más cercano al Brazo Rincón del lago Nahuel Huapi, aproximadamente 50 km hacia el noroeste, dirección predominante de los vientos en la zona. Exceptuando la erupción comenzada el 4 de junio de 2011 (y que continúa hasta el momento del envío del presente trabajo), el evento eruptivo más reciente del Sistema Cordón Caulle correspondía al año 1960. La erupción de 1960 comenzó 38 horas después del gran sismo de M 9,5 registrado en la zona de Valdivia, Chile. Las observaciones directas indican que la erupción consistió de un fase sub-Pliniana de vapor de agua, ceniza y pómez que alcanzó una altura de 8.000 m, seguido por la extrusión de flujos de lava riolítica de 20 m de espesor. Vientos predominantemente del O y NO transportaron la ceniza y lapilli pumíceo hacia el sector argentino, principalmente el área del Nahuel Huapi (González-Ferrán 1995, Lara *et al.* 2004, Singer *et al.* 2008).

METODOLOGÍA

Los materiales volcánicos analizados provienen del nivel de tefra asociado a la erupción del año 1960 de Cordón Caulle, identificado en una secuencia sedimentaria de fondo de lago extraída del sitio Brazo Rincón mediante un muestreador de gravedad (Daga *et al.* 2006). El análisis se llevó a cabo sobre los diferentes tipos de partículas identificados en el nivel volcánico de interés, como fragmentos pumíceos blancos y marrones, partículas escoriáceas y trizas vítreas, en la fracción correspondiente a cenizas (<2 mm). La identificación y separación de cada tipo de partícula se realizó mediante lupa binocular y para su caracterización morfológica se utilizó un microscopio electrónico de barrido Philips SEM 515 (Centro Atómico Bariloche) bajo condiciones de voltaje de aceleración de 10 kV. Para el análisis textural, las partículas fueron montadas en una resina para la preparación de una pastilla, la cual posteriormente fue pulida y recubierta con una cobertura de carbón para su análisis mediante un microscopio electrónico de barrido

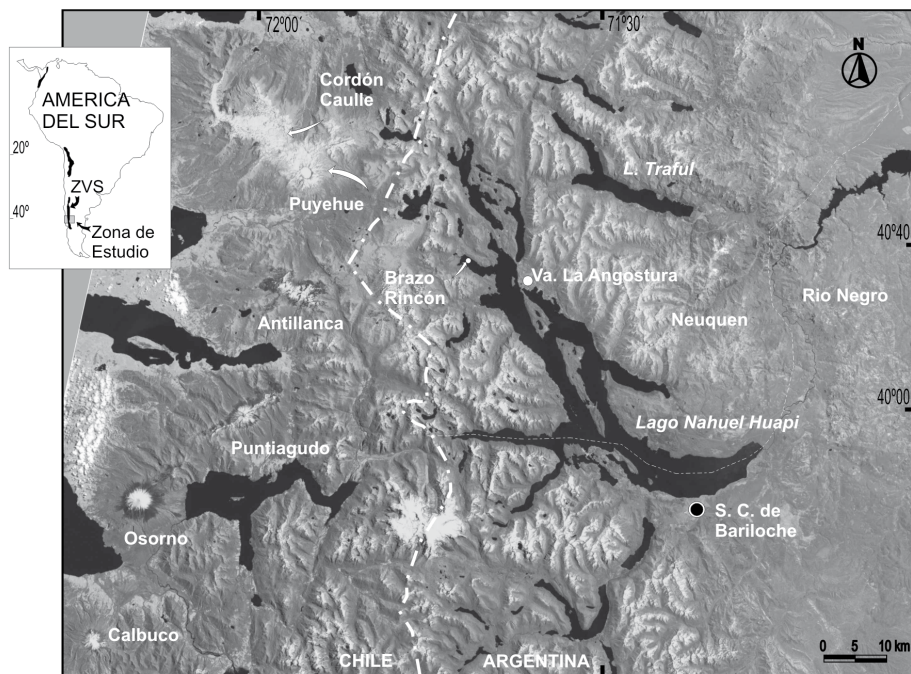


Figura 1: Ubicación del lago Nahuel Huapi y volcanes de la Zona Volcánica Sur cercanos al área de estudio.

JEOL JSM-5410 (Universidad de Huelva, España) equipado con un detector de energía dispersiva (EDS). Esto permitió la identificación de las texturas asociadas a los diferentes tipos de partículas, según contenido de cristales y grado de vesiculación. Las composiciones puntuales de interés (matriz vítrea y fases minerales de diferentes tipos de partículas) fueron determinadas mediante análisis de microsonda de electrones en la muestra pulida mediante un equipo JEOL JXA-8200 (Universidad de Huelva, España) bajo condiciones de voltaje de aceleración de 15 kV y una corriente de sonda de 5 nA.

RESULTADOS

Caracterización morfológica externa

Entre las partículas volcánicas juveniles del nivel asociado al evento eruptivo del año 1960 del Sistema Cordón Caulle se reconocieron fragmentos pumíceos blancos y marrones, partículas escoriáceas y trizas vítreas, variables en forma y tamaño.

Partículas pumíceas blancas y marrones (Figs. 2a-e): Las partículas de pómez blanca poseen formas irregulares a subredondeadas, variando según el tipo de vesículas

dominantes, con vesicularidad moderada a muy alta. Las vesículas varían en tamaño y forma, desde esféricas de muy pequeño diámetro, alrededor de 4-5 μm , con paredes muy delgadas, hasta elongadas de decenas de μm , y otras de formas tortuosas. Los fragmentos en los que dominan las vesículas esféricas y subsféricas poseen formas irregulares a subredondeadas, textura sacaroide y brillo vítreo (Fig. 2a). Aquellos en los que predominan las vesículas elongadas, con formas tubulares tienen formas irregulares pero alargadas en una dirección, generando una marcada textura fluidal y brillo sedoso en los fragmentos (Fig. 2b). Es común la presencia de vesículas deformadas, tortuosas, producto de la coalescencia de burbujas generando fragmentos de formas irregulares (Fig. 2c). En observaciones macroscópicas y bajo lupa se distinguen, en las partículas de tamaño de grano más grueso, inclusiones de minerales máficos. Las partículas pumíceas marrones se encuentran en menor proporción con respecto a los fragmentos pumíceos blancos. Poseen similares características morfológicas a las descritas para la pómez blanca, pero de coloración variable entre marrón claro a algo más oscuro,

y con vesicularidad moderadas. Poseen brillo ligeramente vítreo o son opacos en algunos casos.

Trizas vítreas (Figs. 2f-g): Se identificaron diferentes tipos de partículas vítreas generadas por la variación en el tamaño y forma de las vesículas, como trizas vítreas pumíceas, planas y cuspadas, y en formas de bloques. Las trizas vítreas pumíceas (“*pumice shards*”) comprenden partículas vítreas con texturas vesiculares (Fig. 2f) y otras de textura fluidal, de color marrón y brillo vítreo. Tienen granulometría menor a los fragmentos de pómez y menor grado de vesicularidad. Las partículas de textura vesicular poseen formas subredondeadas a irregulares, dependiendo de la variación de tamaño y forma de las vesículas dominantes. Los bordes son irregulares, con límites cóncavo-convexos correspondientes a paredes de burbujas, muy delgadas en algunos fragmentos. Las formas más irregulares están generadas por la presencia de vesículas de formas tortuosas, formadas por la coalescencia de burbujas. En algunos casos se identificaron microcristales en la matriz vítrea. Las trizas planas (“*platy shards*”) y cuspadas (“*cusped shards*”, “*X o Y-shaped*”) son generalmente masivas, translúcidas y con brillo vítreo, y corresponden a fragmentos de paredes de burbujas. Las trizas masivas, en forma de bloques (“*blocky shards*”), son de color marrón y se encuentran en proporciones menores a las caracterizadas anteriormente, pero son de importancia debido a sus implicancias genéticas (Fig. 2g). En fracciones granulométricas más pequeñas estas partículas son translúcidas. Son fragmentos de formas irregulares, con aristas bien marcadas y superficies de fracturas concoidales o curviplanares, poseen brillo lustroso en fragmentos gruesos mientras que las trizas más pequeñas muestran brillo vítreo. Por su coloración no es posible observar inclusiones minerales en su interior.

Partículas escoriáceas (Figs. 2h-i): Este tipo de partículas se encuentra presente en proporciones menores a las restantes partículas. Poseen formas irregulares a subredondeadas, con superficies suaves o irregulares, bordes cóncavo-convexos,

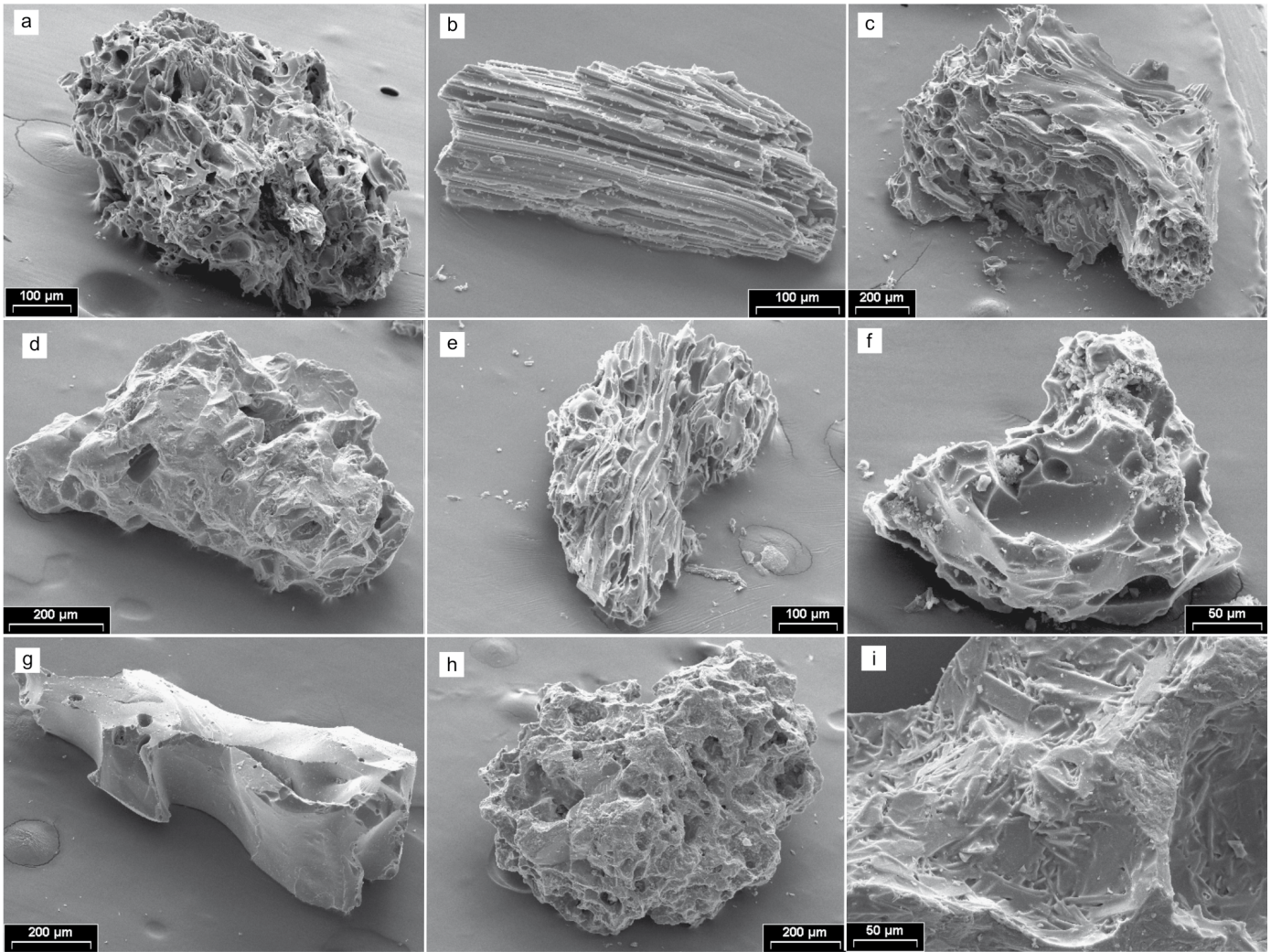


Figura 2: Imágenes de microscopio electrónico de barrido mostrando las morfologías externas de los diferentes tipos de partículas identificadas para el evento del año 1960 del Sistema Cordón Caulle: a), b) y c) Partícula pumícea blanca vesicular, fluidal y combinada, respectivamente. d) y e) Partícula pumícea marrón vesicular y fluidal, respectivamente. f) y g) Triza vítrea vesicular y en bloque, respectivamente. h) y i) Fragmentos escoriáceos.

coloración desde gris oscuro a negro con brillo metálico en algunos casos, mientras que algunos fragmentos muestran rasgos de alteración con tonalidades rojizas. Presentan un grado de vesicularidad moderado a bajo, con dominio de vesículas esféricas de tamaños variables, desde 10-20 hasta 400 μm , según la granulometría de partículas considerada.

Textura y química mineral

Las partículas pumíceas blancas y marrones poseen diferentes texturas y asociaciones minerales. Al igual que fue observado en la morfología externa, los fragmentos pumíceos blancos poseen textura interna vesicular, con vesicularidad alta a muy alta, y un amplio rango de

tamaño, forma y distribución de las vesículas. Las partículas subredondeadas poseen un dominio de vesículas esféricas a subsféricas variables en tamaño en un rango entre 3-4 μm y 90-100 μm . En las partículas en las que abundan las vesículas subsféricas, éstas tienen una elongación preferencial. En otros fragmentos coexisten tanto vesículas esféricas, subsféricas, como tortuosas. Las partículas de forma irregular poseen una textura fluidal muy marcada, con vesicularidad muy alta y dominio de vesículas elongadas, tortuosas en algunos casos (Fig. 3a). Los clastos pumíceos blancos contienen glómerulos de fenocristales de plagioclasa con tamaños mayores a 300 μm , piroxenos cuhbrales a subhbrales de tamaño

entre 150-250 μm , con inclusiones de pequeños cristales con tamaños entre 40-80 μm de óxidos de Fe-Ti (Fig. 3a) y apatita con secciones basales de aproximadamente 15 μm . Estos granos minerales forman agregados que se encuentran inmersos en las partículas pumíceas, rodeados por vidrio, generando una textura glomeroporfírica. No se observaron microlitos inmersos en dicha matriz.

Las partículas pumíceas marrones poseen una textura interna diferente a las blancas (Fig. 3b). La matriz presenta una vesicularidad moderada, con dominio de vesículas esféricas ligeramente elongadas y presencia de microlitos tabulares y algunos esqueletales de plagioclasa y, en menor medida, anfíboles contenidos

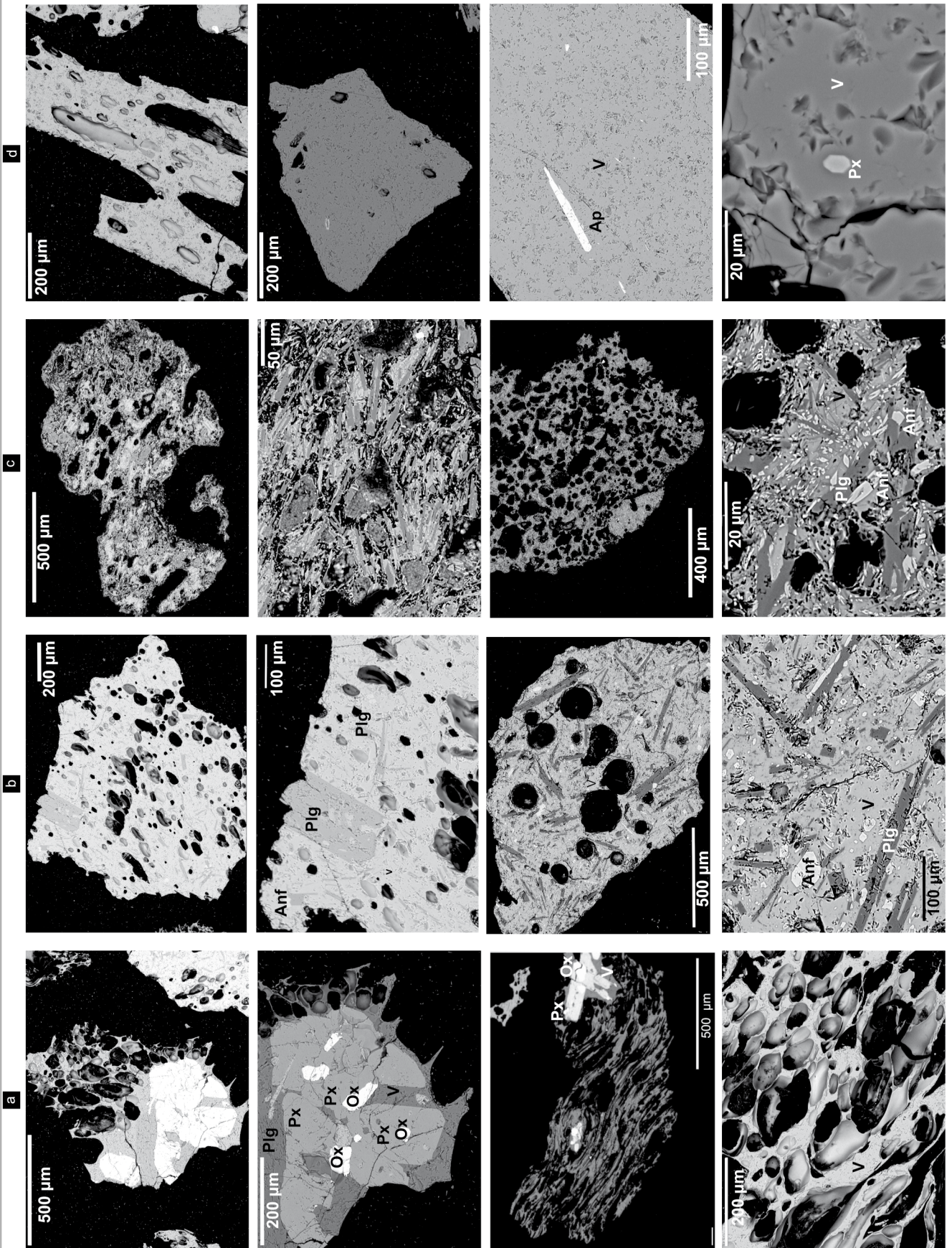


Figura 3: Imágenes de electrones retrodispersados en microscopio electrónico de barrido: a) Partículas pumíceas blancas. b) Partículas pumíceas marrones. c) Partículas escoriáceas. d) Trizas vítreas. Imágenes de fragmentos enteros y sus detalles; V: vidrio, Plg: plagioclasa, Px: piroxeno, Ox: Óxido Fe-Ti, Anf: anfíbol, Ap: apatita.

en la matriz, generando una textura porfírica (Fig. 3b). Los cristales de plagioclasa conforman dos poblaciones de tamaños diferentes, los más grandes poseen aproximadamente 250-300 μm , mientras que los microlitos, más abundantes que los anteriores, tienen tamaños entre 30-70 μm . No se observa ninguna orientación preferencial de los microcristales ni presencia de los glomérulos observados en la pómez blanca.

Los fragmentos escoriáceos, de vesicularidad moderada, poseen mayor cantidad de cristales en la matriz vítrea, tanto euhedrales como fragmentos de cristales de plagioclasa, anfíboles, piroxenos y en menor proporción, óxidos de Fe-Ti, en algunos casos muestran alineamiento mientras que en otros están distribuidos irregularmente. La elevada cantidad de estos cristales, aproximadamente 70-80%, hace que la proporción de matriz vítrea sea baja, complicando en algunos casos las mediciones composicionales del vidrio (Fig. 3c). Las trizas vítreas poseen una textura masiva con vesicularidad moderada a baja, con escasos microlitos inmersos en la matriz, compuestos por cristales euhedrales de apatita de aproximadamente 100 μm , piroxenos de alrededor de 20 μm y óxidos de Fe-Ti de unos pocos μm .

En el cuadro 1 se muestran los análisis realizados en las diferentes fases minerales de los distintos tipos de partículas. Puede observarse que la fase mineral común a los dos tipos de partículas pumíceas, las plagioclasas, poseen diferencias composicionales. Las analizadas en las partículas pumíceas marrones son más cálcicas (56-77% An) que las presentes en las pómez blancas, las cuales contienen ~36% de An. Por otra parte, los piroxenos presentes en las pómez blancas corresponden tanto a piroxenos ricos en Ca como también a otros con contenidos de Ca menores a 2% (Cuadro 1). Los microcristales de óxidos de Fe-Ti de las trizas vítreas son comparables a los analizadas en las pómez blancas.

Geoquímica de roca total

En el cuadro 2 se muestran los análisis

geoquímicos de los distintos tipos de partículas (modificado de Daga *et al.* 2006). Los análisis de partículas de pómez blanca corresponden a diferentes granulometrías y muestran poca variación en las concentraciones de elementos mayoritarios y trazas (Cuadro 2), con contenidos de sílice variando entre 66-69% en peso. Una variación más amplia se observa en el Cr, Zn y, en menor medida, Co para las diferentes pómez blancas analizadas. Las pómez marrones, por su parte, muestran una variabilidad mucho más amplia, con contenidos de sílice variando entre 54-62% en peso. Esta diferencia composicional también se observa en los restantes elementos trazas y tierras raras. Ninguna de las muestras de pómez marrón analizadas alcanza los contenidos de sílice de las partículas pumíceas blancas, mientras que las trizas vítreas analizadas, con 70% en peso de SiO_2 , son similares a estas últimas. Los fragmentos escoriáceos poseen una composición de roca total más básica, con contenidos de SiO_2 entre 52-54%, similar al extremo básico de la pómez marrón. Estas diferencias composicionales fueron asignadas previamente a posible presencia de mayor contenido de fenocristales máficos en la matriz de los fragmentos (Daga *et al.* 2006).

Geoquímica del vidrio

El análisis individual de las partículas permitió determinar la composición del vidrio para las partículas pumíceas blancas, marrones y trizas vítreas (Cuadro 1). La matriz vítrea de la pómez blanca muestra contenidos de sílice más elevados que la composición de roca total de las partículas, variando entre 69-73,8% SiO_2 , y con un rango menor de contenidos de álcalis (Cuadros 1 y 2).

La mayor diferencia fue observada en la composición de la matriz vítrea de los fragmentos pumíceos marrones con respecto a su composición de roca total, con contenidos de sílice que no superan los 56,4% SiO_2 . Estas concentraciones son similares al extremo más básico identificado mediante el análisis de roca total, cuyos valores oscilan entre 54-55% SiO_2 . De las partículas marrones tomadas al

azar, no fueron identificadas partículas con composiciones más silíceas, como se esperaba por la composición de roca total. La composición de la matriz de las trizas vítreas mostró concentraciones de elementos mayoritarios similares a los obtenidos mediante el análisis de roca total de las partículas, con valores que varían entre 68,8 y 71% SiO_2 .

La variabilidad en el tipo de partículas identificadas y las diferencias geoquímicas entre ellas puede plantear la posibilidad de mezcla de productos de diferentes volcanes en un mismo depósito. En este caso, por ejemplo, el nivel de tefra correspondiente a la erupción de 1960 del Sistema Cordón Caulle podría contener productos de la erupción de 1961 del volcán Calbuco, ya que esta diferencia temporal no es distinguible en una secuencia sedimentaria lacustre. Considerando esta posibilidad, los diagramas de óxidos mayoritarios de la figura 4 muestran las composiciones de roca total y matriz vítrea de los diferentes tipos de fragmentos analizados, conjuntamente con las composiciones de los productos del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (CVPCC, Gerlach *et al.* 1988, Singer *et al.* 2008) y del volcán Calbuco (López Escobar *et al.* 1992). Como puede observarse en todos los gráficos, tanto la pómez blanca y trizas vítreas como los vidrios en cada una de las mismas se adaptan a un tren de evolución magmática afín a la serie del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle. Los materiales analizados muestran un rango de SiO_2 desde andesitas a rolitas, aunque se observa un gap para rangos de SiO_2 entre 57-66% que separa, por un lado, las pómez blancas y trizas, de las escorias (Figs. 4a-c). Este gap coincide con la menor abundancia de valores de SiO_2 para el mismo rango en la serie del complejo volcánico en estudio. Las escorias y las pómez se proyectan en una cotéctica calcoalcalina que se superpone al tren general de este complejo volcánico (Fig. 4d). Las pómez y las trizas representan líquidos altamente diferenciados de un magma parental andesítico. El material más máfico está representado por las escorias y la pómez marrón, y se

CUADRO 1: Análisis químicos de matriz vítrea y fases minerales para diferentes tipos de partículas.

	Pómez Blanca												
	Vidrio				Piroxeno					Plagiocl	Óxido de Fe-Ti		Apatita
SiO ₂	73,07	71,38	73,77	69,05	52,19	51,77	50,76 ¹	50,04 ¹	51,26 ¹	60,80	0,10	0,11	0,56
TiO ₂	0,52	0,412	0,39	0,47	0,38	0,40	0,17	0,31	0,13	0,041	18,35	18,22	-
Al ₂ O ₃	14,45	14,39	14,28	13,36	1,04	0,81	-	-	0,16	25,57	1,86	1,74	0,04
Fe ₂ O ₃	3,05	3,24	2,83	2,90	13,89	14,66	28,89	29,70	29,03	0,50	70,98	70,93	0,57
MnO	0,06	0,09	0,11	0,06	0,67	0,7	1,19	1,37	1,43	-	0,63	0,63	0,1
MgO	0,26	0,38	0,23	0,31	12,28	12,14	16,66	16,02	15,88	0,02	1,51	1,51	0,14
CaO	1,42	1,51	1,40	1,40	18,88	18,26	1,76	1,83	1,86	6,82	0,15	0,19	52,92
Na ₂ O	2,13	2,32	1,80	1,54	0,31	0,31	0,42	0,57	0,26	6,43	0,014	-	0,09
K ₂ O	2,80	2,86	2,83	2,78	-	0,004	0,06	0,01	-	0,381	0,011	-	0,096
P ₂ O ₅	0,068	0,07	0,078	0,055	0,003	-	-	-	-	-	-	0,005	41,02
Cr ₂ O ₃	0,212	-	-	0,698	-	-	0,11	0,16	-	-	0,053	1,909	-

Análisis determinados mediante microsonda de electrones. Óxidos en %.

¹ Columna de datos de EDS recalculados a 100%

corresponderían con dicho magma parental andesítico.

DISCUSIÓN

Considerando la posición del sitio de estudio con respecto a la Zona Volcánica Sur, surge la necesidad de una caracterización detallada de los diferentes tipos de partículas identificadas con el objeto de lograr una correlación con su fuente de origen. Estos primeros estudios sobre cenizas volcánicas distales, correspondientes al evento del año 1960 del Sistema Cordón Caulle, permitieron identificar las causas de las heterogeneidades texturales y composicionales observadas.

Heterogeneidad morfológica y textural

Cualquier hipótesis que se plantee con respecto a los procesos que controlan el estilo eruptivo de eventos explosivos necesita ser cuidadosamente fundamentada en análisis texturales detallados de los clastos juveniles (Polacci *et al.* 2001, Dellino *et al.* 2001). Si bien este es un estudio preliminar sobre el análisis textural de estos productos volcánicos primarios, y la información proviene del análisis de un limitado número de fragmentos de cada tipo de partícula, los resultados permitieron caracterizar la variabilidad morfológica y textural de las mismas.

La primera evidencia que surge tanto del análisis morfológico como textural es

que los diferentes tipos de pómez, escorias y trizas vítreas están caracterizados por una elevada heterogeneidad en el grado de vesicularidad y los cristales presentes. Trabajos realizados en las últimas décadas sobre los productos piroclásticos generados durante erupciones volcánicas explosivas demuestran la posibilidad de que estos diferentes tipos de partículas sean generados coetáneamente, debido a la complejidad de los procesos que ocurren tanto en la cámara magmática como durante su ascenso en el conducto, incluso en algunos casos con diferencias geoquímicas (Paulick y Franz 1997, Polacci *et al.* 2001, Scasso y Carey 2005, Kratzmann *et al.* 2009, Bouvet de Maisonneuve *et al.* 2009). Sin embargo, en ambientes volcánicos activos y con gran número de volcanes con alta frecuencia eruptiva, también es factible la mezcla de fragmentos de diferentes fuentes incorporados por retrabajo y redepositación (Donogue *et al.* 1997, Daga *et al.* 2010), lo cual también debe ser considerado en el momento de la interpretación de datos.

Distintos tipos morfológicos de trizas vítreas fueron reconocidos en este nivel, abundantes en la fracción fina, asociados tanto a fragmentación explosiva del magma como a procesos hidromagmáticos. Aquellas trizas de textura vesicular se encuentran relacionadas a la fragmentación explosiva del magma y a procesos de rotura de fragmentos vítreos mayores durante el transporte. Pero los fragmentos vítreos

con morfología de bloque y baja vesicularidad (Fig. 3d) están asociados a productos típicos de erupciones hidrovolcánicas de pequeño volumen resultado de la interacción de magma y agua meteórica (Wohletz 1983, Donogue *et al.* 1997).

Variabilidad composicional

El análisis de niveles volcánicos presentes en secuencias sedimentarias lacustres permitió identificar el evento del año 1960 del Sistema Cordón Caulle a diferentes distancias con respecto a la fuente (Daga *et al.* 2006, 2008, 2010). Dicha correlación fue basada en la caracterización geoquímica de los diferentes tipos de partículas identificadas, principalmente en la composición de la fracción vítrea, por ser el componente que refleja la composición del magma en el momento de la erupción, la cual no varía con la disminución del tamaño de grano en zonas distales a la fuente (Ortega Guerrero y Newton 1998).

Variaciones entre partícula: En estudios previos se observó que el análisis composicional de roca total de fragmentos pumíceos blancos, escoria y trizas vítreas no mostró variaciones relevantes debido a los criterios de separación de muestras o tamaño de grano (Daga *et al.* 2006). El análisis de la matriz vítrea correspondiente a las pómez blancas tampoco mostró variaciones relevantes entre los diferentes fragmentos, mientras que sí se observó diferencia con respecto a la

CUADRO 1: Continuación.

	Pómez Marrón						Trizas Vítreas				
	Vidrio			Plagioclasa		Anfíbol	Vidrio			Piroxeno	Óx Fe-Ti
SiO ₂	54,914	56,45	56,031	48,597	54,244	51,153	71,076	69,935	68,885	48,308	0,234
TiO ₂	1,404	1,414	1,367	0,032	0,066	0,845	0,567	0,583	0,536	1,046	17,838
Al ₂ O ₃	15,609	15,287	15,629	32,573	27,656	2,906	14,597	13,856	13,845	2,992	2,031
Fe ₂ O ₃	8,928	8,854	8,321	0,78	0,862	13,402	3,511	3,425	3,438	17,266	69,36
MnO	0,154	0,172	0,138	-	0,019	0,363	0,098	0,073	0,075	0,707	0,64
MgO	3,738	3,707	3,632	0,103	0,148	17,715	0,471	0,438	0,425	10,66	1,673
CaO	6,779	6,748	6,895	15,45	11,29	12,331	1,732	1,739	1,755	15,848	0,118
Na ₂ O	3,01	3,057	0,857	2,453	4,732	0,195	2,299	1,97	2,153	0,407	0,032
K ₂ O	1,357	1,373	1,303	0,053	0,183	0,005	2,775	2,803	2,783	0,061	0,006
P ₂ O ₅	0,308	0,352	0,365	0,028	0,019	0,039	0,07	0,093	0,081	0,065	-
Cr ₂ O ₃	-	0,955	0,157	-	0,245	-	-	0,481	0,026	0,09	0,001

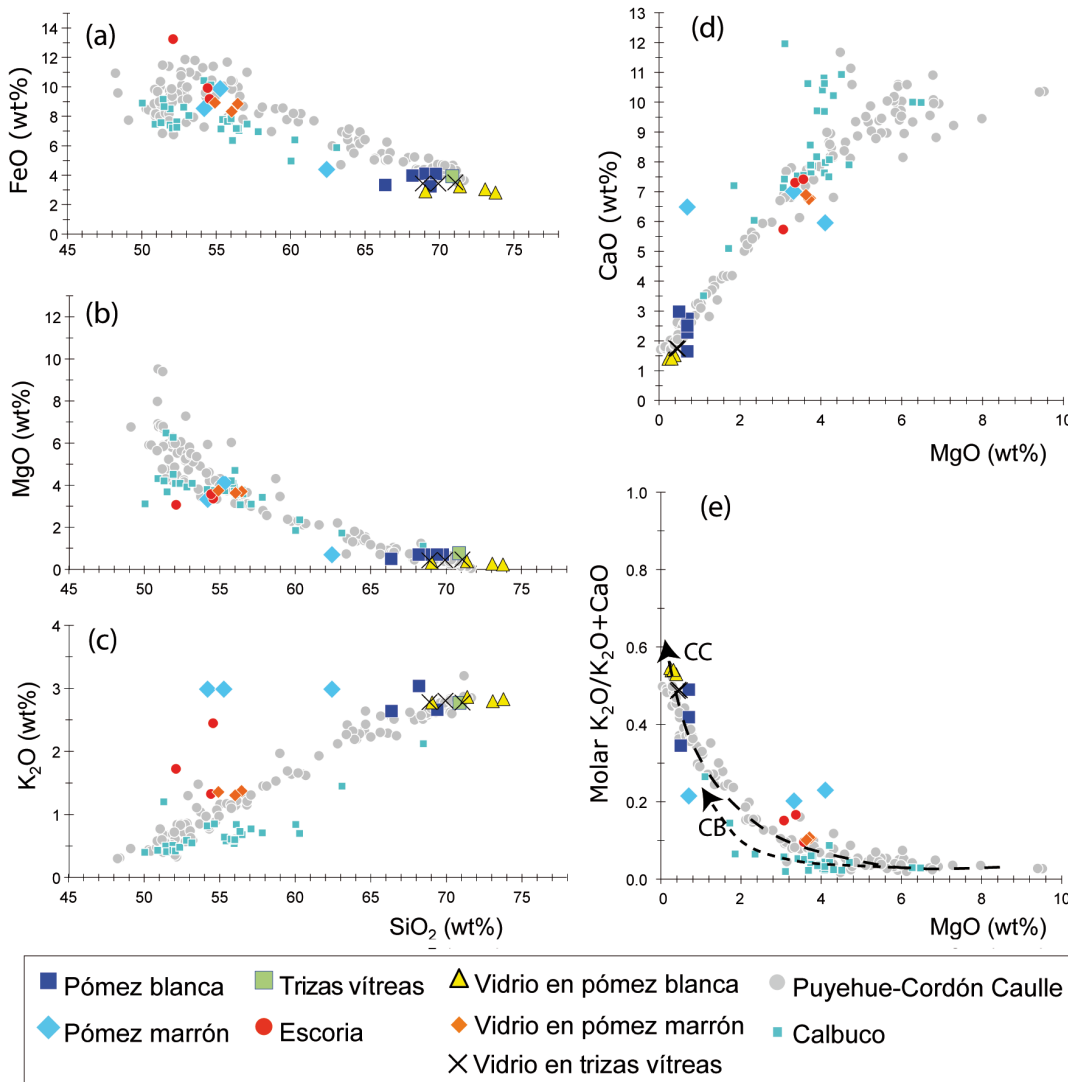


Figura 4: Diagramas geoquímicos seleccionados representando variaciones composicionales de pómez, escorias y trizas vítreas estudiadas, comparados con datos geoquímicos del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (CVPCC, datos de Gerlach *et al.* 1988 y Singer *et al.* 2008) y volcán Calbuco (datos de López Escobar *et al.* 1992). a), b) y c) Nótese el gap composicional en SiO₂ entre escorias y pómez, lo que se corresponde con el rango de menor densidad de muestras del CVPCC (puntos grises). d) En el diagrama CaO-MgO los materiales riolíticos más diferenciados se proyectan a lo largo de un tren cotéctico curvo definido por el CVPCC y característico de los sistemas calcoalcalinos. Las escorias podrían representar el magma andesítico parental a partir del cual surgiría la evolución cotéctica de los líquidos con valores progresivamente más pobres en CaO y MgO. e) Evolución de la relación de K₂O+CaO frente a MgO mostrando la disposición de los materiales analizados a lo largo de la curva de fraccionamiento del CVPCC (flecha CC) netamente distinta de la evolución paralela del sistema de Calbuco (flecha CB).

composición de roca total, con contenidos de SiO₂, en promedio, hasta 4 % más elevado (Fig. 4). Esta variación se debe a la presencia de glomérulos de fenocrista-

les inmersos en la matriz de las partículas pumíceas blancas, los cuales quedan incluidos en los análisis de roca total. En cuanto a las trizas vítreas, la composición

de la matriz se encuentra en el rango de valores obtenidos para roca total; aquí los escasos cristales inmersos no alteran de manera significativa la composición del

CUADRO 2: Análisis químicos de roca total de pómez blanca y marrón, trizas vítreas y escorias para el evento de 1960 del cordón Caulle.

Muestra	Pómez blanca			Trizas vítreas			Pómez marrón			Escorias		
	> 500 µm	> 500 µm	500-250 µm	> 500 µm	250-125 µm	500-250 µm	> 500 µm	500-250 µm	250-125 µm	> 500 µm	500-250 µm	250-125 µm
SiO ₂	69,05	69,77	68,19	66,36	69,40	70,86	62,43	54,19	55,27	54,56	54,42	52,11
Al ₂ O ₃	15,82	15,49	14,44	16,61	15,19	14,44	15,30	17,01	15,19	16,12	16,08	15,06
TiO ₂	0,65	0,71	0,57	0,63	0,58	0,57	0,87	1,27	1,30	1,62	1,87	3,77
Fe ₂ O ₃	4,10	4,09	3,97	3,33	3,25	3,93	4,39	8,54	9,88	9,19	9,92	13,25
MgO	0,70	0,70	0,70	0,50	0,70	0,77	0,70	3,32	4,10	3,36	3,57	3,07
CaO	2,74	2,28	2,51	2,98	1,65	-	6,49	7,01	5,96	7,30	7,42	5,74
Na ₂ O	5,81	5,84	5,47	5,85	5,47	5,55	5,72	4,50	4,08	4,22	4,21	4,04
K ₂ O	-	-	3,04	2,64	2,66	2,77	2,99	2,99	2,99	2,45	1,33	1,72
MnO	0,12	0,12	0,11	0,10	0,10	0,11	0,12	0,17	0,22	0,177	0,193	0,237
Sc	13,81 ± 0,46	12,59 ± 0,42	12,34 ± 0,39	10,61 ± 0,37	10,1 ± 0,38	12,8 ± 0,44	14,58 ± 0,48	28,98 ± 0,95	31,74 ± 0,98	31,50 ± 0,97	33,27 ± 0,98	33,58 ± 0,98
V	17,3 ± 7,1	< 40	8,7 ± 4,1	< 20	10,2 ± 4,1	4,7 ± 1,9	31,1 ± 9,1	232 ± 17	229 ± 16	270 ± 19	295 ± 20	291 ± 19
Cr	0,7399 ± 0,48	1,4922 ± 0,45	1,8006 ± 0,68	4,1541 ± 0,64	7,48 ± 1,4	1,3675 ± 0,8	4,1539 ± 1,2	31,4269 ± 2,1	25,2107 ± 2	22,6 ± 2,0	22,6 ± 2,0	28,2 ± 2,3
Co	4,3 ± 0,16	3,91 ± 0,17	3,71 ± 0,15	2,87 ± 0,14	5,83 ± 0,24	3,51 ± 0,15	5,01 ± 0,22	21,44 ± 0,79	26,2 ± 0,96	22,70 ± 0,73	24,04 ± 0,93	27,86 ± 0,98
Zn	63,2 ± 6,7	66,5 ± 7,4	68,4 ± 7,3	66,3 ± 7,2	146 ± 16	74,1 ± 8,2	78,7 ± 8,5	94,2 ± 9,8	138 ± 16	90,0 ± 9,5	104 ± 11	156 ± 17
Rb	73,1 ± 4,7	81,5 ± 5,7	73,1 ± 4,6	68,2 ± 4,8	69,3 ± 7,2	78,4 ± 5,3	74,1 ± 5,3	48,7 ± 4,8	50,5 ± 7,7	45,4 ± 6,4	40,3 ± 5,5	51,1 ± 5,5
Sr	236 ± 42	190 ± 41	129 ± 29	282 ± 44	290 ± 89	123 ± 35	209 ± 52	441 ± 64	303 ± 65	354 ± 67	333 ± 64	396 ± 81
Cs	4,47 ± 0,27	4,82 ± 0,32	4,64 ± 0,31	4,1 ± 0,28	4,16 ± 0,31	4,97 ± 0,34	4,83 ± 0,34	2,66 ± 0,22	2,33 ± 0,22	2,60 ± 0,17	2,21 ± 0,19	2,75 ± 0,27
Ba	741 ± 71	814 ± 80	734 ± 69	702 ± 70	631 ± 72	812 ± 82	751 ± 75	502 ± 60	491 ± 72	513 ± 65	378 ± 51	427 ± 58
Zr	390 ± 37	454 ± 45	430 ± 41	344 ± 54	391 ± 76	422 ± 53	427 ± 58	280 ± 61	191 ± 82	309 ± 60	284 ± 95	258 ± 92
Hf	9,02 ± 0,44	10,2 ± 0,52	9,48 ± 0,48	8,28 ± 0,43	8,16 ± 0,45	10,23 ± 0,53	9,84 ± 0,51	5,92 ± 0,33	5,32 ± 0,3	5,66 ± 0,27	5,11 ± 0,31	5,79 ± 0,34
Ta	0,588 ± 0,041	0,615 ± 0,045	0,469 ± 0,042	0,491 ± 0,042	0,501 ± 0,061	0,601 ± 0,048	0,573 ± 0,047	0,377 ± 0,048	0,328 ± 0,04	0,353 ± 0,032	0,320 ± 0,044	0,647 ± 0,065
Th	8,57 ± 0,49	9,14 ± 0,62	8,81 ± 0,51	7,72 ± 0,46	7,32 ± 0,43	9,47 ± 0,56	9,08 ± 0,53	5,41 ± 0,32	4,91 ± 0,29	4,87 ± 0,26	4,95 ± 0,31	5,17 ± 0,30
Sb	0,785 ± 0,094	0,89 ± 0,11	0,862 ± 0,098	0,761 ± 0,098	0,792 ± 0,098	0,96 ± 0,13	0,91 ± 0,12	0,513 ± 0,089	0,568 ± 0,098	0,654 ± 0,097	0,399 ± 0,094	0,492 ± 0,098
As	14,2 ± 1,8	16,8 ± 1,8	14,57 ± 0,98	11,68 ± 0,94	11,48 ± 0,91	15,1 ± 1,1	14,57 ± 0,98	6,7 ± 1,2	6,71 ± 0,93	8,24 ± 0,95	5,83 ± 0,73	7,86 ± 0,89
Bf	4,16 ± 0,59	5,35 ± 0,65	5,12 ± 0,62	3,5 ± 0,37	3,59 ± 0,48	5,27 ± 0,64	5,3 ± 0,59	2,25 ± 0,43	2,06 ± 0,44	0,48 ± 0,91	1,57 ± 0,65	1,84 ± 0,38
U	2,1 ± 0,39	2,68 ± 0,41	2,26 ± 0,41	2,22 ± 0,35	1,87 ± 0,3	2,5 ± 0,34	2,44 ± 0,46	1,17 ± 0,29	1,56 ± 0,34	1,43 ± 0,50	0,90 ± 0,35	1,59 ± 0,56
La	32,9 ± 1,1	35,2 ± 1,1	33,56 ± 0,98	30,17 ± 0,98	29,7 ± 0,99	35,5 ± 1,1	34,4 ± 0,98	22,47 ± 0,87	21,19 ± 0,66	23,23 ± 0,77	21,70 ± 0,74	22,94 ± 0,85
Ce	68,9 ± 4,2	77,5 ± 5,7	76,8 ± 4,8	68,5 ± 4,3	64,4 ± 4	81,7 ± 5,1	79,8 ± 4,9	54,2 ± 3,3	50,9 ± 3,2	52,0 ± 2,8	52,2 ± 3,3	55,7 ± 3,4
Nd	37,3 ± 2,7	41,1 ± 2,9	40,2 ± 3,5	34,8 ± 2,5	38,9 ± 3,8	45,6 ± 3,5	46,6 ± 3,9	36,6 ± 3,6	35,9 ± 3,7	38,4 ± 3,7	34,0 ± 3,0	36,1 ± 3,3
Sm	9,16 ± 0,59	9,78 ± 0,63	8,61 ± 0,56	7,94 ± 0,56	8,02 ± 0,56	9,42 ± 0,65	9,36 ± 0,64	7,32 ± 0,46	7,03 ± 0,44	7,40 ± 0,48	6,95 ± 0,48	7,75 ± 0,47
Eu	1,785 ± 0,075	1,666 ± 0,08	1,662 ± 0,082	1,986 ± 0,095	1,721 ± 0,094	1,705 ± 0,085	1,766 ± 0,088	1,815 ± 0,089	1,711 ± 0,089	1,863 ± 0,078	1,803 ± 0,096	1,747 ± 0,097
Tb	1,372 ± 0,081	1,44 ± 0,092	1,421 ± 0,088	1,239 ± 0,082	1,22 ± 0,095	1,489 ± 0,098	1,411 ± 0,096	1,187 ± 0,089	1,08 ± 0,098	1,224 ± 0,091	1,114 ± 0,098	1,290 ± 0,120
Dy	9,67 ± 0,93	10,59 ± 0,98	9,1 ± 0,84	8,77 ± 0,83	8,72 ± 0,83	9,6 ± 0,87	10,06 ± 0,86	6,97 ± 0,68	7,48 ± 0,72	7,05 ± 0,67	7,11 ± 0,73	8,00 ± 0,78
Tm	0,766 ± 0,078	0,763 ± 0,083	0,721 ± 0,08	0,681 ± 0,077	0,718 ± 0,089	0,78 ± 0,087	0,776 ± 0,088	0,614 ± 0,07	0,644 ± 0,077	0,827 ± 0,081	0,580 ± 0,070	0,650 ± 0,088
Yb	6,07 ± 0,53	6,53 ± 0,58	6,06 ± 0,55	5,56 ± 0,49	5,2 ± 0,47	6,6 ± 0,57	6,41 ± 0,48	4,32 ± 0,39	4,33 ± 0,39	4,12 ± 0,43	4,15 ± 0,41	4,25 ± 0,49
Lu	0,847 ± 0,052	0,906 ± 0,058	0,828 ± 0,065	0,73 ± 0,0481	0,755 ± 0,064	0,898 ± 0,059	0,892 ± 0,062	0,606 ± 0,04	0,605 ± 0,042	0,556 ± 0,052	0,596 ± 0,055	0,619 ± 0,053

Cuadro modificado de Daga *et al.* (2006). Análisis determinados mediante análisis por activación neutrónica. Óxidos en %, elementos en ppm.

volumen de la muestra y la composición del vidrio resulta homogénea tanto para fragmentos individuales como para un conjunto de ellos.

Las mayores diferencias composicionales han sido identificadas en los fragmentos de pómez marrón según el tamaño de grano (Cuadro 2). La variación sugería que dichos fragmentos correspondían a una mezcla de partículas primarias y que la separación mediante la caracterización macroscópica incluía materiales de diferente composición (Daga *et al.* 2006). Este análisis preliminar de las características texturales de las diferentes partículas permitió corroborar que los contenidos de SiO₂ del vidrio de las pómez marrones son similares a los valores de SiO₂ más bajos de roca total (Cuadros 1 y 2, Fig. 4), mientras que no han sido identificadas en el presente estudio partículas marrones con composiciones más silíceas.

Las características composicionales de los productos de una misma erupción varían de acuerdo a las particularidades de cada evento, respondiendo a la amplia variedad de procesos que ocurren tanto en la cámara magmática, como mezcla de magmas o procesos de diferenciación, o durante el ascenso del magma hacia la superficie, con diferencias en la velocidad de ascenso y la exolución de volátiles durante la erupción (Platz *et al.* 2007; Kratzmann *et al.* 2009).

Por otra parte, como se observa en el cuadro 2 y figura 4, además de existir una variación entre partículas marrones, existe una variación composicional entre pómez marrones, blancas y escorias, mayor en las granulometrías más finas. Como muestra la figura 4, tanto las pómez blancas como las trizas vítreas se adaptan a un tren de evolución magmática afín a la serie correspondiente al Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, representando líquidos altamente diferenciados de un magma parental andesítico, el cual estaría representado por el material más máfico identificado en este trabajo como son las escorias y pómez marrones. Esto permite inferir que los materiales analizados corresponden a un sistema magmático único que ha sufrido un proceso

de fraccionamiento previo a la erupción (Fig. 4d-e), descartándose por lo tanto la mezcla con partículas volcánicas procedentes del volcán Calbuco.

Estos datos contrastan con información existentes de productos lávicos de la erupción de 1960 del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (Gerlach *et al.* 1988, Singer *et al.* 2008) en los cuales los productos menos silíceos representados por las escorias identificadas en el presente trabajo están ausentes. Esto puede ser debido a una menor abundancia del material andesítico en relación con dacitas y riolitas. Además, la entrada de un material andesítico a una cámara magmática félsica provocaría la cristalización del material andesítico entrante restándole capacidad eruptiva debido a la mayor cantidad de cristales. La aparente ausencia de material andesítico en los materiales lávicos de la erupción de 1960 del Sistema Cordón Caulle no impide la correlación de las escorias y pómez marrón como parte del sistema magmático andesítico-dacítico-riolítico del complejo volcánico en estudio.

De singular relevancia para esta discusión resultan algunas observaciones directas que los autores de este trabajo realizaron sobre la erupción comenzada el 4 de junio de 2011 (y que continúa al momento del envío del presente trabajo). Resulta de importancia en este momento contar con un evento eruptivo actual proveniente de la misma fuente, que aporte nuevo material de estudio con el cual comparar lo realizado hasta el momento. La observación directa de las partículas caídas durante el día 4 de junio en la ciudad de Bariloche permitió la identificación de partículas pumíceas blancas, escorias y fragmentos vítreos, y algunas caracterizaciones muy preliminares de las mismas (no presentadas en este trabajo), podrían estar conduciendo a sustentar lo planteado.

Implicancias en el fechado y correlación de secuencias lacustres

Los fragmentos juveniles resultantes de eventos explosivos pueden ser muy variados en cuanto a tipos de fragmentos,

tamaños, texturas y composición (Donogue *et al.* 1997, Gardner *et al.* 1998, Dellino *et al.* 2001, Polacci *et al.* 2001, Platz *et al.* 2007, Lautze y Houghton 2007, Cioni *et al.* 2008, Bouvet de Maisonneuve *et al.* 2009, Kratzmann *et al.* 2009, Arana-Salinas *et al.* 2010, entre otros). Estos productos, por otra parte, pueden ser transportados a cientos de kilómetros de su fuente de origen, constituyendo importantes niveles estratigráficos y cronológicos. En secuencias sedimentarias lacustres constituyen, en algunos casos, la única herramienta cronoestratigráfica disponible. Trabajos previos en la zona de estudio realizados sobre secuencias sedimentarias lacustres recientes, han demostrado una gran variabilidad en los depósitos volcánicos identificados en cada ambiente (Daga *et al.* 2010). Esto, además de responder a la elevada frecuencia eruptiva de los volcanes de la Zona Volcánica Sur, está asociado a las características particulares de cada lago y a los potenciales de preservación de los materiales alóctonos que llegan al fondo del lago. Sumado a esto, las partículas que llegan a cuerpos de agua deben atravesar la columna de agua, generando depósitos sin las gradaciones características. En estos casos, la utilización de niveles de cenizas volcánicas como herramientas de fechado es altamente dependiente del tipo de estudios que se realicen, requiriendo tanto estudios geoquímicos como texturales. Mientras que la geoquímica de roca total puede llevar a resultados no del todo determinantes de la fuente, el análisis puntual de la matriz vítrea de granos seleccionados al azar puede no representar todas las posibles variaciones composicionales de un nivel si un número elevado de fragmentos no es analizado. Sumado a esto, la correlación de cenizas distales a su fuente con los productos proximales puede resultar problemático debido a la falta de estudios detallados de las características de estos últimos. La información de los volcanes de origen utilizados para correlación está conformada, por lo general, por información de roca total de las distintas litologías generadas, pero comúnmente no se encuentra información detallada de los

productos piroclásticos depositados en zonas proximales a los volcanes (Cioni *et al.* 2008). La disponibilidad de información composicional y textural detallada sobre los productos proximales puede ser de valiosa utilidad al momento de discernir entre productos generados en diferentes estadios de un evento eruptivo o entre productos de diferentes fuentes volcánicas.

Por otra parte, el análisis composicional de las matrices vítreas y textural de las diferentes partículas resulta en información fundamental cuando se intentan realizar correlaciones entre tefras y microtefras identificadas en zonas muy distales a las fuentes volcánicas, donde los procesos de fraccionamiento por densidad y tamaño de grano pueden acentuar aún más las diferencias entre productos de un mismo origen.

CONSIDERACIONES FINALES

Mediante este análisis textural preliminar fueron identificadas las causas de las variaciones geoquímicas observadas previamente entre partículas, asociando las diferencias en coloración y tipo de partículas a diferencias en el contenido de cristales y tamaño, forma y distribución de vesículas, en respuesta a procesos de fraccionamiento previos a la erupción del año 1960 del Sistema Cordón Caulle. Contar con esta información detallada permitirá la realización de correlaciones con otras secuencias lacustres u otros ambientes en los cuales los depósitos correspondientes al mismo evento volcánico pueden no estar conformados por el mismo tipo de partículas. En ambientes distales a la fuente volcánica es probable que sólo la fracción vítrea sea encontrada mientras que las fases minerales pueden haber sufrido fraccionamiento durante el transporte.

De la misma manera que estudios detallados en productos volcánicos proximales pueden realizar aportes muy valiosos para análisis tefrocronológicos en zonas distales, los análisis composicionales y texturales de detalle de productos iden-

tificados en dichas zonas pueden aportar información para un análisis integral de los productos generados en una erupción y de los complejos procesos que estuvieron involucrados en su formación. En este sentido se pretende continuar con este tipo de análisis en los demás niveles volcánicos identificados en las secuencias lacustres estudiadas y en los nuevos productos piroclásticos disponibles del evento del 2011 del Sistema Cordón Caulle que se está desarrollando actualmente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Grupo de Caracterización de Materiales del Centro Atómico Bariloche por el apoyo brindado en SEM y a los Servicios Centrales de Investigación de la Universidad de Huelva (Huelva, España) por el acceso a los equipamientos. Este trabajo fue financiado con aportes del Proyecto 06/C339 otorgado por Universidad Nacional de Cuyo - Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado, y del Proyecto PLUVOLC: ref.: CGL2010-22022-C02-01.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

Arana-Salinas, L., Siebe, C. y Macías, J. 2010. Dynamics of the ca. 4965 yr 14C BP "Ochre Pumice" Plinian eruption of Popocatepetl volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 192: 212-231.

Bouvet de Maisonneuve, C., Bachmann, O. y Burgisser, A. 2009. Characterization of juvenile pyroclasts from the Kos Plateau Tuff (Aegean Arc): insights into the eruptive dynamics of a large rhyolitic eruption. *Bulletin of Volcanology* 71: 643-658.

Boygale, J. 1999. Variability of tephra in lake and catchment sediments, Svínavatn, Iceland. *Global and Planetary Change* 21: 129-149.

Cioni, R., D'Oriano, C. y Bertagnini, A. 2008. Fingerprinting ash deposits of small scale eruptions by their physical and textural features. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 177: 277-287.

Daga, R. 2009. Tefrocronología aplicada a depósitos lacustres en el ámbito de la Cordillera Patagónica, provincias de Río Negro y Neu-

quén, Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto, (inédito), 261p., Río Cuarto.

Daga, R., Ribeiro Guevara, S., Sánchez, M. L. y Arribére, M. 2006. Geochemical characterization of volcanic ashes from recent events in Northern Patagonia Andean Range by INAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 270: 677-694.

Daga, R., Ribeiro Guevara, S., Sánchez, M. L. y Arribére, M. 2008. Source identification of volcanic ashes by geochemical analysis of well preserved lacustrine tephtras in Nahuel Huapi National Park. *Applied Radiation and Isotopes* 66: 1325-1336.

Daga, R., Ribeiro Guevara, S., Sánchez, M. L. y Arribére, M. 2010. Tephrochronology of recent events in the Andean Range (northern Patagonia): spatial distribution and provenance of lacustrine ash layers in the Nahuel Huapi National Park. *Journal of Quaternary Science* 25: 1113-1123.

Dellino, P., Isaia, R., La Volpe, L. y Orsi, G. 2001. Statistical analysis of textural data from complex pyroclastic sequences: implications for fragmentation processes of the Agnano-Monte Spina Tephra (4.1 ka), Phlegraean Fields, southern Italy. *Bulletin of Volcanology* 63: 443-461.

Donogue, S., Neall, V., Palmer, A. y Stewart, R. 1997. The volcanic history of Ruapehu during the past 2 millennia based on the record of Tufa Trig tephtras. *Bulletin of Volcanology* 59: 136-146.

Gardner, C., Cashman, K. y Neal, C. 1998. Tephra-fall deposits from the 1992 eruption of Crater Peak, Alaska: implications of clast textures for eruptive processes. *Bulletin of Volcanology* 59: 537-555.

Gerlach, D., Frey, F., Moreno-Roa, H. y López-Escobar, L. 1988. Recent volcanism in the Puyehue-Cordon Caulle region, Southern Andes, Chile (40.5°S): Petrogenesis of evolved lavas. *Journal of Petrology* 29: 333-382.

González-Ferrán, O. 1995. Volcanes de Chile, Instituto Geográfico Militar, 640 p, Santiago.

Kratzmann, D., Carey, S., Scasso, R. y Naranjo, J. 2009. Compositional variations and magma mixing in the 1991 eruptions of Hudson volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology* 71: 491-439.

Lara, L., Naranjo, J. y Moreno, H. 2004. Rhyodacitic fissure eruption in Southern Andes (Cor-

- dón Caulle; 40.5°S) after the 1960 (Mw: 9.5) Chilean earthquake: a structural interpretation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 138: 127-138.
- Lautze, N. y Houghton, B. 2007. Linking variable explosion style and magma textures during 2002 at Stromboli volcano, Italy. *Bulletin of Volcanology* 69: 445-460.
- López-Escobar, L., Parada, M. y Moreno, H. 1992. A contribution to the petrogenesis of Osorno and Calbuco volcanoes, Southern Andes (41°00'-41°30'S): comparative study. *Revista Geológica de Chile* 19: 211-226.
- Machida, H. 1999. The stratigraphy, chronology and distribution of distal marker-tephras in and around Japan. *Global and Planetary Change* 21: 71-94.
- Olago, D., Street-Perrott, F., Perrott, R., Ivanovich, M. y Harkness, D. 2000. Late Quaternary primary tephras in Sacred Lake sediments, northeast Mount Kenya, Kenya. *Journal of African Earth Sciences* 30: 957-969.
- Ortega-Guerrero, B. y Newton, A. 1998. Geochemical Characterization of Late Pleistocene and Holocene Tephra Layers from the Basin of Mexico, Central Mexico. *Quaternary Research* 50: 90-106.
- Paulick, H. y Franz, G. 1997. The color of pumice: case study on a trachytic fall deposit, Meidob volcanic field, Sudan. *Bulletin of Volcanology* 59: 171-185.
- Petit-Breuilh Sepúlveda, M. 2004. La Historia Eruptiva de los Volcanes Hispanoamericanos (Siglos XVI al XX). Serie Casa de los Volcanes N°. 8. Ed. Servicio de Publicaciones Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote, 431 p., Huelva.
- Platz, T., Cronin, S., Cashman, K., Stewart, R. y Smith, I. 2007. Transition from effusive to explosive phases in andesite eruptions - A case-study from the AD1655 eruption of Mt. Taranaki, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 161: 15-34.
- Polacci, M., Papale, P. y Rosi, M. 2001. Textural heterogeneities in pumices from the climatic eruption of Mount Pinatubo, 15 June 1991, and implications for magma ascent dynamics. *Bulletin of Volcanology* 63: 83-97.
- Pollard, A., Blockley, S. y Lane, C. 2006. Some numerical considerations in the geochemical analysis of distal microtephra. *Applied Geochemistry* 21: 1692-1714.
- Rosi, M., Landi, P., Polacci, M., Di Muro, A. y Zandomeneghi, D. 2004. Role of conduit shear on ascent of the crystal-rich magma feeding the 800-year-B.P. Plinian eruption of Quilotoa Volcano (Ecuador). *Bulletin of Volcanology* 66: 307-321.
- Scasso, R. y Carey, S. 2005. Morphology and formation of glassy volcanic ash from the august 12-15, 1991 eruption of Hudson volcano, Chile. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 12: 3-21.
- Shane, P. 2000. Tephrochronology: a New Zealand case study. *Earth-Science Reviews* 49: 223-259.
- Singer, B., Jicha, B., Harper, M., Naranjo, J., Lara, L. y Moreno-Roa, H. 2008. Eruptive history, geochronology, and magmatic evolution of the Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex, Chile. *Geological Society of America Bulletin* 120: 599-618.
- Stern, C. R. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* 31: 161-206.
- Tormey, D., Hickey-Vargas, R., Frey, F. y López-Escobar, L. 1991. Recent lavas from the Andean volcanic front (33° to 42°S): interpretations of along-arc compositional variations. En Harmon, R.S. y Rapela, C.W. (ed.) *Andean Magmatism and its Tectonic Setting*, Geological Society of America, Special Paper 265: 57-77.
- Wohletz, K. 1983. Mechanisms of hydrovolcanic pyroclast formation: grain-size, scanning electron microscopy, and experimental studies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 17: 31-63.

Recibido: 11 de septiembre, 2011.

Aceptado: 30 de julio, 2012.