

# ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS GEOQUÍMICOS DE VOLCANITAS JURÁSICAS DEL MACIZO DEL DESEADO, PROVINCIA DE SANTA CRUZ

Marta ALPERIN<sup>1</sup>, Horacio ECHEVESTE<sup>2</sup>, Raúl FERNÁNDEZ<sup>2</sup> y Giuliano BELLINI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Cátedra de Estadística, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP, Calle 64 N°3 (c/Diag. 113 y 120), 1900 La Plata, Buenos Aires. E-mail: alperin@fcnym.unlp.edu.ar

<sup>2</sup> INREMI, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP, CICBA

<sup>3</sup> Dipartimento di Mineralogia e Petrologia, Università di Padova, Italia

## RESUMEN

Durante el mapeo de detalle de la zona central del macizo del Deseado se reconoció un conjunto de unidades volcánicas jurásicas: lavas e ignimbritas de composición andesítica, dacítica y riolítica. Se realizó un análisis estadístico de los óxidos mayoritarios SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO (total), MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 73 muestras provenientes de ocho unidades volcánicas. La composición geoquímica total constituye un conjunto de datos cerrados o datos composicionales ya que la suma de las partes para cada muestra es un valor fijo de 100%. Para analizar las relaciones entre óxidos, entre unidades volcánicas y para examinar la existencia de subpoblaciones se emplearon gráficos de dos dimensiones de datos composicionales como herramienta exploratoria, análisis de agrupamiento entre muestras y métodos de inferencia estadística. Los resultados hallados permitieron: (a) Constatar la existencia de dos grupos de unidades volcánicas, uno constituido casi exclusivamente por riolitas y otro formado principalmente por andesitas y dacitas. Si bien el primer grupo reúne volcanitas que podrían incluirse en la Formación Chon Aike, las unidades volcánicas del segundo grupo no se ajustan a ninguna de las unidades formacionales definidas para el volcanismo jurásico de esta región. (b) Definir subgrupos de muestras que se ajustan estrechamente a las unidades volcánicas reconocidas, lo que indica la marcada relación entre estas y sus respectivas composiciones químicas. (c) Confirmar la ausencia de un intervalo (gap) composicional evidenciado en los diagramas TAS y AFM. (d) Indicar como más adecuado el mapeo de detalle de unidades litológicas (volcánicas) y/o litofaciales que el de formaciones ya que permite una mejor reconstrucción de la evolución del volcanismo de la región.

Palabras clave: *Datos composicionales, Biplot, análisis de agrupamiento, volcanismo Jurásico, macizo del Deseado.*

**ABSTRACT:** *Statistical analysis of geochemical data from Jurassic volcanic rocks of the Deseado Massif, province of Santa Cruz.*

During the detailed mapping of the central zone of the Deseado Massif, a group of Jurassic volcanic units consisting of lavas and ignimbrites of andesitic, dacitic and rhyolitic composition was identified. A statistical analysis of major oxides SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO (total), MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> from 73 samples originated from eight volcanic units was conducted. The total geochemical composition of each sample constitutes a closed set of data (or set of compositional data) as the sum of each sample's part is 100%. To analyze the relationships between oxides, between volcanic units, and to identify the existence of subsets, compositional biplots were used as an exploratory tool. In addition, cluster analysis of the samples and statistical inference were performed. The results allowed for: (a) Verification of the existence of two groups of volcanic units, a first group of mostly rhyolitic and a second group of mostly andesitic and dacitic. Although the first group includes volcanic units that could be included in the Chon Aike Formation, the volcanic units of the second group do not fit in any of the formations units defining the Jurassic volcanism of the region. (b) Definition of samples subsets that closely match well known volcanic units, indicating a defined relationship between the samples and their respective chemical compositions. (c) Confirmation of the absence of a compositional gap shown by the TAS and AFM diagrams. (d) Recognize that the detailed mapping of lithologic units and/or lithofacies is more representative than that of the formations, as it allows for a better representation of the volcanic evolution of the region.

Keywords: *Compositional data, Biplot, cluster analysis, Jurassic volcanism, Deseado Massif.*

## INTRODUCCIÓN

El macizo del Deseado es una provincia geológica ubicada en la Patagonia sur extrandina en la provincia de Santa Cruz. Una de sus características geológicas más importantes es el desarrollo, en el Jurásico medio a superior entre los 150 y 170 Ma, de una

intensa actividad volcánica. Las rocas generadas durante este evento han sido agrupadas en tres unidades principales: las Formaciones Bajo Pobre, Chon Aike y La Matilde. La Formación Bajo Pobre está integrada por basaltos, aglomerados volcánicos y andesitas subordinadas (Riccardi y Damborenea 1993). La Formación Chon Aike está

compuesta por pórfidos riolíticos, queratófidos, riolitas y andesitas, alternando con tobas de cristales y brechas volcánicas ácidas y mesosilícicas (Stipanovic y Reig 1956). La Formación La Matilde está compuesta por tobas arenosas, limosas y lutíticas laminares negras y conglomerados, delgados mantos de pórfiros cuarcíferos que pueden

pasar a tobos de pórfiros cuaríferos (Stipanovic y Reig 1955 y 1956). Las dos últimas formaciones se integran en el Grupo Bahía Laura. Esta subdivisión fue realizada fundamentalmente atendiendo a sus características de campo. Si bien Lesta y Ferello (1972) consideraron a las Formaciones Bajo Pobre y Chon Aike pertenecientes a un mismo ciclo efusivo, investigaciones posteriores sobre estas unidades concluyeron que ambas representan dos eventos desconectados genéticamente y se habrían formado en momentos diferentes como resultado de dos procesos distintos (De Giusto *et al.* 1980, Panza *et al.* 1994 a y b, Panza *et al.* 1998). Sin embargo trabajos recientes que incluyen el análisis de datos geoquímicos (Pankhurst y Rapela, 1995; Pankhurst *et al.* 1998, Echeveste *et al.* 1998, Riley *et al.* 2001), isotópicos (Féraud *et al.* 1999, Pankhurst *et al.* 2000) y relaciones de campo (Echeveste *et al.* 2001, Guido 2002) indican una vinculación temporal, espacial y genética entre los dos grupos litológicos. Por otra parte, la clasificación química las agrupa en dos familias bien definidas, andesitas para la Formación Bajo Pobre y riolitas para las Formaciones Chon Aike y La Matilde, con un intervalo (*gap*) composicional en los términos intermedios entre ambas (Pankhurst y Rapela 1995).

Por otra parte, un detallado estudio de campo de estas unidades efectuado en el marco de trabajos de investigación que ha desarrollado el Instituto de Recursos Minerales en la última década, especialmente en la zona central del macizo del Deseado, permitió reconocer, además de rocas andesíticas y riolíticas, la existencia de un conjunto de rocas dacíticas con asignación formacional dudosa. En estos trabajos los mapeos geológicos se realizaron utilizando el concepto de unidades volcánicas o unidades eruptivas *sensu* Fisher y Schmincke (1984), dado que cada una de las formaciones mencionadas estaba integrada por un conjunto numeroso de unidades cuya diferenciación, variaciones laterales y verticales e historia de depositación resultaba imprescindible conocer a la hora de modelar el proceso volcánico que las había generado (Echeveste 2005). En la Formación Chon Aike se incluyeron a todas las unidades riolíticas (fragmentarias o coherentes) mien-

tras que en la Formación Bajo Pobre se agruparon a las lavas y pórfidos andesíticos. El criterio preliminar de asignación formacional para las unidades volcánicas dacíticas fue el siguiente: se incluyeron en Chon Aike las ignimbritas y lavas mesocráticas y en Bajo Pobre las lavas melanocráticas.

Sin embargo, tanto la existencia de unidades dacíticas como la elección del concepto de unidades volcánicas como metodología de mapeo de semidetalle, plantearon varios interrogantes que se intentan dilucidar a lo largo de este trabajo:

- ¿Las dacitas constituyen una entidad aparte? De no ser así ¿con cuál de las dos formaciones tienen mayor afinidad? ¿De existir afinidad, geoquímica y/o de campo (yacencia y fábrica), ésta es lo suficientemente relevante para incluirlas en una u otra formación?

- ¿Sería posible considerar la presencia de las dacitas como una evidencia de la continuidad en el proceso evolutivo de las unidades volcánicas y volcanoclásticas de Bajo Pobre y Chon Aike? ¿Las dacitas salvarían el intervalo (*gap*) composicional señalado por Pankhurst y Rapela (1995)?

- ¿Qué es más adecuado para mapeos de detalle o semidetalle, el mapeo de unidades volcánicas o el de formaciones?

- ¿El análisis estadístico de la composición geoquímica total de todos los elementos mayoritarios, podría ser utilizada como una herramienta más para dilucidar problemas de definición de unidades volcánicas, asignaciones formacionales o posibles relaciones genéticas?

Frecuentemente datos geoquímicos, ya sea elementos mayoritarios expresados como óxidos, elementos traza, isótopos radiogénicos o estables, son utilizados para la clasificación de tipos de roca, identificación de tendencias evolutivas y caracterización de ambientes tectónicos. Para dilucidar los problemas planteados más arriba, en este trabajo se usaron los elementos mayoritarios. Estos constituyen una composición dado que, para cada muestra, la suma de todos los óxidos (partes o componentes) es una constante igual a 100%. El análisis estadístico de los datos se realizó en el marco teórico de los datos composicionales propuesto por Aitchison (1986) y ampliado por el grupo de investigación liderado por Pa-

wlowsky-Glahn en numerosos trabajos que tratan aspectos específicos del marco teórico metodológico cuyas referencias se encuentran a lo largo de este trabajo.

## MATERIAL Y MÉTODOS

Los datos geoquímicos de elementos mayoritarios analizados en este trabajo, fueron obtenidos con 73 muestras (Cuadro 1), que pertenecen a un conjunto de ocho unidades volcánicas definidas por Echeveste *et al.* (1999 y 2001) y Fernández *et al.* (2002): Ignimbritas Las Lajas, Flecha Negra y La Eugenia (riolíticas), Ignimbrita Valenciana (dacítica), Ignimbrita Enriqueta (riolítica-dacítica), lavas andesíticas, dacíticas y riolíticas (véase Fig. 1). Las unidades lávicas se asocian principalmente a dos posibles centros volcánicos, el centro efusivo Bajo del Fénix con lavas andesíticas y dacíticas (Echeveste *et al.* 2001) y el centro efusivo Cerro Campana con lavas andesíticas, dacíticas y riolíticas (Fernández *et al.* 2002). Las rocas fueron analizadas en el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Trieste, con un espectrómetro XRF Phillips PW 1404. Los óxidos utilizados en este trabajo fueron: SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO (total), MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Se excluyeron las muestras que presentaban una pérdida de agua por calcinación >6% y aquellas con una relación K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O > 2,5 consideradas rocas alteradas y/o con metasomatismo potásico (Echeveste 2005) como en el caso de las Ignimbritas Las Vallas y San Vicente presentes también en el área de estudio.

Entre los sistemas de clasificación de rocas volcánicas basados en criterios químicos, los más difundidos toman en cuenta el contenido de algunos elementos mayoritarios como el diagrama TAS (Total alkalis-silica) de Le Maitre (1989) (SiO<sub>2</sub> vs Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, en %), o el diagrama ternario AFM de Irvine y Baragar (1971) (donde A=K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O, F=FeO (t) y M=MgO, en %), en tanto que otros consideran elementos inmóviles (Winchester y Floyd 1977). Es poco frecuente que se utilice la composición geoquímica total de elementos mayoritarios, tal como lo hace el método R1-R2 (R1=[4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)] y R2=[Al+2Mg+6Ca], en milicaciones) de la Roche *et al.* (1980),

tanto con propósitos de clasificación, como en la construcción de diagramas de variación o para la comprensión de procesos relacionados con el volcanismo. Sin embargo en los últimos años se han publicado varios trabajos científicos desde esta perspectiva (Rollinson 1992, Grunsky y Smees 2003, Martín-Fernández *et al.* 2003, Martín-Fernández *et al.* 2005).

La composición geoquímica total de elementos mayoritarios constituyen un conjunto de datos cerrados o datos composicionales (Aitchison 1986) ya que la suma de las partes o componentes para cada muestra es un valor fijo de 100%. Chayes (1960, 1962) advierte sobre el problema de la suma constante al indicar que los datos expresados como porcentaje no son libres de variar independientemente, ya que cuando la proporción de una parte se incrementa al menos una de las restantes partes debe decrecer, por lo cual se producen correlaciones negativas espurias. La restricción impuesta por la suma constante trae consecuencias que hacen inadecuados los tratamientos estadísticos estándares. Aitchison (1986) y posteriormente Aitchison (1999), Aitchison *et al.* (2000), Aitchison y Greenacre (2002) Pawlowsky-Glahn y Egozcue (2001, 2002), Martín-Fernández *et al.* (1998), von Eynatten *et al.* (2002, 2003), entre otros proponen un marco teórico-metodológico que contempla las características especiales de las composiciones, y particularmente su espacio muestral el Simplex ( $S^p$ ). Este marco teórico-metodológico se utilizó en el presente trabajo. Para hacer más ágil la lectura, los diferentes procedimientos seguidos se describen antes de presentar los resultados. Los cálculos y gráficos estadísticos se realizaron con el software *Excel-base CoDa-Pack* (Thio 2004).

## RESULTADOS

### DESCRIPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS

Los datos correspondientes a los análisis geoquímicos volcados en el diagrama TAS (Fig. 2) permiten confirmar la presencia de rocas andesíticas, riolíticas y dacíticas. Las rocas se ubican en el campo subcalino. Se destaca la dispersión de los tenores de  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  para los tres tipos de rocas.

**CUADRO 1:** Análisis químicos de elementos mayoritarios de ocho unidades volcánicas (UV) de la zona central del Macizo del Deseado.

Muestra	UV	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
PT 126	**LA	60,25	0,67	15,76	6,04	0,12	3,96	6,33	2,01	1,88	0,16	2,82
PT 183	**LA	56,86	0,61	17,24	6,53	0,12	4,28	6,39	2,37	1,76	0,15	3,69
PT 84	**LA	55,95	0,60	17,18	6,55	0,12	4,61	6,85	2,27	1,97	0,13	3,76
PT 85	**LA	56,12	0,64	16,53	7,38	0,13	4,36	6,74	2,30	1,82	0,14	3,84
PT 127	**LA	57,89	0,64	16,10	6,15	0,12	4,30	5,45	2,83	2,39	0,13	3,98
PT 128	**LA	56,49	0,75	15,87	6,92	0,16	4,59	7,00	2,10	1,95	0,14	4,03
PT 186	**LA	58,04	0,65	15,37	6,35	0,15	5,21	5,87	1,82	2,11	0,13	4,30
PT 160	**LA	55,91	0,80	15,99	6,61	0,14	3,07	8,70	1,91	1,81	0,18	4,87
PT 83	**LA	54,31	0,81	16,02	7,52	0,15	4,66	7,63	2,06	1,74	0,16	4,93
PT 159	**LA	55,09	0,80	16,23	6,87	0,12	3,41	8,58	2,02	1,61	0,18	5,10
PT 184	**LA	59,13	0,68	16,38	5,40	0,10	2,86	4,93	2,75	2,53	0,12	5,11
PT 189	**LA	55,31	0,63	15,66	6,51	0,11	6,02	6,23	3,71	0,58	0,13	5,11
PT 185	**LA	57,21	0,69	14,68	6,31	0,11	5,02	7,57	1,63	1,51	0,12	5,15
PT 108	**LA	53,99	0,70	16,44	7,09	0,16	4,46	7,07	2,02	2,33	0,13	5,60
PT 187	**LD	61,89	0,53	16,08	4,02	0,07	2,25	3,47	3,44	3,42	0,11	4,72
PT 25	*LA	58,16	0,71	16,81	6,22	0,11	2,47	7,91	2,80	1,90	0,10	2,81
PT 26	*LA	56,72	0,83	18,12	6,54	0,10	1,95	8,66	2,92	0,40	0,13	3,64
PT 31	*LA	59,90	0,65	16,05	5,66	0,12	2,88	5,06	3,01	2,67	0,14	3,86
PT 24	*LA	60,21	0,59	16,97	5,28	0,10	2,06	7,33	2,59	0,62	0,11	4,14
PT 81	*LA	57,69	0,76	16,05	6,44	0,10	2,31	7,14	1,92	3,15	0,13	4,32
PT 44	*LA	58,92	0,61	16,01	5,87	0,09	3,30	7,15	2,42	0,69	0,11	4,84
PT 80	*LA	58,87	0,63	15,54	5,52	0,08	3,01	6,14	2,16	2,73	0,14	5,19
PT 82	*LA	57,37	0,66	16,22	6,34	0,09	5,38	6,05	2,25	2,03	0,11	3,51
PT 129	*LD	66,45	0,53	15,20	3,68	0,09	1,82	3,79	2,79	3,43	0,18	2,05
PT 170	*LD	63,66	0,60	15,36	4,52	0,10	2,51	2,55	4,00	3,95	0,21	2,52
PT 88	*LD	66,60	0,50	15,49	3,49	0,05	1,62	3,03	2,47	4,07	0,15	2,54
PT 27	*LD	65,38	0,32	16,62	2,68	0,05	1,28	3,51	3,44	4,07	0,07	2,59
PT 32	*LD	62,08	0,64	16,59	4,67	0,08	2,37	5,04	2,69	2,76	0,15	2,95
PT 29	*LD	63,03	0,52	15,75	4,87	0,09	2,86	4,13	3,01	2,57	0,18	2,98
PT 30	*LD	62,96	0,56	16,24	5,23	0,06	1,28	4,29	3,58	2,56	0,17	3,06
PT 169	*LD	64,11	0,56	15,13	4,33	0,10	2,59	3,62	2,94	3,36	0,19	3,07
PT 172	*LD	64,26	0,57	15,04	4,35	0,06	2,10	4,39	3,25	2,65	0,20	3,13
PT 23	*LR	73,60	0,14	13,94	1,42	0,11	0,37	1,09	3,57	4,46	0,03	1,27
PT 122	EN	68,66	0,27	15,87	2,04	0,06	0,64	2,57	2,88	4,36	0,05	2,59
PT 124	EN	69,69	0,19	15,36	1,86	0,07	0,62	1,84	2,75	4,90	0,04	2,68
PT 123	EN	68,93	0,21	15,50	1,98	0,07	0,43	2,21	3,20	4,69	0,05	2,73
PT 87	EN	68,72	0,27	15,50	1,99	0,06	0,71	2,93	2,54	4,39	0,07	2,83
PT 125	EN	66,12	0,24	16,38	2,11	0,05	0,91	3,43	2,31	4,41	0,06	3,98
PT 107	FN	75,72	0,07	13,43	1,06	0,05	0,14	0,68	3,07	4,73	0,01	1,04
PT 48	FN	75,78	0,06	13,21	1,11	0,03	0,13	0,57	2,84	4,69	0,01	1,57
PT 35	FN	74,12	0,08	14,27	0,71	0,01	0,28	0,78	2,96	4,71	0,04	2,04
PT 37	FN	75,23	0,08	13,18	1,03	0,02	0,23	0,62	2,66	4,66	0,01	2,29
PT 50	FN	74,32	0,08	13,64	1,12	0,02	0,31	0,68	2,82	4,64	0,01	2,35
PT 49	FN	73,73	0,07	12,41	1,74	0,06	0,08	0,65	3,49	4,33	0,01	3,46
PT 36	FN	74,03	0,07	12,48	1,06	0,05	0,07	0,64	3,67	4,36	0,02	3,56
PT 51	FN	73,79	0,08	12,45	1,11	0,06	0,10	0,76	4,38	3,13	0,01	4,13
PT 161	FN	73,93	0,08	12,33	1,08	0,06	0,06	0,68	4,62	2,80	0,01	4,36
PT 28	FN	73,08	0,08	12,70	0,95	0,02	0,10	0,74	3,67	3,24	0,01	5,41
PT 130	IV	68,44	0,40	15,53	2,76	0,11	1,07	2,11	2,76	4,75	0,12	1,96
PT 18	IV	65,95	0,47	15,89	3,62	0,08	1,78	2,61	3,54	3,79	0,15	2,12
PT 17	IV	66,27	0,48	15,35	3,58	0,12	2,03	3,26	3,11	3,50	0,15	2,16
PT 95	IV	66,96	0,45	15,11	3,59	0,07	1,77	3,38	2,81	3,52	0,14	2,19
PT 93	IV	66,28	0,49	15,70	3,57	0,18	1,90	3,18	2,90	3,40	0,15	2,26
PT 175	IV	70,68	0,29	15,78	2,01	0,05	0,45	1,37	2,75	4,27	0,09	2,27
PT 89	IV	65,27	0,55	15,38	3,89	0,07	2,24	3,69	2,88	3,47	0,17	2,40

Muestra	UV	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO (t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
PT 33	IV	64,94	0,52	15,82	3,58	0,08	1,72	4,28	3,01	3,18	0,16	2,73
PT 121	IV	66,74	0,39	15,77	2,97	0,07	1,15	3,10	3,32	3,61	0,10	2,79
PT 176	IV	67,06	0,40	14,92	2,89	0,07	0,95	3,32	2,68	3,48	0,11	4,13
PT 168	IV	66,21	0,41	14,62	3,2	0,08	1,33	3,43	2,60	3,32	0,12	4,67
PT 92	LE	68,75	0,35	15,62	2,64	0,05	1,12	2,37	3,15	3,71	0,10	2,13
PT 91	LE	71,39	0,31	14,29	2,34	0,03	0,70	2,14	2,52	3,94	0,08	2,26
PT 90	LE	70,00	0,29	14,67	2,21	0,07	0,85	1,86	2,04	4,01	0,07	3,95
PT 110	LL	72,64	0,17	14,46	1,48	0,03	0,36	1,81	3,41	4,24	0,04	1,36
PT 102	LL	72,77	0,16	14,91	1,48	0,03	0,46	1,31	3,11	4,27	0,04	1,46
PT 96	LL	72,83	0,16	14,35	1,42	0,03	0,44	1,63	3,02	4,43	0,04	1,64
PT 45	LL	71,42	0,17	15,02	1,48	0,03	0,40	2,2	3,42	4,11	0,04	1,70
PT 106	LL	72,12	0,16	15,06	1,52	0,03	0,38	1,28	2,39	4,73	0,04	2,30
PT 46	LL	70,6	0,19	15,43	1,23	0,05	0,40	2,67	3,04	3,95	0,04	2,41
PT 103	LL	71,11	0,20	14,67	1,45	0,06	0,41	2,54	2,69	4,37	0,04	2,49
PT 109	LL	71,22	0,17	14,92	1,54	0,03	0,53	1,54	2,43	4,84	0,03	2,76
PT 47	LL	68,34	0,22	15,87	1,67	0,08	0,49	3,53	2,94	3,79	0,05	3,02
PT 158	LL	72,59	0,13	13,53	1,28	0,04	0,25	1,72	3,67	2,98	0,03	3,80

LA: Lavas andesíticas, LD: Lavas dacíticas, LR: Lavas riolíticas, EN: Ignimbrita Enriqueta, FN: Ignimbrita Flecha Negra, IV: Ignimbrita Valenciana, LE: Ignimbrita La Eugenia, LL: Ignimbritas Las Lajas. \*: Centro efusivo Cerro Campana, \*\*: Centro efusivo Bajo del Fénix.

En el diagrama AFM (Irvine y Baragar 1971) (Fig.3) se observa la disposición del conjunto de muestras en el campo calcoalcalino. En el cuadro 2 se presenta la composición promedio (Centro g<sub>m</sub>) de las riolitas, de las andesitas y de las dacitas obtenida cal-

culando las medias geométricas de las partes A, F y M y luego efectuado el cierre o clausura. En este cuadro se incluye también una medida de variabilidad para cada tipo de roca, la varianza total, calculada a partir de la matriz de varianzas de los logcocientes

entre partes (Aitchison 1986, Martín-Fernández 2000). La mayor dispersión de los datos se encuentra en torno al tenor de A, se destaca sin embargo la variabilidad que presentan las andesitas respecto a los tenores de F y de M que no la poseen las dacitas y riolitas.

El cuadro 3 presenta una síntesis de la geoquímica de las muestras correspondiente a las andesitas, dacitas y riolitas. Entre los cationes analizados merecen mención los que interviene en los diagramas de clasificación TAS y AFM. El SiO<sub>2</sub> y el K<sub>2</sub>O aumentan sus tenores desde las andesitas a las riolitas, el FeO(t) y el MgO disminuyen sus contenidos en el mismo sentido. Para este cortejo de rocas el Na<sub>2</sub>O presenta valores promedios aproximadamente iguales en dacitas y riolitas y ligeramente superiores al de las andesitas. Esto sugiere que la dispersión de las muestras en el diagrama AFM está más influenciado por los tenores de K<sub>2</sub>O que por los contenidos de Na<sub>2</sub>O. La variabilidad mayor se presenta en las andesitas, seguidas por la riolitas; las dacitas constituyen el grupo más homogéneo.

Para analizar las relaciones entre compo-

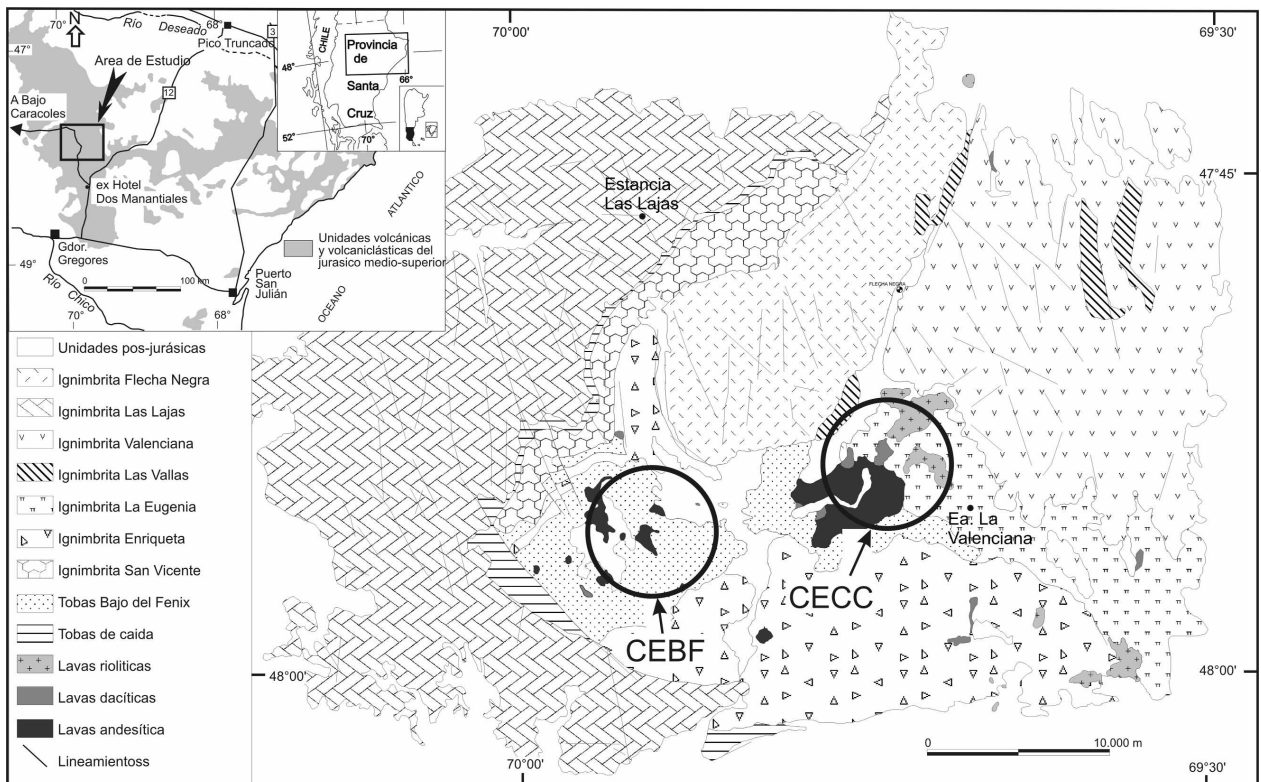


Figura 1: Mapa geológico del área estudiada. CEBF: Centro efusivo Bajo del Fénix. CECC: Centro efusivo Cerro Campana.

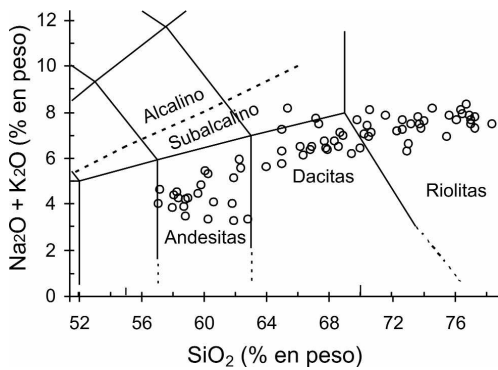


Figura 2: Ubicación de los datos en un diagrama clasificatorio TAS (Le Maitre 1989).

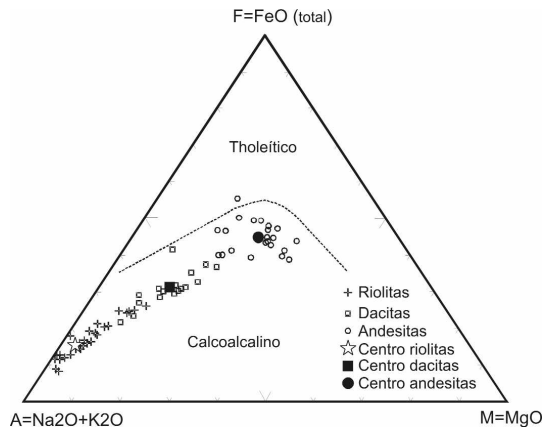


Figura 3: Ubicación de los datos obtenidos en un diagrama AFM (Irvine y Baragar 1971) donde se observa la distribución de rocas según una suite calcoalcalina. Se grafican también las medias geométricas (centros) AFM correspondientes a riollitas, dacitas y andesitas.

entes, entre muestras y entre ambas se empleó como herramienta exploratoria los gráficos de dos dimensiones (*biplot*) de datos composicionales (Aitchison y Greenacre 2002). La construcción del gráfico de dos dimensiones (*biplot*) (Fig. 4) se realizó a partir de la implementación de un Análisis de Componentes Principales, previa transformación logcociente centrada (*clr*) de los datos y cálculo de la matriz T de varianza-covarianza. La transformación *clr* se efectuó

calculando, para cada muestra, el logcociente de cada parte sobre la media geométrica de la muestra. Las dos primeras Componentes Principales, CP1 y CP2, explican el 89,94% de la varianza total (Fig. 4) y la CP3 sólo explica el 3,6% restante. En el plano que forman CP1 y CP2 están bien representados 8 de los 10 óxidos. Sólo el MnO y el CaO tienen baja representación (ver % de reconstrucción en figura 4a). Los óxidos de mayor carga en la

CUADRO 2: Estadísticos Centro  $g_m$  y varianza total (VT) para Andesitas, Dacitas y Riollitas obtenida de las partes A, F y M.

	Centro $g_m$				n
	A	M	F	VT	
ANDESITAS	29,22	25,84	44,93	0,09	22
DACITAS	54,38	14,67	30,94	0,08	20
RIOLLITAS	80,48	3,50	16,01	0,40	31

CP1 son  $K_2O-Na_2O-SiO_2$  con valores positivos y  $MgO$  con valores negativos; los de mayor carga en la CP2 son  $MnO$  con valor positivo y el  $K_2O$  y  $P_2O_5$  con valores negativos. Las cargas quedan representadas por la proyección de los rayos (líneas que unen el centro del gráfico de dos dimensiones -biplot- con la componente) sobre los ejes de la CP1 y la CP2. Los óxidos de mayor variabilidad son el  $K_2O$  el  $MgO$  y  $P_2O_5$  (rayos largos). El  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  y  $SiO_2$  forman un grupo de óxidos muy correlacionados entre sí dado el pequeño ángulo que los separa (cosenos de los ángulos entre rayos cercanos a 1). Lo mismo sucede entre  $TiO_2$  y  $MgO$ . Por otra parte, el enlace (línea que une dos óxidos)  $FeO(t)-P_2O_5$  forma un ángulo relativamente grande con el enlace que forma el  $MgO$  con cada uno de los elementos del grupo  $Al_2O_3-Na_2O-SiO_2$ . Esto sugiere que el logcociente de los dos primeros está poco correlacionado con los logcocientes entre  $MgO$  y cualquiera de los elementos del grupo  $Al_2O_3-Na_2O-SiO_2$ . La posición alineada de  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  y  $MgO$  sugiere una relación lineal en la subcomposición donde  $\ln(MgO/Al_2O_3) \sim 1,16 \ln(MgO/Na_2O) = cte.$  (Fig.4a).

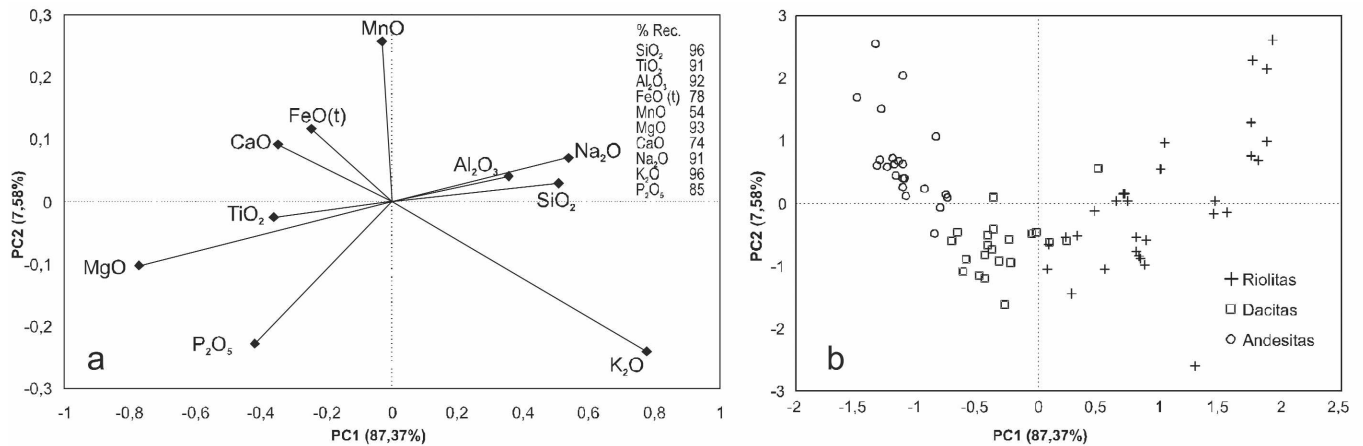
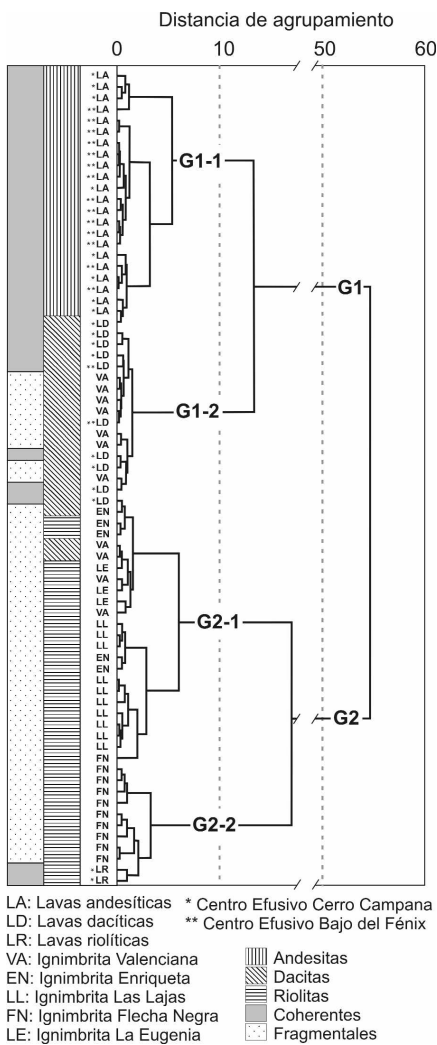


Figura 4: a) Gráfico de dos dimensiones (*biplot*) de óxidos mayoritarios *clr*-transformados. b) Ubicación de las muestras en el gráfico de dos dimensiones (*biplot*) de óxidos mayoritarios. % Rec: % de la variabilidad de una variable explicada por las dos primeras componentes principales.



**Figura 5:** Dendrograma de muestras utilizando el método de agrupamiento Ward y el cuadrado de la distancia euclidiana con la composición de óxidos mayoritarios *clr*-transformados. Las líneas discontinuas indican el nivel de corte del árbol para obtener los grupos G1 y G2 y los subgrupos G1-1, G1-2, G2-1 y G2-2.

Es de destacar que en torno a la CP1 las muestras se ordenan desde los términos menos evolucionados hacia los más evolucionados (andesitas, dacitas y riolitas). Los mayores contenidos de MgO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y FeO(t) y menores contenidos de K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> los presentan las andesitas seguidos por las dacitas. Para las riolitas estas relaciones cambian en sentido inverso, presentando los mayores contenidos de K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y los menores contenidos de MgO, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y FeO(t). Por otra parte, las dacitas y andesitas se ubi-

**CUADRO 3:** Estadísticos Centro  $g_m$  y varianza total (VT) para andesitas, dacitas y riolitas.

	Centro $g_m$										VT	n
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO(t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
ANDESITAS	60,20	0,72	17,05	6,67	0,12	3,84	7,12	2,43	1,71	0,14	0,50	22
DACITAS	67,30	0,49	16,14	3,79	0,08	1,79	3,65	3,11	3,50	0,14	0,35	20
RIOLITAS	74,43	0,15	14,69	1,50	0,04	0,33	1,38	3,14	4,31	0,03	0,42	31

**CUADRO 4:** Estadísticos Centro  $g_m$  y varianza total (VT) para G1 y G2 corresponden a los grupos definidos en el análisis de agrupamientos.

	Centro $g_m$										VT	n
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO(t)	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		
G2	74,11	0,16	14,84	1,54	0,04	0,35	1,47	3,13	4,32	0,03	0,50	35
G1	63,81	0,63	16,73	5,33	0,10	2,82	5,32	2,75	2,36	0,15	0,35	38

can en el semieje negativo y las riolitas en el semieje positivo. Respecto a la CP2 las andesitas se disponen en el semieje positivo, las dacitas en el semieje negativo y las riolitas muy dispersas en ambos semiejes (Fig. 4b). Todas las andesitas tienen un comportamiento similar en la relación K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O (Na<sub>2</sub>O>K<sub>2</sub>O) y diferente al de las dacitas y riolitas (Na<sub>2</sub>O<K<sub>2</sub>O). Se señala la presencia de algunos valores pertenecientes a riolitas y andesitas alejados del resto de las observaciones pero que poseen características litológicas y de yacencia que justifican su permanencia en el análisis estadístico.

## DEFINICIÓN DE SUBPOBLACIONES Y AGRUPAMIENTO DE DATOS

*Análisis de agrupamiento:* Una de las hipótesis a considerar fue la existencia de subpoblaciones según la afinidad geoquímica entre las distintas unidades volcánicas por lo que se llevó a cabo un análisis de agrupamiento entre muestras. El análisis se efectuó a partir de los datos logcociente centrados (*clr*) utilizando el método de agrupación de Ward (1963). Este método se fundamenta en el concepto de variabilidad; intenta la minimización de la suma de cuadrados dentro de dos grupos (hipotéticos) cualquiera que se van formando en cada paso. Martín-Fernández *et al.* (1998) y Martín-Fernández (2000) consideran que este método da los mejores resultados.

El dendrograma de elementos mayores de la figura 5 muestra dos grandes grupos: el grupo 1 (G1) asocia 38 muestras de composición andesítica y dacítica, mientras que el grupo 2 (G2) reúne 35 muestras, mayoritariamente de composición riolítica. Entre

ambos existe una clara diferencia en composición (véase distancia de unión entre G2 y G1 y figura 5).

Las muestras que conforman los grupos también fueron analizadas respecto a las unidades volcanoclásticas mapeadas, y a la yacencia y fábrica, información que no fue utilizada como una variable para realizar el análisis de agrupamiento.

En el grupo G1, conformado por lavas e ignimbritas, se diferencian dos subgrupos. El primero (G1-1, 23 muestras) está formado casi exclusivamente por lavas andesíticas de los centros efusivos Bajo del Fénix y Cerro Campana. El segundo (G1-2, 15 muestras) reúne a la Ignimbrita Valenciana, a las muestras de la zona basal de la Ignimbrita Enriqueta, a las lavas dacíticas del centro efusivo Cerro Campana (y una del centro efusivo Bajo del Fénix); es conspicua la composición dacítica de todas ellas.

En el grupo G2 predominan las ignimbritas. Se diferencian dos subgrupos. El primero (G2-1) asocia por un lado a las 10 muestras de la Ignimbrita Las Lajas, a una muestra de la Ignimbrita Flecha Negra y a dos de la Ignimbrita Enriqueta; por otro asocia a 3 muestras de la Ignimbrita Valenciana, a todas las de la Ignimbrita La Eugenia y de la Ignimbrita Enriqueta y a una muestra de lava dacítica del centro efusivo Cerro Campana. En tanto, en el grupo G2-2, se encuentran las muestras de la Ignimbrita Flecha Negra y las lavas riolíticas del centro efusivo Cerro Campana.

*Análisis de promedios y estructura de las matrices de varianza-covarianza:* El análisis de agrupamiento permitió distinguir dos grupos de muestras cuyos centros son diferentes (Cuadro 4), sin embargo corresponde pre-

**CUADRO 5** Resultados de las pruebas de hipótesis sobre normalidad composicional multivariante (TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO(t), MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>).

	Grupo 1 (n=38)			Grupo 2 (n=35)			
	A-D	C-vM	W	A-D	C-vM	W	
MUD	TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>	0,4703	0,0780	0,0733	0,9397	0,1241	0,1230
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0,6461	0,0971	0,0970	0,4939	0,0703	0,0694
	FeO/SiO <sub>2</sub>	<b>1,3824</b>	<b>0,2156</b>	<b>0,2079</b>	0,328	0,0452	0,0451
	MnO/SiO <sub>2</sub>	0,2756	0,0348	0,0344	0,6767	0,1133	0,1070
	MgO/SiO <sub>2</sub>	0,4561	0,0588	0,0586	0,6676	0,1102	0,0992
	CaO/SiO <sub>2</sub>	<b>1,2992</b>	<b>0,2072</b>	<b>0,2048</b>	<b>1,1128</b>	0,1547	0,1535
	Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,1300	0,0167	0,0160	0,2173	0,0300	0,0284
	K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	<b>3,3880</b>	<b>0,4967</b>	<b>0,4106</b>	<b>2,0956</b>	<b>0,3198</b>	<b>0,2667</b>
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub>	0,3236	0,0522	0,0504	<b>1,4812</b>	<b>0,2074</b>	<b>0,1990</b>
	(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,5718	0,0884	0,0364	0,336	0,0296	0,0380
(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , FeO/SiO <sub>2</sub> )	0,3565	0,0443	0,0429	1,0184	0,1117	0,0989	
(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , MnO/SiO <sub>2</sub> )	0,3914	0,0631	0,0526	0,7496	0,1015	0,0502	
(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , MgO/SiO <sub>2</sub> )	0,4320	0,0597	0,0629	2,3503	0,4149	0,0593	
(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , CaO/SiO <sub>2</sub> )	0,7820	0,1075	0,0603	0,3881	0,055	0,0635	
(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	0,7391	0,1080	0,0729	0,2361	0,0219	0,0306	
(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	1,8124	0,1976	0,1830	0,9397	0,1556	0,0985	
(TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,9708	0,1061	0,0904	1,1793	0,2018	0,0907	
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , FeO/SiO <sub>2</sub> )	0,6294	0,0996	0,0456	0,6169	0,0706	0,0783	
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , MnO/SiO <sub>2</sub> )	0,2841	0,0303	0,0209	1,0254	0,1324	0,0500	
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , MgO/SiO <sub>2</sub> )	0,2757	0,0179	0,0249	2,5633	0,4081	0,0498	
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , CaO/SiO <sub>2</sub> )	0,7212	0,0966	0,0253	0,2736	0,0164	0,0237	
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	0,7824	0,1080	0,0352	0,3358	0,0273	0,0345	
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	1,8892	0,1860	0,1839	0,7710	0,1200	0,0919	
(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,7212	0,0744	0,0427	1,5699	0,2672	0,0632	
(FeO/SiO <sub>2</sub> , MnO/SiO <sub>2</sub> )	0,6735	0,1157	0,0889	0,4897	0,0561	0,0293	
(FeO/SiO <sub>2</sub> , MgO/SiO <sub>2</sub> )	0,6548	0,0961	0,0917	1,6429	0,2943	0,1272	
(FeO/SiO <sub>2</sub> , CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,3461	0,2072	0,0400	0,3238	0,0337	0,0412	
(FeO/SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	1,2271	0,1767	0,0594	0,199	0,0139	0,0201	
(FeO/SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	2,3939	0,2510	0,2206	0,7156	0,1391	0,0794	
(FeO/SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,8568	0,0813	0,0738	0,875	0,1345	0,0747	
(MnO/SiO <sub>2</sub> , MgO/SiO <sub>2</sub> )	0,2163	0,0201	0,0235	1,9796	0,3370	0,0641	
(MnO/SiO <sub>2</sub> , CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,3057	0,1996	0,0321	0,2981	0,0319	0,0379	
(MnO/SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	0,3006	0,0255	0,0273	0,2388	0,0231	0,0214	
(MnO/SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	1,3667	0,1639	0,1514	1,6888	0,3051	0,0905	
(MnO/SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,5387	0,0398	0,0468	0,7245	0,1141	0,0523	
(MgO/SiO <sub>2</sub> , CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,8034	0,2549	0,0497	0,3443	0,0431	0,0494	
(MgO/SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	0,8937	0,1129	0,0482	0,3727	0,0356	0,044	
(MgO/SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	1,7377	0,1759	0,1611	1,0910	0,1934	0,1195	
(MgO/SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,6435	0,0819	0,0389	0,9377	0,1872	0,1058	
(CaO/SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	1,0920	0,1599	0,0455	0,3038	0,0261	0,0334	
(CaO/SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	2,8415	0,3198	<b>0,2644</b>	0,8940	0,1290	0,1047	
(CaO/SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,6481	0,0665	0,0596	1,6098	0,2558	0,0674	
(Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> , K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> )	<b>4,1684</b>	<b>0,7972</b>	0,1389	<b>3,1685</b>	0,4960	0,0752	
(Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,1761	0,0183	0,0206	0,6764	0,1270	0,0673	
(K <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> )	0,7444	0,1120	0,1181	1,0845	0,2246	0,1176	
RT	1,3072	0,1799	0,1170	0,9018	0,1305	0,1057	

Con negrita los valores mayores que los niveles críticos de tabla para niveles de significación del 1%, A-D: Anderson-Darling, C-vM: Cramer-von Mises, W: Watson, MUD: Prueba de los Marginales, BAD: Pruebas Bivariadas, RT: Prueba Radius.

guntarse si las diferencias son estadísticamente significativas. Para validar la existencia de los dos grupos

se realizaron pruebas estadísticas sobre supuestos de normalidad composicional multivariante y sobre igualdad de centros y de

estructura de la matriz de varianza-covarianza de los diferentes grupos. Esto requirió la transformación logcociente aditiva (*alr*) de los datos. La transformación *alr* se efectuó calculando, para cada muestra, todos los logcocientes de las partes sobre el SiO<sub>2</sub>. Se eligió SiO<sub>2</sub> como divisor debido a que esta variable suele emplearse para comparar los patrones de variación de los otros óxidos como por ejemplo en los diagramas tipo Harker.

Para el G1 y el G2 determinados, se realizaron las pruebas de hipótesis de normalidad composicional multivariante: normalidad marginal, pruebas bivariadas y prueba radius, (Aitchison 1986, Pawlowsky-Glahn y Buccianti 2002). Los resultados numéricos de las pruebas se presentan en el cuadro 5 y los valores críticos de las pruebas en el cuadro 6. Para el G1 (n=38) sólo se rechaza la hipótesis de normalidad de los marginales para FeO/SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> y CaO/SiO<sub>2</sub>, para los demás óxidos se acepta con niveles de significación mayores al 10%. Se rechazan la hipótesis bivariadas para CaO/SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>, las restantes se aceptan para un nivel de significación mayor a 2,5%. Por último la prueba radius también se acepta para niveles de significación mayores al 10%. Para el G2 (n=35), los valores calculados comparados con los valores de tabla indican que sólo se rechaza la hipótesis de normalidad de los marginales para K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>, CaO/SiO<sub>2</sub> y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>, para los demás óxidos se acepta con niveles de significación mayores al 5%. Las pruebas bivariadas, se aceptan prácticamente todas para un nivel de significación mayor de 2.5%. Por último la prueba radius también se acepta para un nivel de significación mayor al 10%. Con estos resultados estaríamos en condiciones de aceptar la hipótesis de normalidad composicional multivariante de los componentes de ambos grupos.

Los resultados obtenidos en las pruebas de normalidad composicional multivariante justifican realizar pruebas de hipótesis sobre la igualdad de centros y/o de estructuras de matrices de varianza-covarianza de ambos grupos de muestras (Aitchison 1986, Pawlowsky-Glahn y Buccianti 2002). Los resultados se presentan en el cuadro 7. El hecho que los niveles de significación en

**CUADRO 6:** Valores críticos para las pruebas de ln-normalidad aditiva (tomado de Aitchison 1986).

		Nivel de significación (%)			
		10	5	2,5	1
Prueba de los Marginales	Anderson-Darling	0,656	0,787	0,918	1,092
	Cramer-von Mises	0,104	0,126	0,148	0,178
Pruebas Bivariadas y Radius	Watson	0,096	0,116	0,136	0,163
	Anderson-Darling	1,933	2,492	3,070	3,857
	Cramer-von Mises	0,347	0,461	0,581	0,743
	Watson	0,152	0,187	0,221	0,267

**CUADRO 7:** Resultado de las pruebas de hipótesis sobre la igualdad de centros y la estructura de matrices de varianza-covarianza.

Hipótesis	Valor del test	$\chi^2$	GL	Sig (%)
$\mu_1 = \mu_2, \Sigma_1 = \Sigma_2$	385,55	105,988	65	0,1
$\mu_1 \neq \mu_2, \Sigma_1 = \Sigma_2$	252,36	80,077	45	0,1
$\mu_1 \neq \mu_2, \Sigma_1 \neq \Sigma_2$	120,35	27,877	9	0,1

GL: grados de libertad, Sig: significación

estos casos es cercano a cero, indica que las hipótesis de igualdad de centros o de estructura de covarianzas o ambas pueden ser rechazadas, lo que estaría confirmando la existencia de dos grupos diferentes de muestras: el grupo 1 (andesitas y dacitas) y el grupo 2 (riolitas).

## INTERPRETACIÓN

Los resultados de los análisis estadísticos realizados con los 10 óxidos mayoritarios consistentes en el gráfico de dos dimensiones (*biplo*), agrupamiento y análisis de los centros y de la estructura de la matriz de varianza-covarianza, indican que las andesitas y las dacitas presentan características geoquímicas comunes y diferentes a las de las riolitas. La afinidad geoquímica de las dacitas con las andesitas de la Formación Bajo Pobre señalaría que forman una única entidad. Sin embargo, el grupo de las andesitas y dacitas (G1) contiene tanto rocas coherentes como fragmentarias. En él se incluyen las lavas andesíticas asignadas a la Formación Bajo Pobre por Panza *et al.* (2001) y Echeveste *et al.* (1999), las lavas dacíticas y la Ignimbrita Valenciana, ésta última mapeada como Formación Chon Aike por Panza *et al.* (2001) y Echeveste *et al.* (1999). No obstante, conforme al Léxico Estratigráfico de la Argentina del Jurásico (Riccardi y Damborenea 1993), esto no se ajusta a la definición de la Formación Bajo Pobre que no incluye dacitas ni ignimbritas. En otro orden, los resultados del análisis de

agrupamiento, efectuado con el conjunto de los elementos mayores, permite caracterizar geoquímicamente cada unidad volcánica por una composición particular. Las muestras de cada una se acomodan en un grupo más o menos homogéneo y diferente al de las otras. Esto indica una ventaja en el empleo de las unidades volcánicas como unidades de mapeo, ya que son consistentes con los datos geoquímicos. En cambio, el amplio espectro composicional de ellas y la imprecisión en la definición de las formaciones Bajo Pobre y Chon Aike, dificulta la asignación de las unidades volcánicas a una u otra formación.

Por otra parte, la información aportada por la conformación de los grupos en el análisis de agrupamiento indica una semejanza composicional entre las lavas dacíticas del centro efusivo Cerro Campana y la Ignimbrita Valenciana que revela una posible relación genética entre ambas unidades. Asimismo, la similitud composicional entre la Ignimbrita Flecha Negra con las lavas ácidas del centro efusivo Cerro Campana, indicaría una filiación magmática común para ambos tipos litológicos. Esto último conduce a pensar que los domos riolíticos del centro efusivo Cerro Campana pueden constituir los productos finales de la erupción que generó esa ignimbrita. La forma de media luna de la Ignimbrita Las Lajas, con desarrollo de sus máximos espesores en su sector cóncavo (borde oriental), sugiere también a la zona de los centros efusivos Bajo del Fénix y Cerro Campana como un gran centro volcánico. En el análisis de agrupa-

miento las andesitas y dacitas de los centros efusivos Bajo del Fénix y Cerro Campana constituyen un gran grupo (G1), que podría indicar que ambos formaban parte en un único centro eruptivo mayor.

## CONCLUSIONES

- Tanto el análisis de agrupamiento como el biplot muestran la existencia de dos grupos de rocas, uno formado principalmente por andesitas y dacitas y otro formado casi exclusivamente por riolitas.

- Si bien el grupo G2 (riolitas) reúne solo muestras que se podrían considerar formalmente como Chon Aike, el grupo G1 no se ajusta a ninguna de las unidades formacionales definidas para el volcanismo jurásico del macizo del Deseado.

- Los subgrupos de muestras con mayor afinidad definidos en el análisis de agrupamiento, están integrados mayoritariamente por muestras de la misma unidad volcánica definida en el mapeo de campo. Lo que induce a pensar que cada unidad volcánica posee características de campo y geoquímicas que permitirían caracterizarlas.

- La continuidad composicional evidenciada en los diagramas TAS y AFM, también se manifiesta en el gráfico de dos dimensiones (*biplo*) de muestras. En esta zona del macizo del Deseado no existe un intervalo (*gap*) composicional entre rocas andesíticas y riolíticas. Sin embargo, esto por sí solo no permite avanzar en el conocimiento acerca de los procesos de diferenciación que dieron origen a las distintas unidades volcánicas.

Se hace evidente que en mapeos de detalle de rocas volcánicas y volcanoclásticas jurásicas del macizo del Deseado no es posible la asignación formacional clásica de unidades volcánicas definidas por sus características de campo y composición química, ya que algunas de estas presentan características texturales afines a una formación y composición química afin a otra (por ejemplo la Ignimbrita Valenciana, texturalmente perteneciente a la Formación Chon Aike tiene afinidad geoquímica con la Formación Bajo Pobre).

Si bien las formaciones son unidades de gran utilidad para el mapeo geológico e implican concepciones fundamentales para el trabajo de campo, cuando se trata de releva-



mientos a escala de detalle, resulta más adecuado el mapeo de unidades litológicas (volcánicas) y/o litofaciales, ya que permiten una mejor reconstrucción de la evolución del volcanismo de una región.

Otro paso debe darse especialmente en el análisis de datos geoquímicos, en este caso sólo de los elementos mayores. Reconociendo que los diagramas de clasificación y petroecónicos constituyen una herramienta clásica y ampliamente aplicada, no debe soslayarse los análisis estadísticos. Fundado en la geometría composicional y en la premisa que los análisis estadísticos deben orientarse hacia el análisis de las diferencias relativas entre elementos, los resultados han colaborado a interpretar los procesos geológicos desarrollados en este sector del macizo del Deseado. El empleo del análisis de componentes principales composicional, el análisis de agrupamiento y los procedimientos inferenciales ha arrojado resultados de validez consistentes con las ideas prevalentes de la historia geológica de la región.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la lectura crítica de este trabajo al Dr. Eugenio Aragón y las valiosas sugerencias que permitieron mejorar el manuscrito.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aitchison, J. 1986. The statistical analysis of compositional data: Monographs on Statistics and applied Probability. Chapman & Hall Ltd., 416 p., London.
- Aitchison, J. 1999. Logratios and Laws in compositional data analysis. *Mathematical Geology* 31(5): 271-275.
- Aitchison, J. y Greenacre, M. 2002. Biplots of compositional data. *Applied Statistics* 51, Part 4: 375-392.
- Aitchison, J., Barceló-Vidal, C., Martín-Fernández, J. A. y Pawlowsky-Glahn, V. 2000. Logratio analysis and compositional distance. *Mathematical Geology* 32(3): 563-580.
- Chayes, F. 1960. On correlation between variables of constant sum. *Journal Geophysical Research* 65(12): 4185-4193.
- Chayes, F. 1962. Numerical correlation and petrographic variation. *Journal Geology* 70(4): 440-552.
- De Giusto, J. M., Di Persia, C. y Pezzi, E. 1980. Nesocratón del Deseado. En *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias 2: 1389-1430, Córdoba.
- De la Roche, H., Leterrier, J., Grande Claude, P. y Marchal, M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagrams and major elements analyses - its relationships and current nomenclature. *Chemical Geology* 29: 183-210.
- Echeveste, H., Fernández, R., Bellieni, G., Piccirillo, E. y Blesa, A. 1998. Características petrográficas y geoquímica del vulcanismo jurásico en el área La Josefina. Sector Central del macizo del Deseado, Santa Cruz. Argentina. 10º Congreso Latinoamericano de Geología y 6º Congreso Nacional de Geología Económica, Actas: 180.
- Echeveste, H., Fernández, R., Bellieni, G., Llambías, E., Tessone, M., Schalamuk, I., Piccirillo, E. y De Min, A. 1999. Ignimbritas tardías de alto grado en la formación Chon Aike. Macizo del Deseado, Santa Cruz. Argentina. 14º Congreso Geológico Argentino, Actas: 182-185.
- Echeveste, H., Fernández, R., Bellieni, G., Llambías, E., Tessone, M., Schalamuk, I., Piccirillo, E. y De Min, A. 2001. Relaciones entre las formaciones Bajo Pobre y Chon Aike (Jurásico medio a superior) en el área estancia El Fénix-Cerro Huemul, zona centro-occidental del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56(4): 548-558.
- Echeveste, H. 2005. Metalogénesis del distrito argento-aurífero Manantial Espejo, Macizo del Deseado. provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 864, (inédito), 251 p., La Plata.
- Féraud, G., Alric V., Fornari, M., Bertrand, H. y Haller M. 1999. 40Ar/39Ar dating of the Jurassic volcanic province of Patagonia: migrating magmatism related to Gondwana break-up and subduction. *Earth and Planetary Science Letters* 172: 83-96.
- Fernández, R., Echeveste, H. y Tessone, M. 2002. Informe geológico-geoquímico del volcanismo jurásico del sector central del Macizo del Deseado. Instituto de Recursos Minerales, (inédito), 45 p., La Plata.
- Fisher, R. y Schmincke, H. 1984. *Pyroclastic rocks*. Springer-Verlag, 472 p., Berlin.
- Grunsky, E. C. y Smee, B. W. 2003. Enhancements in the interpretation of geological geochemical data using multivariate methods and digital topography. *CIM Bulletin*, 96(1068): 39-43.
- Guido, D. 2002. Geología y metalogénesis del sector oriental del Macizo del Deseado, provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 789, (inédito), 226 p., La Plata.
- Irvine, T. y Baragar, W. 1971. A guide to the chemical classifications of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science* 8: 523-548.
- Le Maitre, R. W. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Blackwell, 193 p., Oxford.
- Lesta, P. y Ferello, R. 1972. Región Extraandina de Chubut y norte de Santa Cruz. En Leanza, A. F. (ed.) *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias: 601-653, Córdoba.
- Martín-Fernández, J. A. 2000. Medidas de diferencia y clasificación automática no paramétrica de datos composicionales. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya 233 p., Barcelona.
- Martín-Fernández, J. A., Barceló-Vidal, C. y Pawlowsky-Glahn, V. 1998. Measures of Difference for Compositional Data and Hierarchical Clustering Methods. En Buccianti, A., Nardi, G. y Potenza, R. (ed.) *Proceedings of the Fourth Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology (I) Part 2: 526-531*, Naples.
- Martín-Fernández, J.A., Pawlowsky-Glahn, V. y Barceló-Vidal, C. 2003. Clasificación no paramétrica de datos composicionales. 27º Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa: 445-470, Lleida.
- Martín-Fernández, J. A., Barceló-Vidal, C., Pawlowsky-Glahn, V., Kovács, L. O. y Kovács, G. P. 2005. Subcompositional Patterns in Cenozoic Volcanic Rocks of Hungary. *Mathematical Geology* 37(7): 729-752.
- Pankhurst, R. S. y Rapela, C. W. 1995. Production of Jurassic rhyolite by anatexis of the lower crust of Patagonia. *Earth and Planetary Science Letters* 134: 23-36.
- Pankhurst, R. J., Leat, P. T., Sruoga, P., Rapela, C. W., Márquez, M., Storey, B. C. y Riley, T. R. 1998. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: A silicic large igneous province. *Journal of Volcano-*

- logy and Geothermal Research 81: 113-136.
- Pankhurst, R. J., Riley, T. R., Fanning, C. M. y Kelley, S. P. 2000. Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the Break-up of Gondwana. *Journal of Petrology* 41(5): 605-625.
- Panza, J., Zubia, M., Genini, A. y Godeas, M. 1994a. Hoja Geológica 4969-II, Tres Cerros, escala 1:250.000, provincia de Santa Cruz. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 213: 1-103, Buenos Aires.
- Panza, J., Márquez, M., y Godeas, M. 1994b. Hoja Geológica 4966-I y II, Bahía Laura, escala 1:250.000, provincia de Santa Cruz. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Boletín 214: 1-83, Buenos Aires.
- Panza, J., Marín, G. y Zubia, M. 1998. Hoja Geológica 4969-I, Gobernador Gregores, escala 1:250.000, provincia de Santa Cruz. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 239: 1-104, Buenos Aires.
- Panza, J., Cobos, J. C. y Zubia, M. 2001. Hoja Geológica 4769-III, Destacamento La María, provincia de Santa Cruz. Servicio Geológico Minero Argentino, Boletín 296: 1-81, Buenos Aires.
- Pawlawsky-Glahn, V. y Buccianti, A. 2002. Visualization and modeling of sub-population of compositional data: statistical methods illustrated by means of geochemical data from fumarolic fluids. *International Journal of Earth Science (Geologische Rundschau)* 91: 357-368.
- Pawlawsky-Glahn, V. y Egozcue, J. J. 2001. Geometric approach to statistical analysis on the simplex. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 15: 384-398.
- Pawlawsky-Glahn, V. y Egozcue, J. J. 2002. BLU estimators and compositional data. *Mathematical Geology* 34: 259-274.
- Riccardi, A. C. y Damborenea, S. E. 1993. *Léxico Estratigráfico de la Argentina*, volumen IX, Jurásico. Asociación Geológica Argentina, Serie B, Didáctica y Complementaria 21: 1-470, Buenos Aires.
- Riley, T., Leat, P., Pankhurst, R. y Harris, C. 2001. Origin of large volume rhyolitic volcanism in Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting. *Journal of Petrology* 42(6): 1043-1065.
- Rollinson, H. R. 1992. Another look at the constant sum problem in geochemistry. *Mineralogical Magazine* 56: 469-475.
- Stipanovic, P. y Reig, A. 1955. Breve noticia sobre el hallazgo de anuros en el denominado "Complejo Porfírico de la Patagonia Extraandina", con consideraciones acerca de la composición geológica del mismo. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 10(4): 215-233.
- Stipanovic, P. y Reig, A. 1956. El "Complejo Porfírico de la Patagonia Extraandina" y su fauna de anuros. *Acta Geológica Lilloana* 1: 185-297.
- Thio, S. 2004. CoDaPack software package. Universidad de Girona, España. <http://ima.udg.es/~thio/#CompositionalData>
- von Eynatten, H., Pawlawsky-Glahn, V. y Egozcue, J. J. 2002. Understanding perturbation on the simplex: a simple method to better visualise and interpret compositional data in ternary diagrams. *Mathematical Geology* 34: 249-257.
- von Eynatten, H., Barceló-Vidal, C. y Pawlawsky-Glahn, V. 2003. Modelling compositional change: the example of chemical weathering of granitoid rocks. *Mathematical Geology* 35: 231-251.
- Ward, J. H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association* 58: 236-244.
- Winchester, J. A. y Floyd, P. A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20: 325-343.

Recibido: 6 de julio, 2006

Aceptado: 27 de octubre, 2006