



**XX CONGRESO GEOLÓGICO ARGENTINO**  
**GEOLOGÍA, PRESENTE Y FUTURO**  
**Agosto de 2017 | San Miguel de Tucumán**



SESIÓN TÉCNICA 8

# VOLCANOLOGÍA

Coordinadores

PABLO GROSSE  
IVÁN PETRINOVIC

## CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA Y LIXIVIACIÓN DE CENIZAS DE LA LOCALIDAD DE SAN MARTÍN DE LOS ANDES, ARGENTINA: IMPACTO EN EL AMBIENTE LOCAL DE LA ERUPCIÓN DEL VOLCÁN CALBUCO, ABRIL DE 2015

Ariana CARRAZANA<sup>1</sup>, Damià BENET<sup>1</sup>, Domingo GIMENO<sup>1</sup>, Rubén KALMBACH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Mineralogía, Petrología y Geología Aplicada. Universidad de Barcelona. Carrer Martí i Franquès s/n, 08028, Barcelona, España. E-mail: ariana.carrazana@ub.edu

<sup>2</sup>Grupo de estudios Ambientales (GEA). Instituto Andino Patagónico de Tecnologías Biológicas y Geoambientales (IPATEC). Centro Regional Universitario Bariloche. Universidad Nacional del Comahue, Argentina. Quintral 1250, 8400, Bariloche, Río Negro, Argentina.

### RESUMEN

La erupción del volcán Calbuco en el año 2015 tuvo un impacto significativo con la caída de cenizas en Argentina. Este trabajo presenta resultados de ensayos de lixiviación de muestras tomadas en San Martín de los Andes durante el segundo pulso eruptivo del 23 de abril. Las cenizas y sus productos de lixiviación fueron analizados mediante FRX e ICP-MS/OES. No se detectaron elementos altamente móviles que tengan un impacto significativo en el medio ambiente. Los elementos moderadamente móviles corresponden a fases sublimadas y adheridas a las partículas, estos son  $Tl > Mo > Cd > Ni > As > Th > Sb > K > Na > Cu > Sn > Zn > W > Ca > Li > Pb > Rb$  entre los cuales se pueden encontrar micronutrientes que pueden fertilizar ecosistemas, pero también oligoelementos que pueden cambiar potencialmente el balance geoquímico regional.

**Palabras clave:** Balance geoquímico, elementos móviles, sublimados, agua.

### ABSTRACT

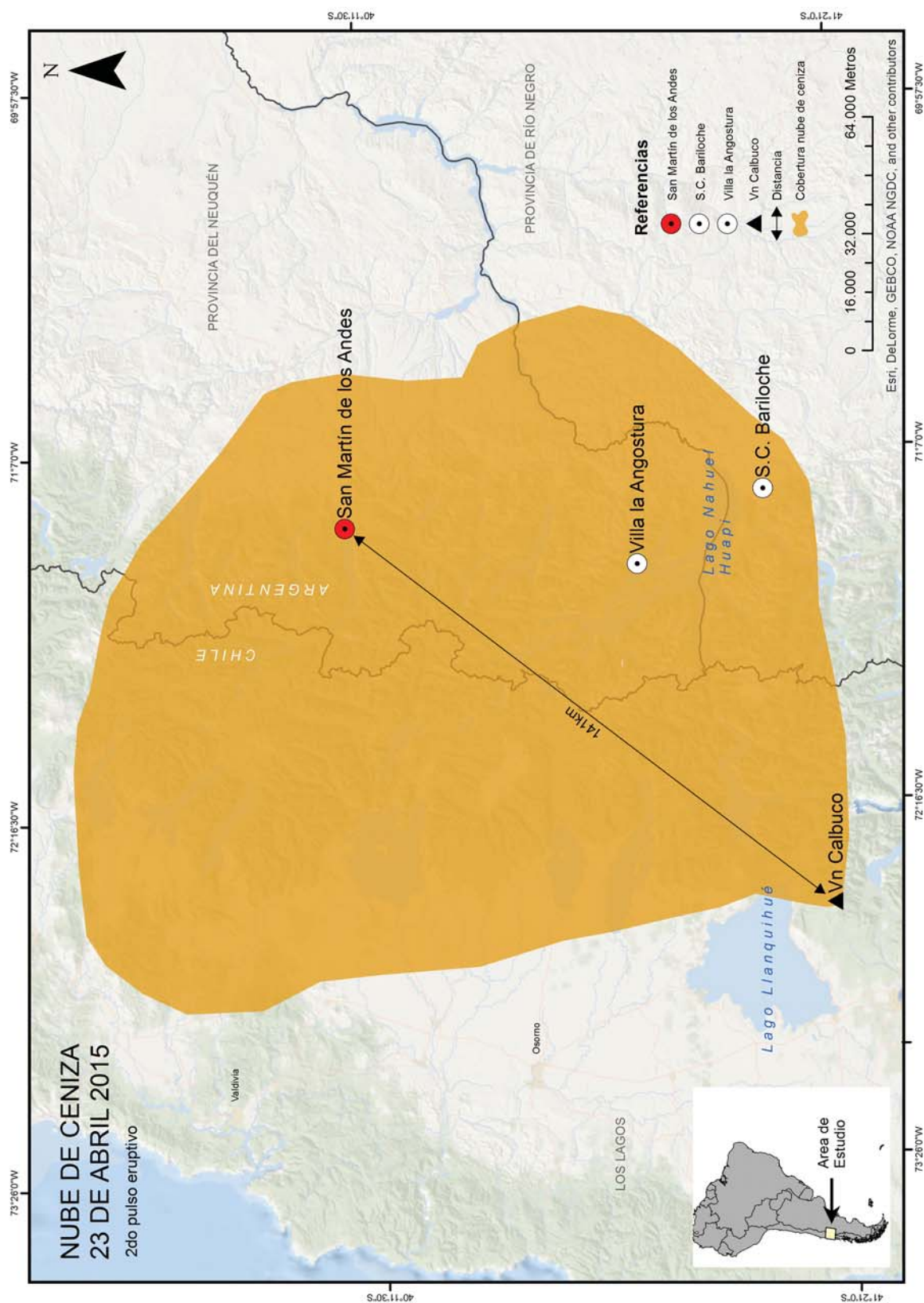
*Geochemical characterization and ash leaching from the locality of San Martín de los Andes, Argentina: Impact on the local environment of the eruption of the Calbuco volcano, April 2015.* The eruption of the Calbuco volcano in 2015 had a significant impact with the ash fall in Argentina. This work presents results of sample leaching tests taken in San Martín de los Andes during the second eruptive pulse of April 23. The ashes and their leaching products were analyzed by FRX and ICP-MS / OES. No highly mobile elements have been detected that have a significant impact on the environment. The moderately mobile elements correspond to sublimated phases and adhered to the particles, these are  $Tl > Mo > Cd > Ni > As > Th > Sb > K > Na > Cu > Sn > Zn > W > Ca > Li > Pb > Rb$  between which can be found micronutrients that can fertilize ecosystems, but also trace elements that can potentially change the regional geochemical balance.

**Keywords:** Geochemical balance, mobile elements, sublimates, water.

### INTRODUCCIÓN

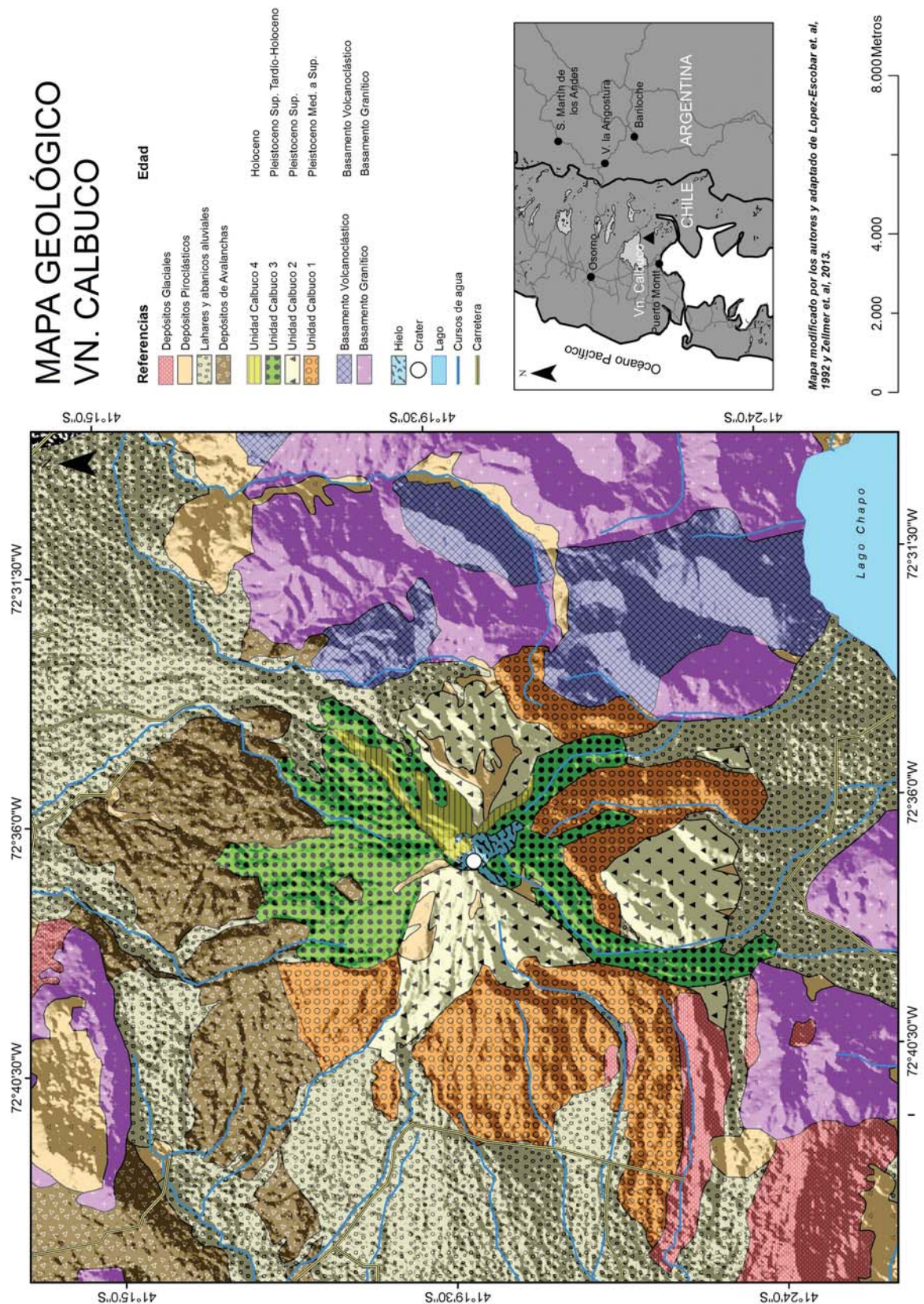
San Martín de los Andes se localiza en el sector norte de los Andes Patagónicos, entre los 40°10' de latitud sur y 71°20' de longitud oeste, en el Parque Nacional Lanín, al sur de la provincia de Neuquén, Argentina. El 22 de abril de 2015 alrededor de las 22:00 hora Argentina (00:00 GMT) comenzaron a precipitar las cenizas del Volcán Calbuco sobre la localidad, con el primer pulso eruptivo. El día 23 de abril a las 01:00 hora Chilena (04:00 GMT) se produjo el segundo pulso eruptivo que emitió la mayor cantidad de material piroclástico (Fig.1).

La caída de cenizas se prolongó hasta cerca del mediodía, y en horas de la tarde partículas de ceniza aún se mantenían en estado de suspensión en la zona de estudio. El Calbuco es un estratovolcán que pertenece a la Zona Volcánica Sur (SVZ 33-55° S) de los Andes Chilenos, con edificios volcánicos de composición predominante basáltica y andesítico basáltica (Stern 2004). Se han documentado históricamente al menos 12 ciclos eruptivos, 4 de los cuales tuvieron actividad efusiva y explosiva en el siglo XX (Sellés y Moreno 2011). Se divide en 4 unidades (Fig.2) que representan distintos episodios evolutivos del volcán: Unidad 1, Pleistoceno Me-



**Figura 1.** Imagen satelital de la nube de cenizas que se desplazó en dirección NE afectando un conjunto de localidades, entre las cuales San Martín de los Andes. Fecha de imagen: 24/04/2017, alrededor del mediodía. Fuente: <https://www.earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=85779>





**Figura 2.** Ubicación de los dos puntos de muestreo en San Martín de los Andes.

dio a Superior, dominado por coladas de lava principalmente andesítico-basálticas, con intercalaciones de cuerpos interpretados como lahares; Unidad 2, Pleistoceno Superior, incluye una secuencia de coladas lávicas de composición andesítica a dacítica, junto con potentes intercalaciones de brechas piroclásticas y de origen lahárico; Unidad 3, Pleistoceno Superior Tardío a Holoceno, corresponde a coladas de lavas andesítico basálticas a dacíticas distribuidas de forma radial desde la parte alta del volcán; Unidad 4, Holoceno, consiste en flujos de lavas y domos andesíticos, flujos de bloques y cenizas, depósitos piroclásticos de caída y flujos de lahares (López-Escobar *et al.* 1992, 1993, 1995; Sellés y Moreno 2011). Este estudio pretende estimar de manera preliminar el impacto geoquímico que ocurrió en el medio ambiente después de la deposición de las cenizas en San Martín de los Andes, durante la erupción más reciente del volcán Calbuco (2015). Las muestras pertenecen a un depósito distal (aproximadamente 140 km desde su punto de emisión), lo que supone el reflejo de la fracción más fina. Cuando ocurre una erupción, los gases contenidos en el magma son liberados en la atmósfera, entre otros CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, junto con elementos metálicos volátiles (Allard *et al.* 2000). Parte de los gases de azufre, los halógenos (HCl y HF) y elementos trazas (As, Hg, Pb) reaccionan químicamente, subliman cuando la temperatura y presión cae, y se produce la adsorción de los volátiles en la superficie de la ceniza (Witham 2005). La capacidad de retención de la ceniza alcanza el 40% para las especies de azufre y el 10-20% en el caso del HCl (Óskarsson 1980). Las fases que resultan de este proceso son altamente solubles y sus elementos rápidamente mo-

vilizados en el balance químico local (Delmelle 2007). La adsorción de los halógenos y especies de azufre es mayor como más finas son las partículas (Rose 1977; Óskarsson 1980)

## METODOLOGÍAS

### Recolección de muestras de cenizas

Las muestras SAM-1 y SAM-2 fueron muestreadas (Fig.3) el día 23 de abril (segundo pulso eruptivo) sobre una superficie lisa y limpia, y son por lo tanto prístinas. SAM-1 se muestreó a las 18:00 GMT en una extensión de campo limitada con coordenadas 40°08'17.43"S y 71°17'7.00"O. SAM-2 se recolectó a las 16:00 GMT en el techo de un establecimiento turístico con coordenadas 40°08'15.92"S y 71°17'04.94"O.

### Análisis químicos de la composición global de cenizas

Primeramente, se pulverizó la muestra con un molino de anillos vibratorios de carburo de tungsteno a un tamaño inferior a 75µm. El análisis de elementos mayoritarios se hizo mediante Fluorescencia de Rayos-X (FRX) con un espectrofotómetro de Rayos-X secuencial Philips PW4200. La pérdida al fuego (LOI) se realizó por calcinación durante 5 horas en ambiente oxidante a 950°C, y el análisis de elementos traza se realizó por ataque de roca total mediante digestión ácida (HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub> y HF) y lectura por Espectrometría de Masas y Emisión Óptica con fuente de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS/OES).

**Tabla 1.** Geoquímica de composición global de las Cenizas y sus productos de lixiviación.

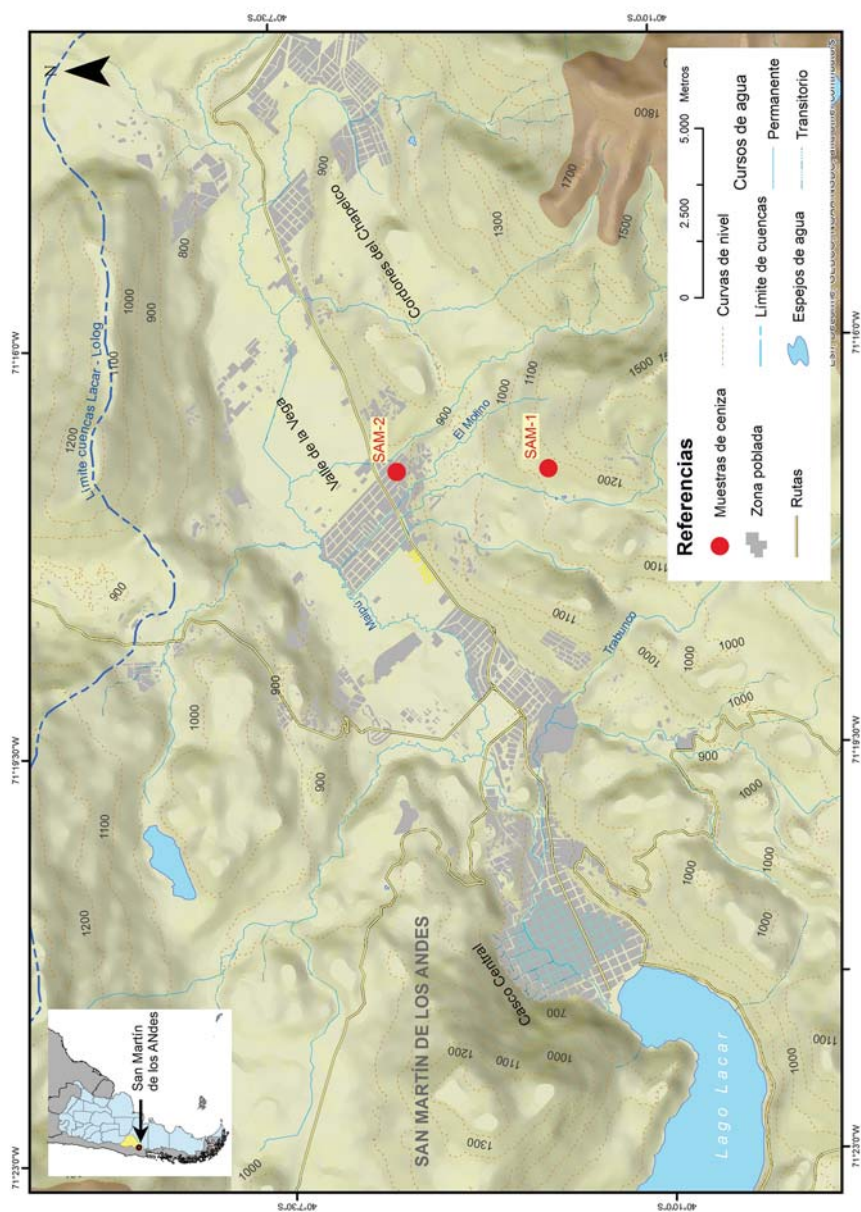
Tabla 1a			Tabla 1b		
Elementos Mayoritarios %	SAM-1	SAM-2	Norma CIPW● %	SAM-1	SAM-2
SiO <sub>2</sub>	56.64	56.33	Q	9.61	9.73
TiO <sub>2</sub>	0.86	0.85	C	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.36	19.05	Or	3.93	3.94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.82	2.74	Ab	33.16	33.16
FeO	3.67	3.59	An	33.28	32.43
MgO	3.27	3.24	Di	3.58	3.67
MnO	0.14	0.13	Wo	0.00	0.00
CaO	7.83	7.68	Hy	9.67	9.47
Na <sub>2</sub> O	3.92	3.92	Mt	4.09	3.98
K <sub>2</sub> O	0.66	0.67	Il	1.63	1.62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	0.17	Ap	0.41	0.41
LOI	0.08	0.06			
Sum	99.42	98.44	Sum	99.36	98.40

● Norma CIPW software GCDkit 4.1  
\* Análisis ICP-OES (Optima 8300 RL)  
\*\* Análisis ICP-MS (Nexlon 350D) sólo en Lixiviados  
Sin \* Análisis ICP-MS (Elan 6000)

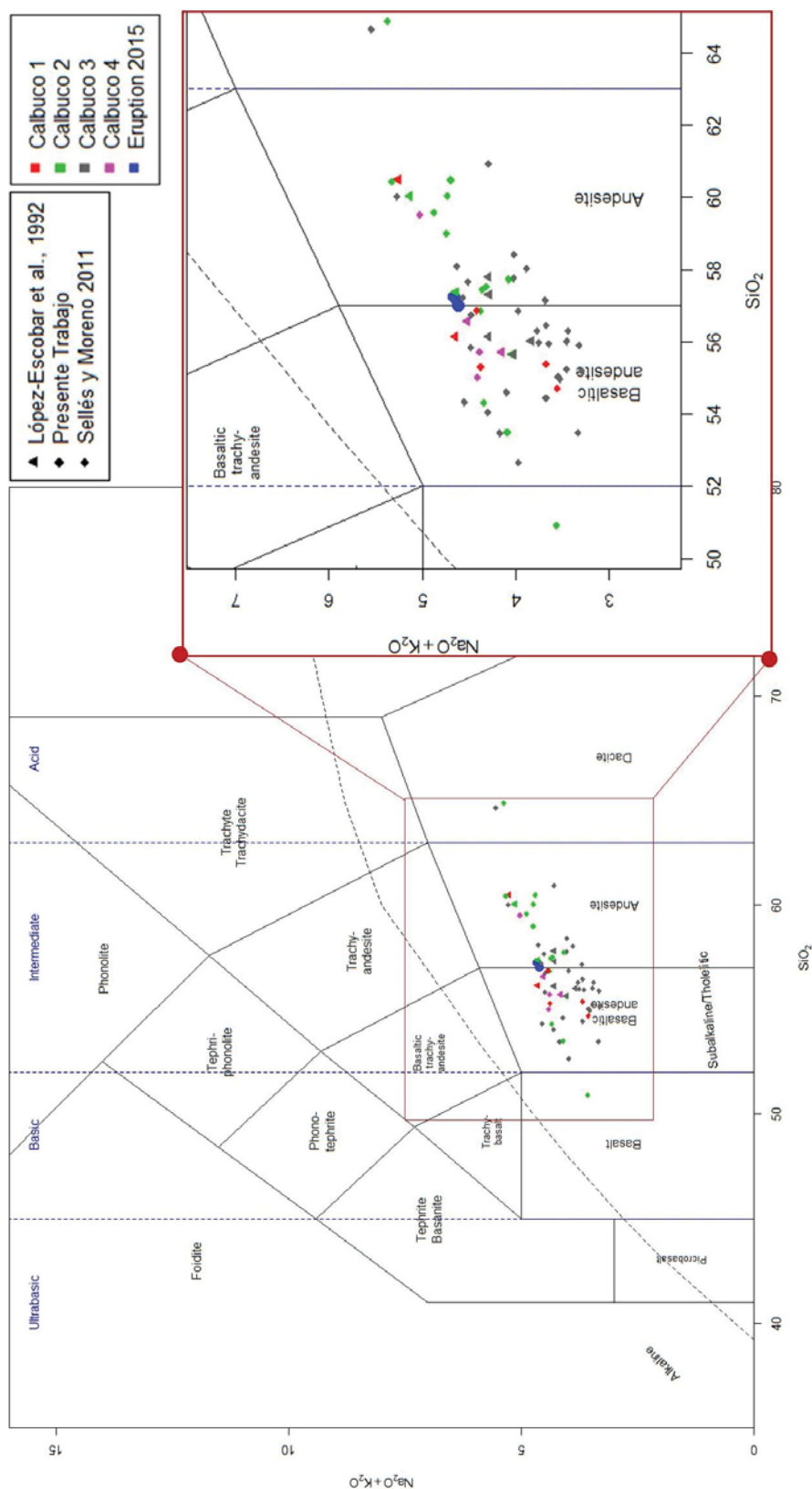


Tabla 1c			Tabla 1d			Tabla 1e		
<i>Roca Total mg·kg<sup>-1</sup></i>	SAM-1	SAM-2	<i>Lixiviados mg·kg<sup>-1</sup></i>	SAM-1	SAM-2	<i>RML %</i>	SAM-1	SAM-2
Ca*	57058.73	57249.42		353.683	411.966		0.62	0.72
Fe*	53155.56	54929.74		8.596	10.740		0.02	0.02
K*	5580.28	5592.27		71.314	88.772		1.28	1.59
Mg*	19669.95	19993.95		20.673	23.817		0.11	0.12
Na*	29698.86	30098.25		370.783	362.154		1.25	1.20
P*	409.21	433.47		<0.001	<0.001		<0.01	<0.01
Si*	264758.00	263309.00		71.118	78.244		0.03	0.03
Sr*	355.88	357.05		1.133	1.219		0.32	0.34
Be**	0.89	0.91		0.001	<0.001		0.12	0.04
Hf**	7.76	7.81		0.004	0.003		0.05	0.04
Li**	16.47	16.65		0.092	0.132		0.56	0.79
Zr**	86.55	87.89		0.107	0.037		0.12	0.04
Ag	0.46	0.53		<0.001	<0.001		<0.01	<0.01
Al	94124.47	94531.04		69.475	77.610		0.07	0.08
As	7.14	7.12		0.129	0.126		1.81	1.77
Ba	160.86	164.40		0.183	0.234		0.11	0.14
Bi	0.17	0.14		<0.005	<0.005		0.69	0.91
Cd	0.38	0.32		0.009	0.014		2.29	4.33
Ce	16.33	16.74		0.012	0.030		0.07	0.18
Co	17.27	17.67		0.022	0.028		0.13	0.16
Cr	11.58	12.05		<0.001	<0.001		<0.01	<0.01
Cs	1.33	1.35		0.003	0.003		0.20	0.20
Cu	51.29	49.99		0.536	0.693		1.05	1.39
Dy	3.74	3.87		0.004	0.004		0.11	0.12
Er	2.23	2.32		0.004	0.003		0.16	0.15
Eu	1.07	1.09		<0.001	<0.001		0.07	0.03
Ga	18.58	18.55		0.010	0.011		0.06	0.06
Gd	3.55	3.66		0.006	0.008		0.16	0.21
Ge	1.09	1.08		<0.001	<0.001		<0.01	<0.01
Ho	0.76	0.78		0.001	0.001		0.15	0.16
La	6.49	6.65		0.005	0.007		0.07	0.10
Lu	0.34	0.34		0.001	0.001		0.32	0.31
Mn	938.71	958.65		3.213	3.974		0.34	0.41
Mo	1.92	1.88		0.068	0.061		3.55	3.24
Nb	3.12	3.17		0.003	0.003		0.08	0.10
Nd	11.56	11.82		0.011	0.015		0.10	0.12
Ni	6.98	7.64		0.127	0.194		1.82	2.54
Pb	6.06	6.13		0.031	0.105		0.51	1.71
Pr	2.39	2.46		0.002	0.003		0.10	0.11
Rb	15.86	16.10		0.071	0.083		0.45	0.52
Sb	2.25	2.31		0.035	0.038		1.55	1.64
Sm	3.16	3.26		0.007	0.009		0.22	0.27
Sn	1.23	1.28		0.012	0.013		0.95	1.01
Ta	0.58	0.62		<0.005	<0.005		0.47	0.51
Tb	0.60	0.62		0.001	0.001		0.21	0.20
Te	0.60	0.74		0.070	0.058		11.76	7.81
Th	1.23	1.26		0.019	0.015		1.57	1.19
Ti	4595.51	4773.75		0.604	0.782		0.01	0.02

Tabla 1c			Tabla 1d			Tabla 1e		
<i>Roca Total</i> <i>mg·kg<sup>-1</sup></i>	SAM-1	SAM-2	<i>Lixiviados</i> <i>mg·kg<sup>-1</sup></i>	SAM-1	SAM-2	<i>RML</i> <i>%</i>	SAM-1	SAM-2
Tl	0.32	0.23		0.014	0.012		4.46	5.22
Tm	0.32	0.33		<0.001	0.001		0.25	0.31
U	0.35	0.35		<0.001	<0.001		0.08	0.16
V	147.63	155.72		0.169	0.156		0.11	0.10
W	1.05	0.75		0.008	0.014		0.75	1.87
Y	18.13	18.50		0.009	0.013		0.05	0.07
Yb	2.17	2.22		0.003	0.004		0.15	0.16
Zn	120.24	119.31		0.952	1.288		0.79	1.08



**Figura 3.** Ubicación de las muestras de cenizas acumuladas en San Martín de los Andes durante el pulso eruptivo del 23 de Abril de 2015. SAM-1 fue muestreada en una zona topográficamente más alta que SAM-2.



**Figura 4.** Proyección de los valores obtenidos para las cenizas SAM-1 y SAM-2 en el diagrama TAS (Le Bas *et al.* 1986) y comparados con fuentes bibliográficas. Los productos volcánicos de López-Escobar *et al.* (1992) comprenden lavas; mientras que para Sellés y Moreno (2011), corresponden a escorias, bombas, bloques y lavas.



### **Análisis químicos de los productos de lixiviación de cenizas**

La lixiviación de cenizas se realizó con la fracción granulométrica sin pulverizar (SAM-1  $d_{50}=98.57 \mu\text{m}$ , SAM-2  $d_{50}=96.21 \mu\text{m}$ ) con 1 g de muestra colocada en 50 ml de agua destilada en recipientes cerrados de polietileno de alta densidad (HDPE). Estos fueron agitados durante 12h. La solución del lixiviado se filtró con papel de filtro Whatman 589/2 ( $\varnothing$  110 mm y tamaño de poro 0.45  $\mu\text{m}$ ) mediante agua mili Q ultrapura y luego se enrasó a 100 ml (1:100) con la adición de 1 ml de  $\text{HNO}_3$  para la determinación final. El análisis de elementos traza en la solución lixiviada fue determinado por ICP-MS con el equipo Perkin Elmer Elan 6000 y Nexlon 350D, y la determinación de los mayoritarios por ICP-OES con el Perkin Elmer Optima 8300 RL siguiendo el protocolo de Fernández-Turiel *et al.* (2003).

## **RESULTADOS**

### **Geoquímica de roca total**

Los datos obtenidos de elementos mayoritarios en roca total (Tabla 1a) muestran en el diagrama TAS (Le Bas *et al.* 1986) una composición andesítica, aunque muy cercana al campo de basalto-andesitas (Fig.4). Los bajos valores de pérdida al fuego (LOI) se atribuyen a la oxidación de  $\text{FeO}$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a expensas del oxígeno ambiental del horno (Lechler *et al.* 1987). La composición global de las cenizas es coherente con estudios previos (Déruelle 1982; Klerkx 1995; López-Escobar *et al.* 1992, 1993, 1995; Sellés y Moreno 2011; Watt *et al.* 2011; Daga *et al.* 2014). La presencia de hiperstena en el cálculo normativo de minerales (Tabla 1b) es indicativo de saturación en sílice. La magnetita normativa refleja un sustancial contenido en óxidos de hierro presente en los productos del Calbuco y reportado desde antaño (Klerkx 1965). Los elementos traza (Tabla 1c) son de especial interés en este trabajo ya que permiten calcular el RML % (porcentaje relativo de masa lixiviada) que representa el cociente que resulta de la concentración elemental en la composición global de la ceniza y la concentración elemental del lixiviado expresado en porcentaje (Georgakopoulos *et al.* 2002). Las REE muestran un patrón similar (Fig.5a) al de la literatura (López-Escobar *et al.* 1992, 1995; Sellés y Moreno 2011), mostrando una tendencia muy apretada y una baja relación Ce/Yb. Los valores obtenidos de elementos LIL y HFS mantienen las tendencias generales (Fig.5b) y muestran claramente el desacople Ta-Nb característico de las zonas de subducción (Winter 2014).

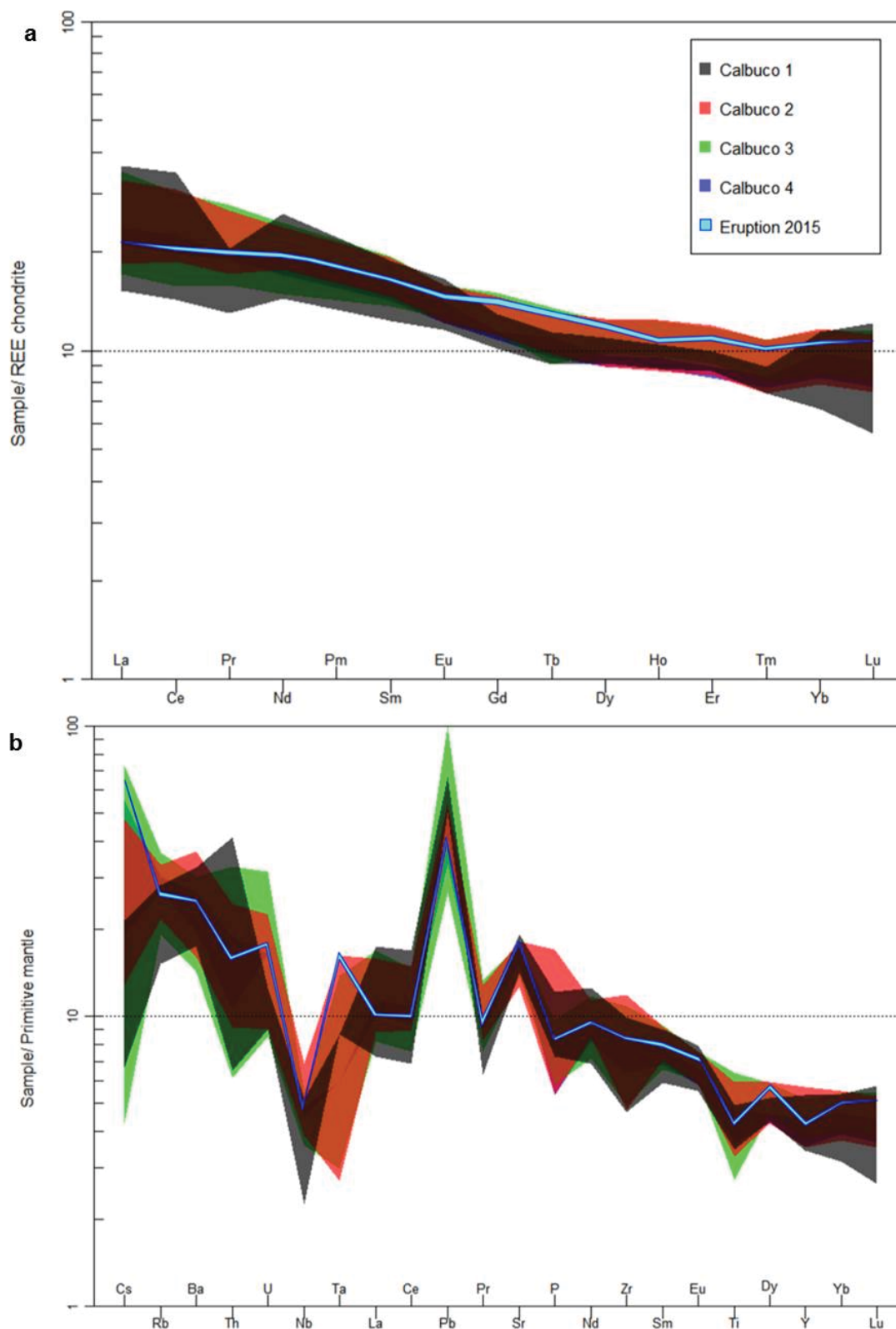
### **Geoquímica de lixiviación**

Los elementos mayoritarios y traza en el lixiviado (Tabla 1d) están expresados con una relación (1:50), es

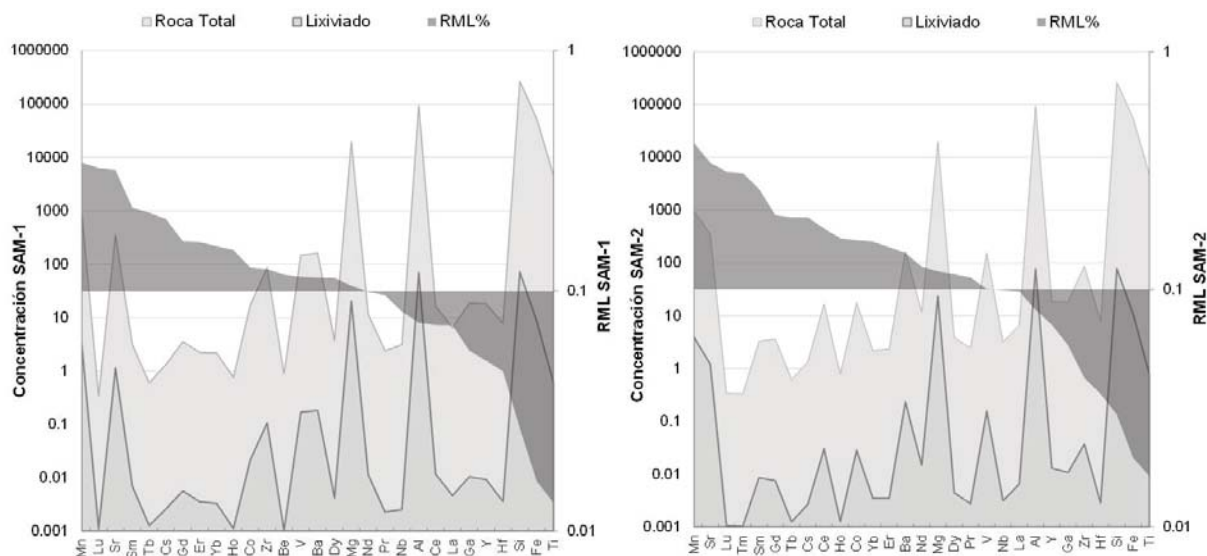
decir 1g de ceniza por 50ml de agua. El valor obtenido de RML % (Tabla 1e) permite clasificar los elementos según su movilidad en: (1) Elementos altamente móviles,  $\text{RML}>5\%$ , los cuales no se detectaron en las cenizas SAM-1 y 2 a excepción del Te, cuya concentración es muy baja. (2) Elementos moderadamente móviles, RML entre 0,5-5%, comprenden Tl, Mo, Cd, Ni, As, Th, Sb, K, Na, Cu, Sn, Zn, W, Ca, Li, Pb y Rb; en este rango la movilidad de los elementos traza Mo, Ni, As y Pb se debe posiblemente a que están adsorbidos en la superficie de los granos de ceniza formando complejos estables (Fig.6). La mayor parte de los elementos alcalinos como Ca y Na se encuentran en la red cristalina de fenocristales (plagioclasa), por lo que su movilidad es baja. No obstante, durante la fase eruptiva el Na y el K pueden reaccionar con halógenos y formar fases minerales altamente solubles (halita) adheridas en la superficie de la ceniza. (3) Elementos poco móviles,  $\text{RML}<0,5\%$  como Mn, Sr, Co, V, Ba, Mg, Al, Si, Fe, Ti; la inmovilidad del Al principalmente se debe a sus bajos coeficientes de solubilidad. El Mn, Ti y Fe forman parte de ilmenita y magnetita, mientras que el Mg está presente en el vidrio. En las muestras estudiadas los valores de P, Ag y Cr del lixiviado son inferiores al límite de detección. En el caso del P es consistente con las observaciones de apatito en la fase cristalina de la ceniza. Experimentos de lixiviación previos muestran que la movilidad aumenta drásticamente al utilizar lixiviantes ácidos como el  $\text{HNO}_3$  (Ruggieri 2010). El impacto ambiental producido a corto plazo por la caída de cenizas volcánicas está condicionado por los compuestos solubles adheridos a las partículas. Mientras que a largo plazo puede ocurrir la liberación de los elementos en el vidrio y en las fases cristalinas. Los elementos potencialmente tóxicos a bajas concentraciones fueron evaluados en el marco de los niveles de potabilidad por la Organización Mundial de la Salud (WHO 2011) y el Código Alimentario Argentino (A.N.-M.A.T 2012) ya que ambos presentan variaciones en sus valores patrones y en la cantidad de elementos estandarizados. Los elementos As, Cd, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb y Sb superan los límites estándar (Fig.7). Cabe esperar que el lixiviado se diluiría al converger con otros flujos de la cuenca hidrográfica. Para poder estimar la cantidad máxima elemental de la erupción que entra en el balance geoquímico local es necesario calcular además, el volumen y vesicularidad del material piroclástico emitido (Harris *et al.* 2007), cuestión que aún no se ha abordado en este trabajo.

## **CONCLUSIONES**

La composición geoquímica global de las cenizas estudiadas indica un carácter andesítico del pulso eruptivo, con valores altos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -CaO y bajos en  $\text{K}_2\text{O}$ , acordes a los datos postulados en trabajos previos. Los porcentajes de elementos móviles obtenidos en las cenizas de la erupción del volcán Calbuco, para la fracción granulométrica alcanzada en la zona de San Martín de los Andes



**Figura 5.** a) Spider plot-REE normalizado según Boynton, 1984. b) Spider plot-Trazas normalizado según McDonough y Sun, 1995. Las tendencias de las Unidades Calbuco 1 a 4 se referencian de López-Escobar *et al.* (1992) (12 muestras); Sellés y Moreno (2011) (51 muestras).

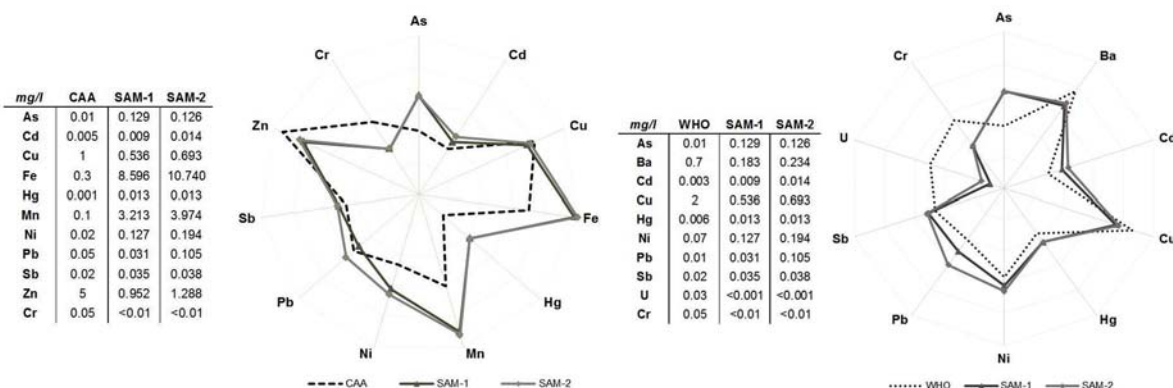


**Figura 6.** Diagrama que muestra las concentraciones de los elementos móviles en el lixiviado y su comparación con la composición global de la ceniza. Los elementos están en orden decreciente en función del valor de RML%. Las escalas de los gráficos están expresadas en función logarítmica.

evidencian que las fases que se solubilizan en contacto con medios acuosos corresponden a productos sublimados. No se detectaron porcentajes de elementos altamente móviles que tengan un impacto inmediato en el medio ambiente. Los elementos que superan los valores de potabilidad del agua (orden decreciente de concentración) determinados en los lixiviados de las cenizas recolectadas en San Martín de los Andes son: Fe, Mn, As, Ni, Sb, Pb, Hg y Cd. Estos resultados deben entenderse en el contexto del experimento de lixiviación donde la proporción agua/ceniza es de 50:1 (v/m). En consecuencia, el contexto climático e hidrogeológico de la cuenca que se ve afectada por la caída de ceniza puede generar un cambio en esta relación.

## AGRADECIMIENTOS

A los Centros Científicos y Tecnológicos (CCiT) de la Universidad de Barcelona por el soporte para la realización de ensayos geoquímicos XRF e ICP-MS/OES. A la Dra. Elizabeth Rovere a través de la red GEVAS-Argentina, por gestionar los contactos con el Sr. Eduardo Detang quien amablemente tomó la muestra SAM-1. Al Geólogo Guillermo Fernández, Jefe de División Diagnóstico Ambiental de la Secretaría de Ambiente de la Provincia de Córdoba, Argentina; quien gestionó los permisos para el transporte de la ceniza SAM-2 hacia Barcelona.



**Figura 7.** Gráfico radial que muestra la distribución de los elementos potencialmente tóxicos de SAM-1 y SAM-2 en el marco de los límites de potabilidad, según el Código Alimentario Argentino - CAA (A.N.M.A.T 2012) y la Organización Mundial de la Salud - WHO (WHO 2011). Los valores de referencia de ambos códigos están expresados en 1000 ml. Los Diagramas están en escala logarítmica, los productos lixiviados se expresan en 1g en 50 ml (1:50). Para una mejor visualización del Cr se coloca el valor del límite de detección dividido dos (LD <0.01 = 0.005).



## LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- A.N.M.A.T. 2012. Código Alimentario Argentino. Ley 18284. Cap. XII, actualizado 10/2012, [consulta 15 Enero 2017], Decreto N° 2126/71, Artículo 982 a 1079. Bebidas Hidricas, Agua y Agua Gasificada. Resolución Conjunta SPR-yRS y SAGAPyA N°68/2007 y N°196/2007. Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica. Ministerio de Salud, Presidencia de la Nación. [http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas\\_alimentos\\_caa.asp](http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp).
- Allard, P., Aiuppa A., Loyer H., Carot F., Gaudry A., Pinte G., Michel A. y Dongarra G. 2000. Acid gas and metal emission rates during long-lived basalt degassing at Stromboli volcano. *Geophysical Research Letters* 27 (8): 1207-1210.
- Boynton, W.V. 1984. Chapter 3. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies, in *Geochemistry*, P.H.B.T.-D. In ed., Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier, 2: 63-114.
- Daga, R., Ribeiro Guevara, S., Poire, D.G. y Arribére, M. 2014. Characterization of tephra dispersed by the recent eruptions of volcanoes Calbuco (1961), Chaitén (2008) and Cordón Caulle Complex (1960 and 2011), in Northern Patagonia. *Journal of South American Earth Sciences* 49: 1-14, doi: 10.1016/j.jsames.2013.10.006.
- Delmelle, P., Lambert, M., Dufrène, Y., Gerin, P. y Óskarsson, N. 2007. Gas/aerosol-ash interaction in volcanic plumes: New insights from surface analyses of fine ash particles. *Earth and Planetary Science Letters* 259: 159-170.
- Déruelle B. 1982. Petrology of the Plio-Quaternary volcanism of the south-central and meridional Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 14: 77-124.
- Fernández-Turiel, J.L., Gimeno, D., Rodríguez, J.J., Carnicero, M. y Valero, F. 2003. Spatial and seasonal variations of water quality in a mediterranean catchment: The Llobregat River (NE Spain). *Environmental Geochemistry Health* 25: 453-474.
- Georgakopoulos, A., Filippidis, A., Kassoli-Fournaraki, A., Fernández-Turiel, J.L., Llorens, J.F. y Mousty, F. 2002. Leachability of Major and Trace Elements of Fly Ash from Ptolemais Power Station, Northern Greece. *Energy Sources* 24:103-113.
- Harris, A.J.L., Dehn J. y Calvari S. 2007. Lava effusion rate definition and measurement: a review. *Bulletin of Volcanology* 70 (1): 1-22.
- Klerkx, J. 1965. Étude pétrologique de laves des volcans Villarrica, Calbuco, Osorno, Llaima (Chili Central). *Annales de la Société Géologique de Belgique* 88 (7-8): 452-471.
- Le Bas, M.J., Lemaître, R.W., Streckeis, A. y Zanettin, B. 1986. A Chemical Classification of Volcanic-Rocks Based on the Total Alkali Silica Diagram. *Journal of Petrology* 27 (3):745-750.
- Lechler, P.J. y Desilets, M.O. 1987. A review of the use of loss on ignition as a measurement of total volatiles in whole-rock analysis. *Chemical Geology* 63: 341-344.
- López-Escobar, L., Parada, M.A., Moreno, H., Frey, F.A. y Hickey-Vargas, R.L. 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 (2): 211-226.
- López-Escobar, L., Kilian, R., Kempton, P.D. y Tagiri, M. 1993. Petrography and geochemistry of Quaternary rocks from the Southern Volcanic Zone of the Andes between 41°30' and 46°00'S, Chile. *Revista Geológica de Chile* 20: 33-55.
- López-Escobar, L., Parada, M.A., Hickey-Vargas, R., Frey, F.A., Kempton, P.D. y Moreno, H. 1995. Calbuco Volcano and minor eruptive centers distributed along the Liquiñe-Ofqui Fault Zone, Chile (41°-42°S): contrasting origin of andesitic and basaltic magma in the Southern Volcanic Zone of the Andes. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 119: 345-361.
- McDonough, W.F. y Sun, S.S. 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120: 223-253.
- Rose, W. 1977. Scavenging of volcanic aerosol by ash: Atmospheric and volcanologic implications. *Geology* 5: 621-624.
- Ruggieri, F., Saavedra, J., Fernández-Turiel, J.L., Gimeno, D. y García-Valles, M. 2010. Environmental geochemistry of ancient volcanic ashes. *Journal of Hazardous Materials* 183: 353-365.
- Sellés, D. y Moreno, H. 2011. Geología del volcán Calbuco, Región de Los Lagos. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N° 130, Inscripción N° 211.937, Servicio Nacional de Geología y Minería, ISSN 0717-7283, 38 p.
- Stern, C.R. 2004. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile* 31 (2): 161-206.
- Óskarsson, N. 1980. The interaction between volcanic gases and tephra: fluorine adhering to tephra of the 1970 Hekla eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 8: 251-266.
- Watt, S.F.L., Pyle, D.M., Naranjo, J.A., Rosqvist, G., Mella, M., Mather, T.A. y Moreno, H. 2011. Holocene tephrochronology of the Hualaihue region (Andean southern volcanic zone, 42°S), southern Chile. *Quaternary International* 246: 324-343.
- WHO 2011. Guidelines for Drinking-water Quality. 4th ed. 541 p. World Health Organization.
- Winter J.D. 2014. Subduction-Related Igneous Activity, Part II: Continental Arcs. From Chapter 17 of *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*, Second Edition, John D. Winter by Pearson Education, Inc. Published by Pearson Prentice Hall. 369-394 p. ISBN 10: 1-292-02153-5. ISBN 13: 978-1-292-02153-9.
- Witham, C.S., Oppenheimer, C. y Horwell, C.J. 2005. Volcanic ash-leachates. A review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 141 (3-4): 299-326.
- Zellmer, G.F., Freymuth, H., Cembrano, J.M., Clavero, J.E., Veloso, E.A.E. y Sielfeld, G.G. 2014. Altered mineral uptake into fresh arc magmas: Insights from U-Th isotopes of samples from andean volcanoes under differential crustal stress regimes. *Geological Society of London, Special Publications* 385: 185-208.