

# Volcanismo calcoalcalino neopaleozoico en la Precordillera de La Rioja. Petrología y caracterización litoestratigráfica de la Formación Punta del Agua (Carbonífero Superior-Pérmico Inferior)

Marcela REMESAL<sup>1,2</sup>, Luis A. FAUQUÉ<sup>1,3</sup> y Carlos O. LIMARINO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Pabellón II, 1428 Ciudad Universitaria Buenos Aires.*

<sup>2</sup>*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*

<sup>3</sup>*Servicio Geológico Minero Argentino*

**RESUMEN.** La Formación Punta del Agua en el extremo noroccidental de la cuenca Paganzo, representa las primeras manifestaciones de actividad volcánica neopaleozoica en la Precordillera y en las Sierras Pampeanas. La variedad litológica de esta unidad comprende interestratificación de flujos lávicos, flujos piroclásticos y acumulaciones sedimentarias. Los flujos lávicos fueron divididos según su composición y textura; se incluyó en esta agrupación un filón capa de composición dacítica. Los flujos piroclásticos fueron subdivididos para su caracterización en depósitos gruesos de bloques y cenizas y reoignimbritas. Durante los períodos intereruptivos tuvo lugar la sedimentación de conglomerados volcánicos, arenitas líticas volcánicas y escasos niveles pelíticos; todas estas rocas conforman litosomas fuertemente lenticulares que reflejan la irregularidad morfológica del campo volcánico. Las características geoquímicas de las volcanitas fueron analizadas sobre la base de doce muestras provenientes de ambos flancos del sinclinal de Punta del Agua. Los valores obtenidos corresponden al espectro de rocas mesosilíceas y ácidas, desde andesitas basálticas hasta riolitas, aunque claramente dominan las composiciones andesíticas. El carácter calcoalcalino de estas rocas, y la abundancia relativa en K de las andesitas, sugieren líquidos padres originados en zonas de subducción con efectos de procesos de cristalización fraccionada y contaminación sobrepuestos. En lo que corresponde a la antigüedad de la unidad ha sido establecida a partir de sus relaciones estratigráficas y dataciones radimétricas; ambas líneas de investigación sugieren una edad carbonífera superior para el conjunto, aunque sin descartar que sus términos cuspidales alcancen el Pérmico más temprano.

**Palabras clave:** *Volcanismo orogénico, Neopaleozoico, Precordillera.*

**ABSTRACT:** *Late Palaeozoic calc-alkaline volcanism in the Precordillera of La Rioja: petrology and lithostratigraphical characterization of the Punta del Agua Formation (Late Carboniferous – Early Permian).* The Punta del Agua Formation (north-west Paganzo Basin) represents the earliest manifestation of Neopalaeozoic volcanism in the Precordillera and Sierras Pampeanas. The unit consists of interbedded lava flows, pyroclastic flows and clastic sedimentary deposits. The lava flows have been divided according to their composition and textural characteristics; a dacitic sill is also included. Pyroclastic flows consist of block- and ash-flow deposits and reoignimbrites. Between periods of volcanicity, conglomerates, lithic sandstones and scarce mudstones were deposited in lenticular bodies that reflect the irregular morphology of the volcanic area. Twelve samples of the volcanic rocks, obtained from both flanks of the Punta del Agua syncline were geochemically analysed. The variation in chemical composition ranges from basaltic andesites to rhyolites, but andesitic compositions dominate. The calc-alkaline character of these rocks and the abundance of K in the andesites, suggest that these magmas originated by subduction with crystal fractionation and contamination processes. The age of the Punta del Agua Formation was established on the basis of its stratigraphical relations and radiometric dating. Both suggest a Late Carboniferous age, although an Early Permian age for the uppermost part of the sequence cannot be disregarded.

**Key words:** *Orogenic volcanism, Late Paleozoic, Precordillera.*

## Introducción

Sobre el extremo septentrional de la Precordillera, en el área geológicamente conocida como sinclinal del Rincón Blanco en la provincia de La Rioja (Fig.1), aflora una potente secuencia de volcanitas identificada como Andesita de Punta del Agua por Aceñolaza (1971). Estas rocas son, por su composición, excepcionales para el Paleozoico su-

perior de la Precordillera y han sido sólo mencionadas en forma general, sin que se cuente hasta la fecha con perfiles, descripciones detalladas o estudios petrológicos que permitan caracterizarlas desde el punto de vista litoestratigráfico y vislumbrar su significado genético.

El primero en referirse a esta unidad fue Aceñolaza (1971), quien en oportunidad de realizar un levantamiento geológico de la región las identificó como «Andesita de

Punta del Agua», brindando además datos sobre su composición y desarrollo regional. Muy poco tiempo después Aceñolaza *et al.* (1971) ampliaron su estudio geológico hacia el noroeste, empleando el nombre de Andesita Cerro Chuscho para incluir a las potentes secuencias de volcanitas que se extendían desde la Punta del Agua hasta los cerros Chuscho y Las Casitas. Los citados autores consideraron a las volcanitas como comagmáticas y contemporáneas, ubicándolas de acuerdo a datos radimétricos en el Carbonífero Inferior. González y Bossi (1986) emplearon el toponímico originalmente propuesto por Aceñolaza (1971) y definieron la Formación Punta del Agua siguiendo los lineamientos expuestos por los autores arriba señalados.

Recientemente Fauqué y Villar (2003) han demostrado que las volcanitas originalmente agrupadas por autores previos dentro de las Andesitas Cerro Chuscho en realidad corresponden a dos conjuntos separados tanto temporal como genéticamente. De esta forma las rocas ígneas aflorantes en los cerros Chuscho y Las Casitas (Formación Chuscho en el sentido de Fauqué y Villar 2003) corresponden a un complejo máfico ordovícico formado como resultado de la acreción de Cuyania. Por otro lado las volcanitas de Punta del Agua (Formación Punta del Agua, en el sentido de Fauqué y Villar 2003) fueron derramadas durante el Carbonífero Superior y el Pérmico más temprano, conformando por lo tanto una unidad mucho más joven y genéticamente desvinculada con las rocas aflorantes en el cerro Chuscho.

El objeto de este trabajo es caracterizar litológicamente a la Formación Punta del Agua, mejorar su ubicación cronoestratigráfica, examinar las características del magmatismo y su significado genético. Es necesario destacar que esta unidad muestra una composición litológica mucho más compleja que la supuesta hasta el presente, pues en ella participan no sólo rocas volcánicas, sino también distintos tipos de rocas sedimentarias.

### Ubicación y marco geológico

Los afloramientos de la Formación Punta del Agua conforman una faja discontinua que con rumbo nornordeste se extiende desde el paraje de Punta del Agua hasta el cordón de la Escarcha y los cerros de Cumichango en su extremo septentrional (Fig. 2). Un segundo conjunto de afloramientos se encuentra en las proximidades del refugio del Peñón al este de la laguna Brava (Fig. 2). En este caso las exposiciones son mucho más pobres y las rocas presentan un marcado grado de alteración. De acuerdo a lo dicho, hasta el presente la Formación Punta del Agua restringe sus afloramientos a la Precordillera de La Rioja; sin embargo, es probable que correspondan también a esta unidad las exposiciones de volcanitas de la quebrada Larga en la sierra de La Punilla, Precordillera de San Juan, actualmente en estudio.

La conformación geológica de la región de Punta del Agua, también conocida como sinclinal del Peñón o Rincón Blanco en la literatura geológica, se muestra en la figura 1. La unidad más antigua corresponde a un complejo

de rocas clásticas, intensamente deformado y compuesto por sedimentitas devónicas de la Formación La Punilla y por la Formación Jagüe del Carbonífero inferior. Estas rocas son sucedidas por la Formación Punta del Agua. La relación entre esta unidad y el conjunto infrayacente es a menudo de naturaleza tectónica, aunque frente a la quebrada del Tuli (Fig. 1), dentro de pequeños cañadones, es posible observar como conglomerados y areniscas que conforman la base de la Formación Punta del Agua cubren en discordancia angular a las sedimentitas del Devónico superior-Carbonífero inferior.

Dentro del sinclinal del Rincón Blanco (Fig. 1) es posible observar el pasaje entre la Formación Punta del Agua y las sedimentitas de la suprayacente Formación Río del Peñón. El contacto entre ambas unidades, tal como fuera señalado por Scalabrini Ortiz (1973), es mediante una discordancia erosiva, la que muestra su mayor relieve sobre el flanco occidental del sinclinal. Finalmente, sedimentitas de edad triásica superior-jurásica inferior pertenecientes a la Formación Santo Domingo (Limarino *et al.* 1990, Caminos *et al.* 1995) cubren a las unidades previamente señaladas.

### Caracterización litológica de la Formación Punta del Agua

Se realizaron dos perfiles de detalle, ubicados sobre ambos flancos del sinclinal del Rincón Blanco, en el valle del río del Peñón y un tercero sobre la quebrada del Tuli (Fig. 1). Las secciones están integradas por volcanitas y sedimentitas que se pueden presentar intercaladas y con predominio de alguno de estos tipos litológicos. Los relevamientos realizados sugieren un predominio de depósitos sedimentarios y flujos lávicos en el flanco oriental del pliegue, mientras que el flanco occidental está dominado por depósitos piroclásticos con flujos lávicos subordinados y ubicados en la parte basal. Para una mejor descripción, la unidad ha sido dividida en tres facies principales: 1) flujos lávicos, 2) piroclastitas y 3) sedimentitas.

#### *Facies lávicas*

Se trata de rocas sumamente duras y compactas, de color gris oscuro o gris verdoso a veces rojizas, generalmente afíricas a ojo desnudo y con escasas evidencias de fluidalidad. De acuerdo a su composición y textura se las ha agrupado como: 1) andesitas porfíricas, 2) andesitas máficas y 3) andesitas. Dentro de estos grupos pueden encontrarse subvariedades. Como un grupo aparte, 4) se caracterizan las rocas que conforman el cuerpo subvolcánico.

La mayoría de las muestras analizadas son lavas afíricas a escasamente porfíricas según plagioclasa, anfíbol y clinopiroxeno, brechosas y/o autobrechadas y con porcentajes variables de vesículas. Los fenocristales y microfenocristales de clinopiroxeno y anfíbol se reconocen abundantemente en las andesitas máficas y en menor proporción en las otras variedades.

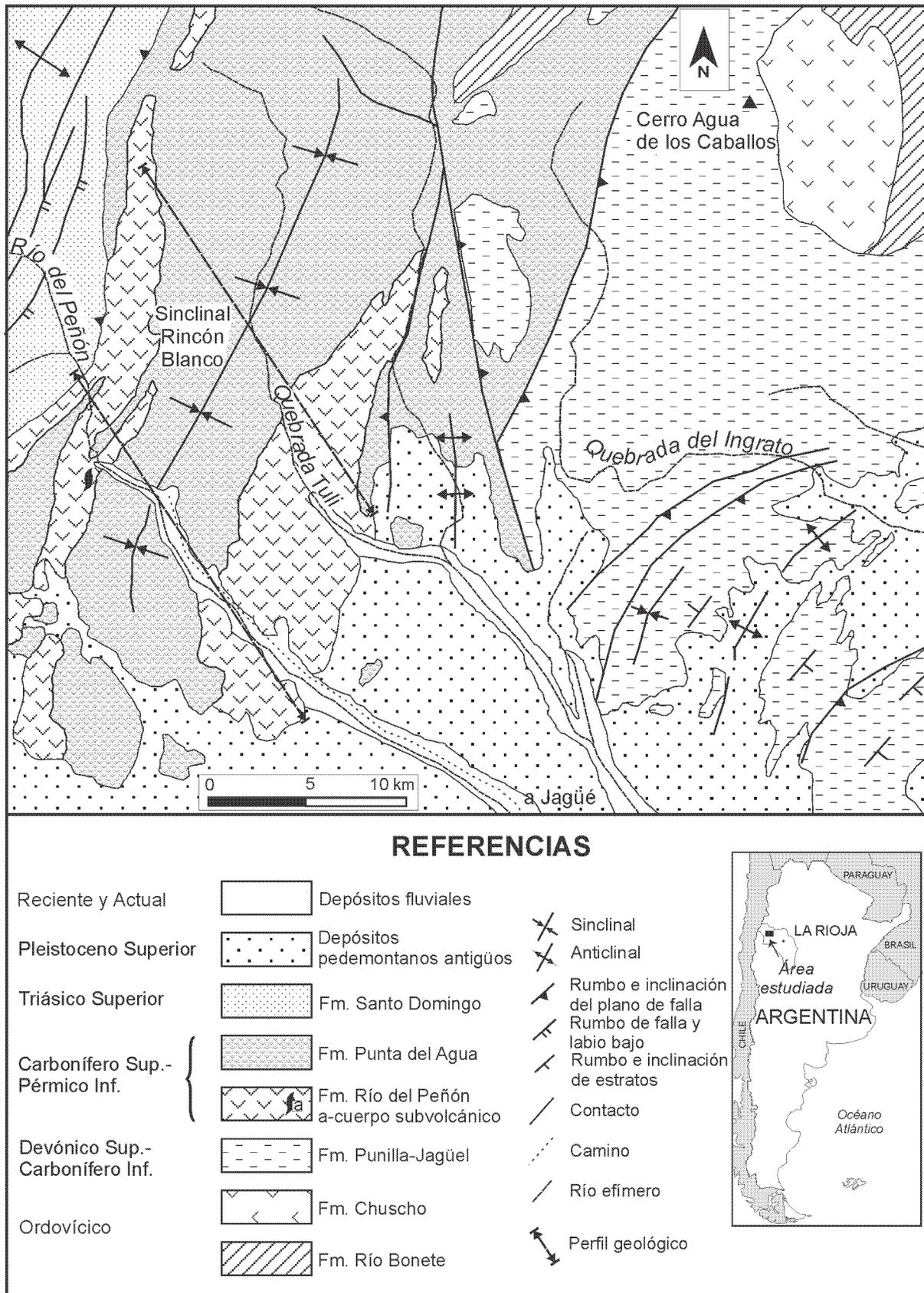
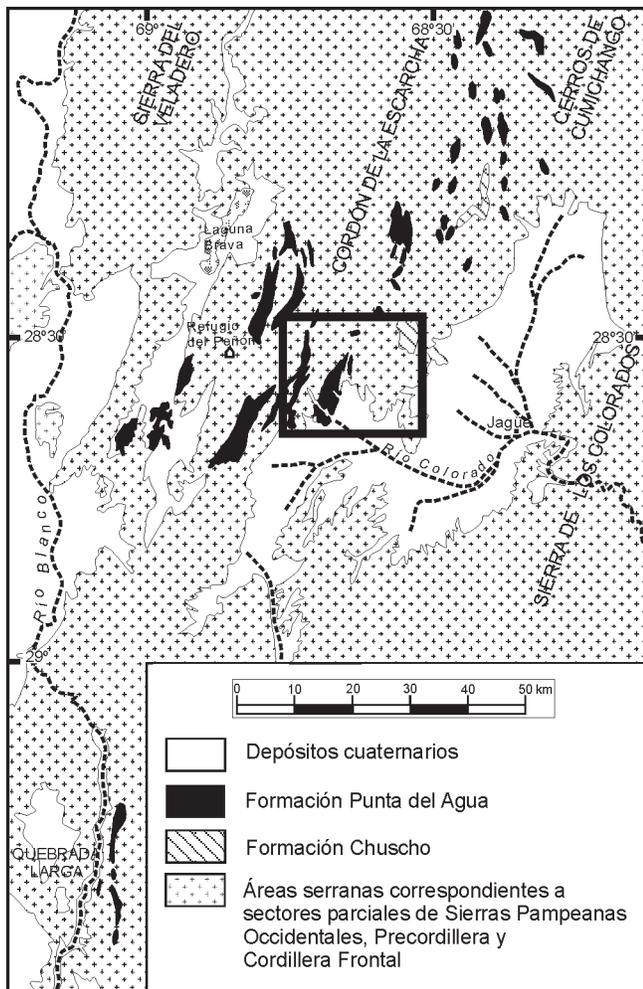


Figura 1: Mapa geológico de los alrededores del sinclinal de Rincón Blanco (modificado de Fauqué y Villar 2003).



**Figura 2:** Extensión regional de los afloramientos de la Formación Punta del Agua en la parte septentrional de la Precordillera.

*Andesitas porfíricas:* En muestra de mano son rocas rojizas, fuertemente porfíricas, a veces amigdaloides. Estas rocas se caracterizan por la presencia de fenocristales de hasta 5 mm de plagioclasa que gradan en una textura seriada hasta constituir una pasta intergranular o pilotáxica afieltrada fina. En algunas muestras la plagioclasa está acompañada por fenocristales de clinopiroxeno augítico, fuertemente zonales, en general en cristales de 1-2 milímetros. La mayoría de las muestras tienen evidencias de alteración. Los fenocristales de plagioclasa tienen sericita, arcilla y algunos parches de carbonato. También tienen profundos engolfamientos lo cual marca fuerte desequilibrio con el líquido. Cuando está presente la augita tiene frecuentes reemplazos completos por clorita y titanita con formas ahusadas en los núcleos de los microfenocristales. Los escasos cristales de anfíbol también tienen reemplazos importantes, casi siempre por carbonato y clorita; en las muestras con anfíbol, el clinopiroxeno es mucho menos abundante. El vidrio intersticial está oxidado, en particular en el entorno de las vesículas donde el intercambio de fluidos está favorecido. Como

accesorio en la pasta hay magnetita (?) y en algunas de las muestras predominan los grumos de titanita como producto de la alteración generalizada. Parte de las rocas analizadas se caracterizan por la presencia de grandes amígdalas, esféricas en su mayoría y localmente abundantes. Estas amígdalas son complejas y a veces estratificadas. El primer pulso de relleno parece corresponder a una mezcla de arcillas y carbonatos precipitados con texturas pseudoesferulíticas; posteriormente cristalizaron arcillas de color verde amarillento más brillante, en individuos aciculares; y por último sílice que hacia la parte central de la vacuola forma cristales grandes de cuarzo generalmente con numerosas inclusiones. En algunas amígdalas estratificadas el relleno de carbonato forma cristales grandes y limpios, mientras que la arcilla con textura esferulítica está separada.

Una variedad dentro de este grupo es el de las andesitas porfíricas brechadas, con las mismas características petrográficas pero con texturas “pseudobrechada” por la presencia de escoria de la misma lava soldada en el flujo durante su emplazamiento.

*Andesitas máficas:* Estas andesitas muestran mayormente texturas seriadas y los cristales de mayor tamaño alcanzan 1,5 milímetros. Se caracterizan por la abundancia de cristales de minerales máficos (>50%, que se refleja en la geoquímica con bajos valores de  $\text{SiO}_2$  y altos valores de  $\text{MgO}$ , cuadro 1), representados por anfíboles y clinopiroxenos. Las plagioclasas, que siguen en orden de abundancia son mayormente zonales, presentan grados de alteración variables que van desde leve caolinitización hasta obliteración completa con reemplazos por arcillas y grumos de titanita y epidoto. El anfíbol está fuertemente afectado en todas las rocas de este grupo, presenta reemplazos por cloritas, sílice y opacos. El clinopiroxeno en cambio, es una augita maclada sin evidencias de alteración importante a lo sumo con algo de corrosión en los bordes. En la pasta suelen aparecer algunos parches de cloritas y grumos de opacos. Localmente estas rocas muestran texturas de autobrechamiento.

*Andesitas:* Este grupo fue descrito según sus variaciones de fluidalidad, brechamiento y presencia de cristales. Las andesitas fluidales son rocas de grano fino y de colores grisáceos; y están compuestas por microlitos de plagioclasa argilizada y sericitizada, y máficos (olivina oxidada) subordinados en tamaño y cantidad, y en general restringidos a zonas de cizalla por flujo. Como mesostasis en la apretada trama de feldspatos aparecen parches de cuarzo, cloritas y arcillas, probablemente como resultado del reemplazo de vidrio. Dentro de este grupo las andesitas fluidales fuertemente brechadas están compuestas por autoclastos de andesitas fluidales. En general estas rocas tienen una intensa oxidación con diseminación de minerales opacos. Las andesitas fluidales con anfíbol se caracterizan por la ocurrencia de microfenocristales de anfíbol (excepcionalmente alcanzan 1mm), acompañados por plagioclasa y un pequeño porcentaje de clinopiroxenos. La plagioclasa es subhedral y está

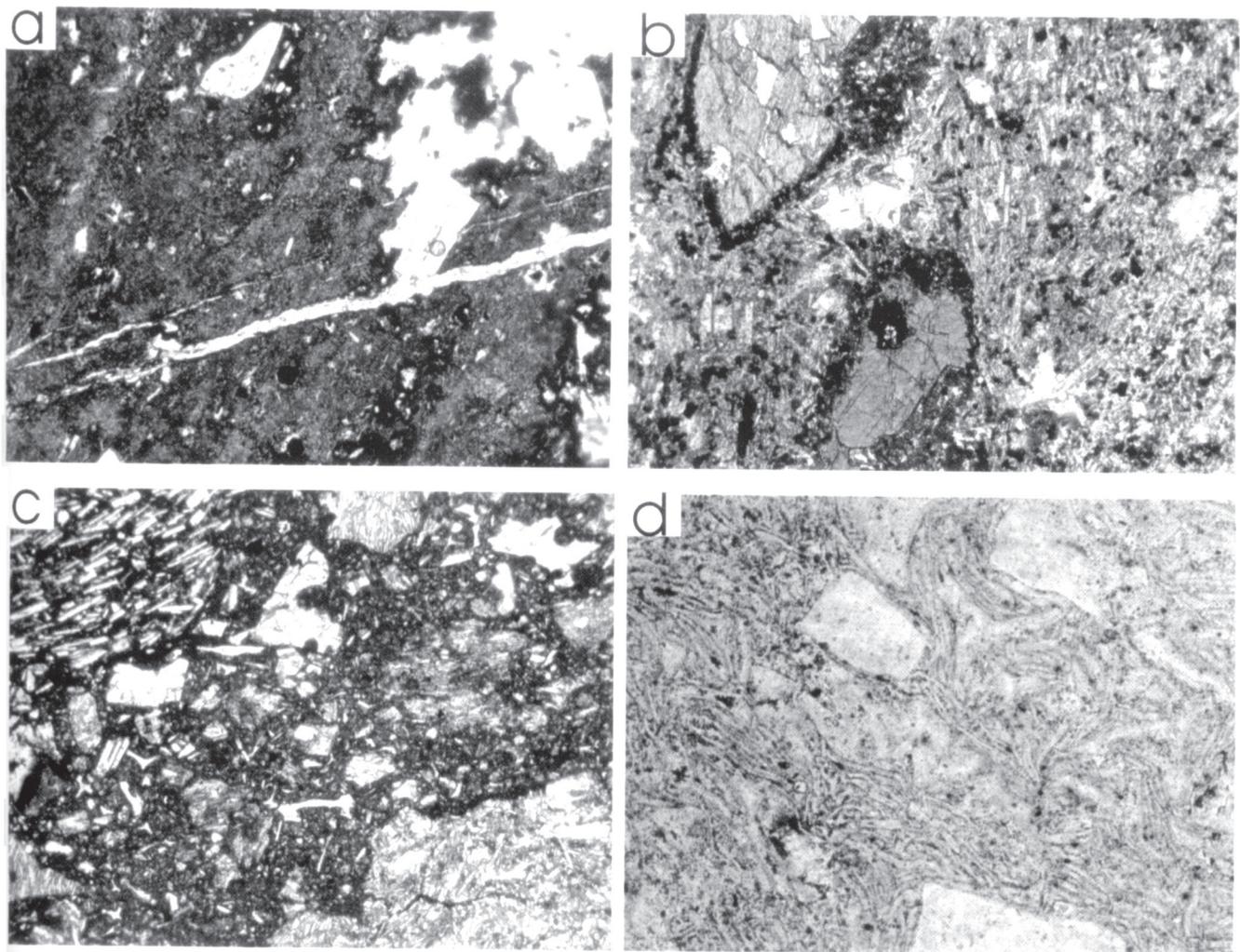
**Cuadro 1:** Composición química de las rocas de la secuencia de Punta del Agua analizadas según sus elementos mayores, menores y trazas, incluyendo las tierras raras\*.

	jg38	jg51	jg72	jg76	jg86	jg92	jg83	jg48	pa114	pa117	pa110	jg51b
SiO <sub>2</sub>	55,90	53,30	72,70	58,60	54,00	65,60	52,55	54,07	59,54	59,41	57,01	53,00
TiO <sub>2</sub>	1,03	0,87	0,16	0,67	1,07	0,29	2,20	1,18	1,15	1,01	1,34	0,89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,00	15,90	13,00	16,60	14,80	13,60	18,73	16,25	16,48	17,59	14,85	15,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,17	8,01	1,99	7,03	6,62	2,79	7,30	7,92	6,60	6,32	8,34	8,17
MnO	0,12	0,11	0,02	0,13	0,09	0,08	0,12	0,12	0,12	0,10	0,10	0,11
MgO	3,38	4,02	0,13	1,18	3,22	0,27	4,14	5,63	2,92	2,70	4,13	4,05
CaO	6,00	6,46	0,46	4,39	5,31	3,94	5,55	6,53	4,13	2,17	5,80	6,58
Na <sub>2</sub> O	3,53	3,03	4,02	4,99	3,55	3,19	4,77	2,98	3,88	5,97	3,91	2,99
K <sub>2</sub> O	2,33	1,63	4,23	0,98	0,78	2,09	2,06	1,94	2,92	1,50	2,03	1,59
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,24	0,17	0,03	0,48	0,22	0,12	0,31	0,18	0,24	0,38	0,21	0,17
LOI	2,60	4,20	1,10	3,90	6,40	5,10	2,66	2,93	2,03	3,02	2,30	4,00
Cr	69	269	205	20	121	53	27	260	47	nd	119	263
Ni	24	72	nd	nd	37	nd	82	98	52	30	61	76
Co	17	33	1	11	24	5	25	26	19	12	24	31
Rb	71	42	169	25	31	98	53	66	93	47	61	44
Cs	2,20	2,30	2,20	1,30	4,40	3,90	2,17	1,36	1,96	0,57	1,90	2,10
Ba	723	640	614	250	535	282	740	469	588	229	817	647
Sr	594	804	84	575	495	124	894	565	530	928	928	842
Tl	0,35	0,20	0,37	0,14	0,14	0,47	0,50	0,23	0,64	0,23	0,30	0,21
Ga	22	21	16	24	19	17	23	21	23	21	19	23
Ta	1,03	0,46	1,34	1,12	0,66	1,02	0,80	0,53	0,75	1,20	0,50	0,43
Nb	10,8	7,70	18,8	19,4	11,8	11,5	11,1	7,2	9,6	15,5	7,0	7,6
Hf	5,60	3,90	7,40	7,40	4,30	3,60	3,64	3,45	4,40	5,10	3,20	4,20
Zr	208	138	229	302	162	122	127	131	165	206	111	126
Y	29	23	33	30	19	16	22	22	21	22	23	23
Th	8,63	5,55	19,80	5,98	4,54	7,49	3,19	5,54	5,10	5,20	5,30	5,83
U	2,34	1,26	4,30	1,71	1,31	3,72	1,15	1,35	1,26	1,44	1,10	1,19
La	32,90	20,20	43,10	32,90	22,50	17,70	23,37	22,97	24,76	27,77	25,20	20,30
Ce	72,10	45,30	93,50	69,90	47,50	34,00	49,86	46,07	47,66	53,13	52,60	45,20
Pr	8,46	5,41	11,00	7,85	5,47	3,66	6,16	5,49	5,50	6,06	6,40	5,38
Nd	37,00	24,40	46,70	34,70	24,80	15,00	25,82	21,97	21,99	23,62	25,90	24,60
Sm	7,31	5,02	9,06	6,89	4,91	2,99	5,54	4,68	4,56	4,74	5,40	5,18
Eu	1,83	1,39	1,03	1,91	1,37	0,82	1,76	1,35	1,47	1,45	1,56	2,51
Gd	6,81	5,00	7,90	6,64	4,72	2,87	4,76	4,11	4,06	4,08	4,40	5,13
Tb	0,82	0,64	0,94	0,82	0,55	0,37	0,76	0,68	0,69	0,68	0,70	0,65
Dy	5,15	4,29	6,50	5,65	3,78	2,68	4,35	3,94	3,94	3,87	4,30	4,47
Ho	0,95	0,79	1,20	1,00	0,67	0,49	0,83	0,80	0,77	0,77	0,80	0,80
Er	2,97	2,46	4,02	3,32	2,11	1,69	2,14	2,17	2,09	2,03	2,20	2,51
Tm	0,37	0,32	0,56	0,44	0,26	0,24	0,31	0,34	0,31	0,31	0,33	0,32
Yb	2,60	2,21	3,95	3,27	1,82	1,78	1,83	2,07	1,93	1,84	2,10	2,32
Lu	0,53	0,33	0,57	0,52	0,28	0,29	0,26	0,31	0,28	0,27	0,30	0,33

\*Los datos analíticos fueron obtenidos por los laboratorios de Actlabs en Canada.

argilizada. El anfíbol es hornblenda castaña con reborde de minerales opacos y de titanita grumosa. El clinopiroxeno, augita, aparece en muy escasos microfeno-cristales. En la pasta la arcilla está generalizada y pueden aparecer parches con cristales bien desarrollados, hay grumos de titanita, minerales opacos y cuarzo intersticial. A pesar de esta neomineralogía los rasgos originales no están obliterados y los microfeno-cristales (<10%), en par-

ticular los máficos aparecen bien conservados (Fig. 3b). Las andesitas vítreas son lavas escasamente micro-porfíricas con plagioclasa y anfíbol y pastas muy finas a vítreas. Presentan una microtextura pseudobrechosa, definida por inhomogeneidades discretas con variación en la concentración de vesículas y óxidos, y en el tamaño relativo de los microlitos. Éstas parecen originarse en diferencia relativas en la concentración de volátiles durante el



**Figura 3:** **a)** Fotografía de una andesita vítrea. Flujo lávico con microfenocristales de plagioclasa. La pasta tiene una importante impregnación con óxidos de hierro. Se pueden observar microfracturas frecuentemente rellenas con carbonato. Nicoles paralelos x 400. **b)** Fotografía de una andesita con anfíbol. Microfenocristales de hornblenda y augita en una pasta de grano fino compuesta esencialmente por plagioclasa, con evidencias de alteración. Nicoles cruzados x 400. **c)** Fotografía de un flujo piroclástico de bloques y cenizas. Abundantes líticos de andesitas inmersos en matriz vitroclástica con textura de desvitrificación. Nicoles paralelos x 400. **d)** Fotografía de reoignimbrita. Roca de textura vitroclástica con trizas soldadas, deformadas por flujo y fenocristales de feldespato potásico y plagioclasa. Nicoles paralelos x 400.

flujo y/o por salpicaduras de escoria en el mismo derrame. Los cristales de anfíbol aparecen reemplazados por completo con una asociación de cloritas y arcillas. La plagioclasa tiene menos alteración; se destacan en los tamaños microlito las formas dendríticas. Hay una impregnación en óxidos generalizada y abundantes grumos de titanita anhedral. Se identificaron agregados de sílice que fueron interpretados como precipitados de alta temperatura, por entrapamiento de volátiles. Se caracterizan por presentar fracturas y microfracturas rellenas con carbonato (Fig. 3a). En general, este sistema de fracturación responde a diseños anastomosados y se observan deslizamientos friccionales visibles a escala microscópica, evidenciados por fragmentos irregulares de la roca incluidos en el relleno de la fractura. El movimiento de cizalla se pone de manifiesto incluso por el desplazamiento y/o truncamiento de cristales. Las condiciones pasivas en las

que se produjo el precipitado carbonático dentro de la fractura dieron lugar a un buen desarrollo cristalino.

*Cuerpos subvolcánicos:* Éstos forman un filón capa de aproximadamente 25 metros de potencia en el sector sudeste del sinclinal del Rincón Blanco. Está intruido en la Formación Río del Peñón de la cual se destaca por su coloración rosada oscura y disyunción columnar (columnas del orden de 60 cm de diámetro). En el contacto la roca de caja presenta evidencias de calentamiento e incorporación de fluidos. Es una roca de composición dacítica, de textura porfírica (en muestra de mano de mano se destacan fenocristales de feldespato y cuarzo de 4-5 mm) con importante grado de caolinitización y cloritización. Sus principales minerales son plagioclasas y máficos. Las plagioclasas son subhedrales a anhedrales y constituyen desde fenocristales (5 mm) hasta microlitos. El cuarzo es

anhedral y poco abundante, restringido a los tamaños intermedios, pero alcanza tamaño similar al de los feldespatos. Los minerales máficos, cristales de anfíbol con formas típicas que llegan tener tamaños de aproximadamente 1 mm, aparecen totalmente reemplazados por cloritas y carbonatos. Esta mineralogía de alteración se generaliza en casi toda la roca, reconociéndose biotita de cristalización tardía. Hay apatita como mineral accesorio. Hacia el sector de borde disminuye la proporción de minerales máficos y son frecuentes los parches de textura gráfica (con distintos grados de definición) que indican condiciones de enfriamiento rápido, con pérdida de volátiles, y cristalización eutéctica de cuarzo y feldespato.

### *Facies piroclásticas*

Las piroclásticas se presentan en proporción subordinada a los flujos lávicos. Son rocas densas y tenaces, de colores oscuros, que incluyen dos tipos principales: 1) depósitos de flujos de bloques y cenizas y 2) depósitos de flujos piroclásticos (ignimbritas y reoignimbritas).

*Depósitos de flujos bloques y cenizas:* Son rocas de colores grises con tonos oscuros a veces verdosos, textura matriz sostenida, con litoclastos que pueden alcanzar el tamaño bloque. En superficie de alteración pueden tener tonos rosados. En algunos afloramientos son visibles lineamientos por flujo. Los litoclastos corresponden a rocas andesíticas fluidales, con algunas variaciones en el tamaño de grano, en general con baja proporción de máficos. Es característica en estos litoclastos la presencia de rasgos de emplazamiento a alta temperatura, típicos bordes engolfados y menos frecuentemente rebordes de óxidos. Se han reconocido líticos de composición basáltica, mucho menos abundantes (< 3%) y restringidos a fragmentos de pequeño tamaño con texturas parcialmente ofíticas entre plagioclasa y clinopiroxeno. La matriz de la roca está compuesta por vitroclastos (trizas, trizas pumíceas y pulvículas), pocos cristaloclastos de cuarzo y plagioclasa y pequeños litoclastos de andesitas. En los vitroclastos se observan texturas de desvitrificación axiolíticas desdibujados por alteración y reemplazos por cloritas y arcillas. Los grados de alteración son variables, algunas rocas llegan a tener reemplazos en la matriz principalmente en función de material arcilloso y carbonato (Fig. 3c).

*Depósitos de flujos piroclásticos soldados (reoignimbritas):* En el afloramiento estas rocas de color morado oscuro son masivas, de aspecto vítreo y con texturas porfíricas (fenocristales de 3 a 8 mm en promedio). Se destacan sus texturas porfírica y vitroclástica, con evidencias de flujo y composición riolítica a riodacítica. Los fenocristales, en general subhedrales, son de feldespato potásico (20%) con alteración arcillosa y plagioclasa, en cristales pequeños, parcialmente argilizados y/o reemplazados por carbonato. El feldespato potásico es apenas perítico, con macla de Carlsbad y la plagioclasa es de composición oligoclasa-andesina ( $An_{28-36}$ ). Subordinados en cantidad y tamaño aparecen cristales subhedrales y

anhedrales de cuarzo. Grumos de carbonatos y minerales opacos podrían corresponder a minerales máficos reabsorbidos. La matriz está compuesta por trizas y en menor proporción trizas pumíceas, que localmente podrían definirse como pequeños fragmentos pumíceos, con rasgos de soldamiento intenso y con desvitrificación axiolítica y parches granofíricos, microgranosos y/o pseudoesferulíticos. La desvitrificación en cuarzo engloba trizas. En algunas muestras los minerales opacos remarcen los contornos de las trizas. Como minerales accesorios se reconocieron cristales de circón y apatita (Fig. 3d).

### *Facies de sedimentitas*

Las sedimentitas se encuentran compuestas por areniscas desde gruesas a finas, conglomerados, brechas y muy escasas pelitas. El conjunto conforma un potente intervalo en la base de la formación, tal cual puede observarse en los alrededores de la quebrada del Tuli (Figs. 1 y 2), disminuyendo claramente su participación hacia la parte media y superior de la unidad. La Formación Punta del Agua en la quebrada del Tuli, muestra una sección basal (80 m de potencia) en la que predominan las areniscas gris blanquecinas y los ortoconglomerados polimícticos. Entre estas rocas se intercalan un escaso número de flujos lávicos de hasta 2 m de espesor. Este intervalo, con claro predominio de sedimentitas, se adelgaza rápidamente hacia el sur, hasta prácticamente desaparecer a la altura del camino que une el paraje de Río del Peñón con Jagüe, siendo las sedimentitas reemplazadas por flujos lávicos.

Las areniscas son sin duda las rocas sedimentarias más importantes. Se estratifican en bancos lenticulares, con frecuentes bases erosivas y estructuras entrecruzadas, tanto tabulares como en artesa de escala mediana y grande. Desde el punto de vista petrográfico resultan arenitas líticas y feldarenitas líticas volcánicas (Folk *et al.* 1970). En las primeras dominan los fragmentos de volcanitas mesosilíceas y ácidas en ocasiones muy deformados y transformados en pseudomatrix; la proporción de cuarzo es baja y la plagioclasa es más abundante que el feldespato potásico (Net 1999). Aunque en proporción muy minoritaria, aparecen fragmentos de metamorfitas esquistosas y aplitas. Las feldarenitas líticas muestran características análogas y se distinguen de las primeras por la mayor proporción de plagioclasa euhedral, zonada y en algunos casos mostrando cristales negativos (Scholle 1979).

Las psefitas se presentan en tres variedades principales: 1) ortoconglomerados clasto soportados, 2) ortoconglomerados matriz soportados y 3) paraconglomerados y brechas matriz soportados. Los primeros son los más abundantes, muestran una matriz arenosa mediana a gruesa y clastos redondeados a subredondeados de hasta 10 cm de diámetro, en los que predominan los fragmentos de andesitas, y son también comunes los de sedimentitas de grano fino, granitos y metamorfitas esquistosas. Las psefitas descriptas se estratifican en bancos lenticulares de hasta 1,5 m de espesor y si bien un gran número de

capas resultan macizas es relativamente frecuente la gradación directa y la presencia de estructuras entrecruzadas. Los ortoconglomerados matriz soportados presentan características semejantes, aunque muestran un marcado aumento en la proporción de matriz, gradando en ocasiones a areniscas guijarrosas y el desarrollo esporádico de gradación inversa en la base de algunos bancos.

Los paraconglomerados y brechas son mucho menos frecuentes; la matriz es limo-arcillosa sumamente compacta y los clastos son mayoritariamente de volcanitas mesosilíceas, a menudo subangulosos y de hasta 12 cm de diámetro. Los bancos son generalmente lenticulares hasta irregulares y por lo general no superan los 50 cm de espesor.

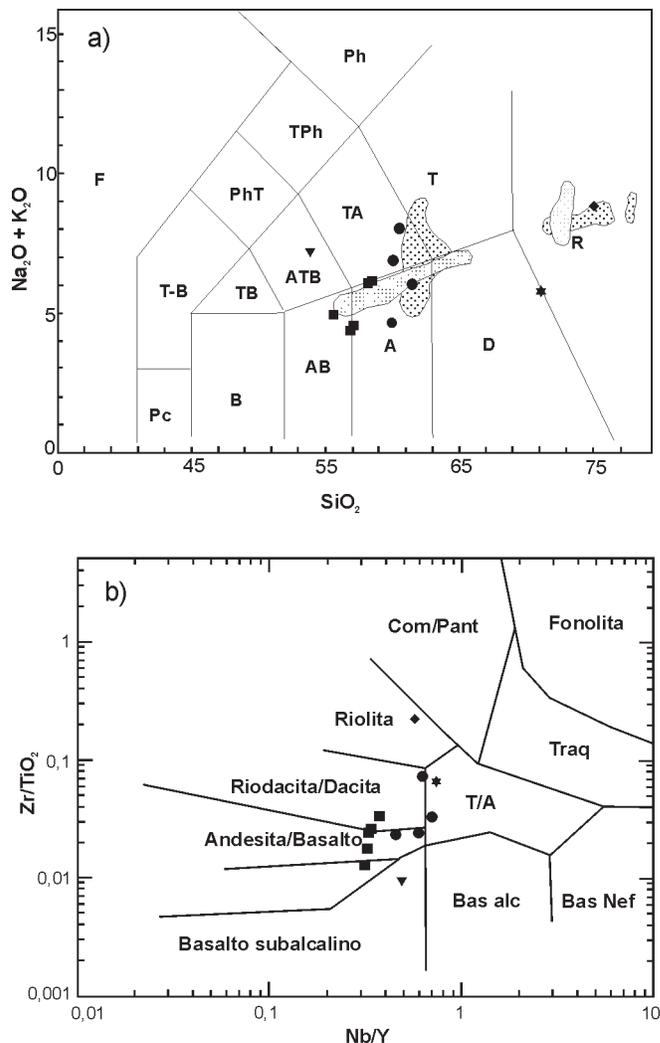
Finalmente, los niveles de pelitas aparecen sólo en forma excepcional, por lo general en el tope de algunas secuencias arenosas y en ocasiones muestran el efecto térmico de los flujos lávicos. Se trata de pelitas macizas, raramente laminadas, estratificadas en bancos de unos pocos centímetros de espesor, a veces con grietas de desecación en el techo. Una secuencia de características diferentes aflora en la quebrada del Tuli con 25 m de espesor y aspecto varvado, en la que alternan limolitas y arcilitas finamente estratificadas. Estas rocas conforman un horizonte fuertemente lenticular que desaparece unas pocas centenas de metros al sur y norte de la quebrada arriba mencionada.

### Geoquímica de las volcanitas de Punta del Agua

Con el propósito de establecer las características geoquímicas de las volcanitas y su sacar significado genético, se analizaron doce muestras representativas de la unidad en su perfil tipo sobre ambos flancos del sinclinal de Punta del Agua. Los contenidos de elementos mayores, menores y trazas, listados en el cuadro 1, fueron realizados por XRF (fluorescencia de rayos X) e ICP-MS (*inductively coupled plasma*-espectrometría de masas) en los Laboratorios Actlabs de Canadá.

**Variación de elementos mayores:** El conjunto de datos disponible revela composiciones predominantemente andesíticas, aunque el espectro se extiende desde andesitas basálticas, traquiandesitas basálticas, andesitas, traquiandesitas, hasta dacitas y riolitas (Fig. 4a, Le Maître *et al.* 1989). Las composiciones más ácidas, corresponden a ignimbritas. Las muestras del filón capa clasifican como dacitas en coincidencia con las descripciones petrográficas. En el mismo gráfico, la comparación con los campos definidos para rocas plutónicas de similar edad de la vecina cordillera de Colangüil (Llambías y Sato 1995) y volcanitas del Grupo Choiyoi (Sato y Llambías 1993) permite observar que las rocas de la Formación Punta del Agua abarcan un rango composicional semejante y de clara tendencia subcalalina.

La distribución en el diagrama AFM es típica de secuencias calcoalcalinas, con evolución hacia los álcalis conju-



**Figura 4:** a) Clasificación química según Le Maître *et al.* (1989) que muestra la distribución de las lavas y piroclásticas de la Formación Punta del Agua, comparada con los campos de distribución que representan las secuencias neopaleozoicas de la Precordillera. En gris oscuro el campo de las plutonitas del Batolito de Colangüil y en gris claro las volcanitas del Grupo Choiyoi. b) El gráfico de clasificación  $Zr/TiO_2$  vs.  $Nb/Y$ , propuesto por Winchester y Floyd (1977) permite corroborar la nomenclatura propuesta según los elementos mayoritarios.

gado con falta de enriquecimiento en hierro; la tendencia, para la línea de descenso del líquido es semejante a la descrita por Sato y Llambías (1993) para las volcanitas del Grupo Choiyoi.

Las volcanitas de Punta del Agua tienen contenidos en  $SiO_2$  dentro del rango 52,5-72,7%. Con el incremento de la  $SiO_2$  decrecen los contenidos de  $CaO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  y  $MgO$  (Fig. 5); éstos muestran arreglos con pendientes negativas. El empobrecimiento que manifiestan estos óxidos podría corresponderse con el fraccionamiento de un conjunto mineral integrado mayoritariamente por piroxenos + plagioclasas  $\pm$  anfíbol. La muestra del filón capa presenta valores altos de  $CaO$  y bajos de  $K_2O$  y  $Na_2O$  que pueden ser evidencia de los efectos de la alteración en la roca. La

mayoría de los óxidos tienen correlaciones aceptables; aunque una dispersión importante se observa en la distribución de  $K_2O$ . Las andesitas tienen contenidos de  $Al_2O_5$  entre 16 y 18%, y la relación  $Al_2O_5/CaO$  se incrementa en estas rocas junto con el aumento de  $SiO_2$ , reflejando el importante decrecimiento en  $CaO$ . En algunas de estas rocas pueden identificarse concentraciones de  $MnO$  más altos que el promedio, y también máximos en los contenidos de  $P_2O_5$  y  $Na_2O$ .

La escasa información disponible sobre las composiciones más diferenciadas ( $MgO < 1\%$ ) y la pobre correlación que presentan en el conjunto no permiten establecer una secuencia de evolución segura.

**Variación de elementos menores y trazas:** Las relaciones  $Zr/TiO_2$  vs  $Nb/Y$  (Fig. 4b; Winchester y Floyd 1977) confirman la clasificación desde andesitas basálticas hasta riolitas; aún cuando algunas muestras superan la relación límite  $Nb/Y$  del campo subalcalino, esta distribución tiene buena correspondencia con la petrografía.

El cambio rápido, especialmente notable en los términos andesíticos, de los valores de elementos compatibles (Ni, Co, V) respecto de incompatibles (Nb, Hf, Zr, La) en diagramas doble logarítmicos, se correlaciona con las tendencias esperadas en procesos de fraccionamiento (Gill 1981), y parece confirmar la presencia de fases máficas en el conjunto de fraccionamiento.

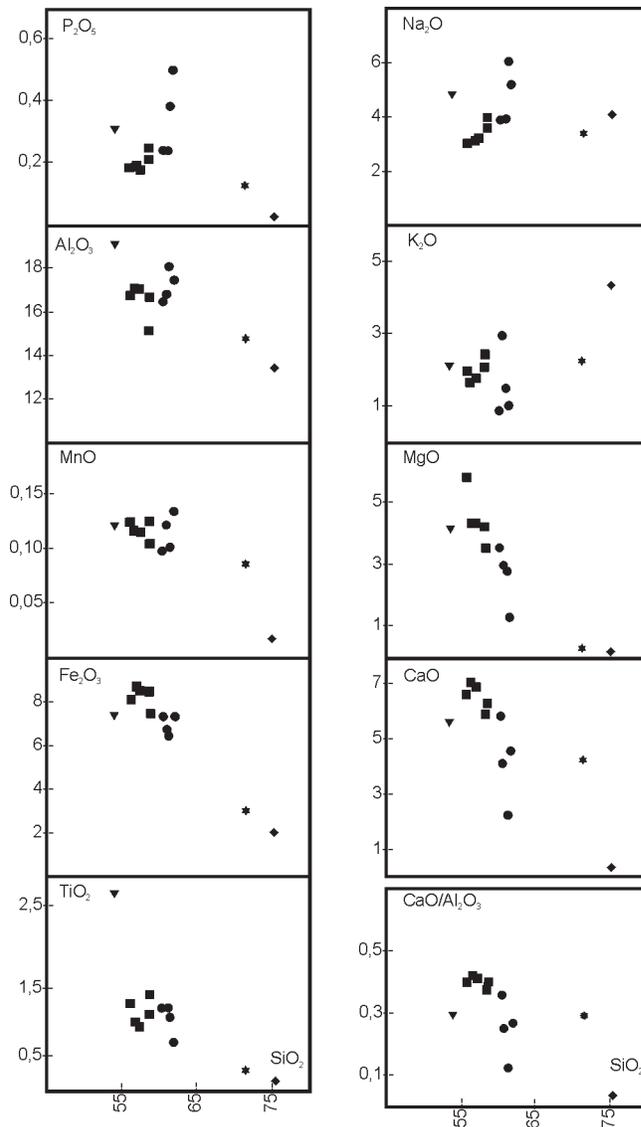
Las andesitas de Punta del Agua, registran incrementos en las relaciones  $Zr/Sm$  con la disminución de la relación  $Sm/Yb$ . Estas correlaciones fueron atribuidas por López Escobar *et al.* (1992; 1995) y Thirlwall *et al.* (1994) como indicadoras de la separación de anfíbol. Así, parece probable que la separación de hornblenda haya resultado un factor importante en la evolución del grupo de volcanitas de la Formación Punta del Agua.

Se han graficado los valores de elementos menores y traza normalizados con el MORB para cada uno de los tipos litológicos. Los patrones en el gráfico de las figuras 6a-d corresponden a andesitas básicas, traquiandesitas básicas, andesitas, dacitas y riolitas.

El enriquecimiento en elementos LIL es comparable con un patrón de andesitas de alto K. Estas altas concentraciones (Figs. 6a-d), junto con el empobrecimiento en Nb, definen patrones multielementos característicos en rocas de arcos volcánicos.

Sin embargo, la relación del Nb respecto de Zr y Hf y de estos respecto de Y e Yb permiten establecer una contribución mantélica (Pearce 1983) en los miembros más básicos de la serie pero que pierde definición con el aumento de la  $SiO_2$  (Figs. 6a-d). La dacita del filón capa (Figs. 6a-d) muestra una tendencia paralela a la de la riolita, destacándose las anomalías negativas en Ba, Nb, Sr y Ti.

Las proporciones  $La/Th$  (Fig. 7) son altas y compatibles con los valores de series de alto K ( $2 < La/Th < 7$ ), típicas de un emplazamiento en ambiente orogénico (Gill 1981). Este rasgo aparece corroborado con las relaciones de tierras raras (TR), en el rango de 5,5-9,3 para  $(La/Lu)_N$  y  $(La/Yb)_N$  entre 5,8 y 10 que definen un enriquecimiento en tierras raras livianas (TRL) respecto a las tierras raras pesa-



**Figura 5:** Distribución de los datos correspondientes a elementos mayoritarios versus la sílice y variación de la relación  $CaO/Al_2O_5$ . Los grupos de muestras son identificados con rastros, igual que en la figura 4.

das (TRP). Las riolitas en particular presentan altos valores de tierras raras livianas pero relativamente bajas relaciones ( $La/Yb$ ).

Los grupos de riolitas, andesitas y andesitas básicas tienen patrones de tierras raras subparalelos, incrementándose los contenidos relativos con el aumento de la sílice y destacándose la presencia de anomalías negativas de Eu en las riolitas. La dacita del filón capa tiene un patrón relativamente más pobre en tierras raras y con una baja relación  $TRL/TRP$ , no desarrolla anomalía de Eu y también tiene baja relación  $TRM/TRP$ .

Las relaciones  $(La/Ce)_N$ , en general son altas ( $> 1,1$ ) y aumentan con los tenores de  $SiO_2$  en el rango mesosilícico; disminuyen para la riolitas y se dispersan en relación al  $K_2O$ .

Como una primera aproximación a las posibles modifica-

ciones de estos líquidos durante su ascenso y almacenamiento en la corteza continental, se evaluaron las relaciones Rb/Y vs. Nb/Y (Fig. 8). Es evidente una tendencia hacia altas relaciones Rb/Nb con el aumento de la  $\text{SiO}_2$ , lo cual es consistente con un posible aporte de la corteza continental, que se manifiesta también con el empobrecimiento en la relación K/Rb respecto de Rb (Droux y Delaloye 1996). Las relaciones Rb/Nb y K/Rb más extremas se registran para el filón capa.

Thirlwall *et al.* (1994) interpretan que la relación Nb/La es poco afectada por procesos de fraccionamiento, pero que puede ser modificada por procesos de cristalización fraccionada y asimilación. En las rocas estudiadas, las relaciones Nb/La aumentan de las andesitas básicas (con relaciones Nb/La  $\approx 0,25$ ), hacia las andesitas, dacitas y riolitas (Fig. 9).

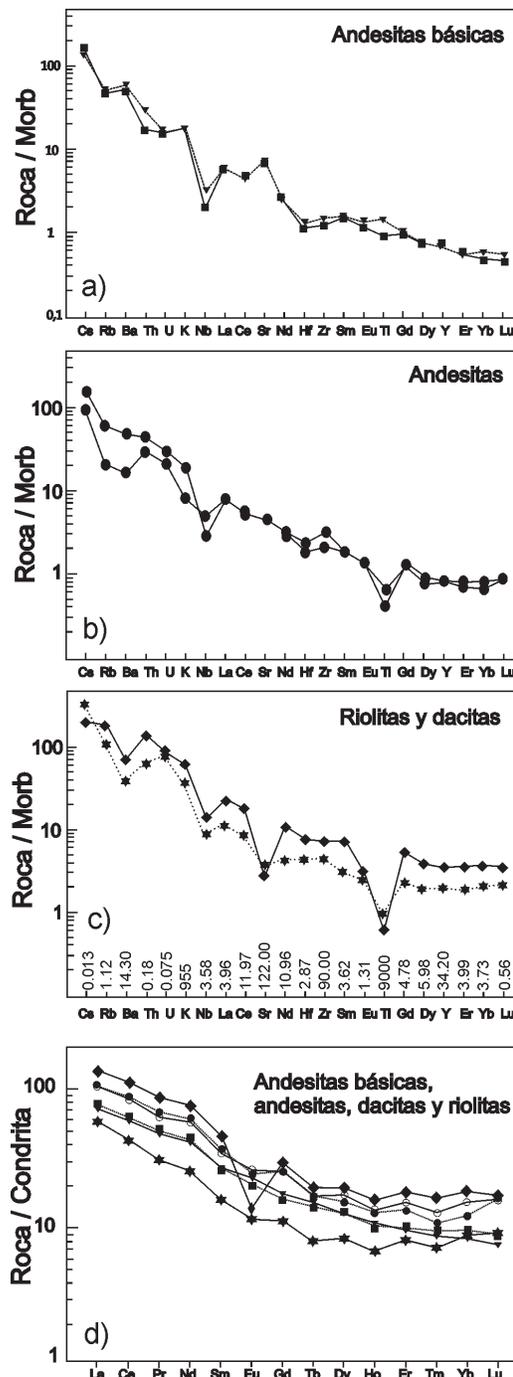
En el gráfico Th/Yb vs Ta/Yb (Pearce 1983) donde se muestra el campo de las rocas básicas de los Andes Centrales (Fig. 10), es evidente la coincidencia de las volcánitas de Punta del Agua con este ambiente. Según Pearce (1983) el factor de normalización (Yb) permite independizar el análisis de las variaciones debidas a fusión parcial y cristalización fraccionada, y evaluar el enriquecimiento y la contaminación. Si bien, la dispersión podría indicar que hay más de un proceso involucrado en la petrogénesis de estas rocas, al igual que los basaltos de arcos volcánicos, las andesitas de Punta del Agua tienden a agruparse en los valores altos de Th y sus relaciones Ta/Yb  $> 0,1$  son típicas de rocas originadas en magmas de márgenes continentales activos, en cuya génesis tiene un rol importante el manto subcontinental enriquecido, determinando valores de Ta/Yb por arriba de la tendencia de WPB-MORB.

La distribución de puntos para la relación  $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$  vs.  $\text{Ce}_N$  (Saunders 1984) se corresponden principalmente con una tendencia paralela a la esperada para la fusión de una eclogita, sin embargo las muestras más diferenciadas (riolitas y riodacitas) responden en una evolución por cristalización fraccionada, conservando la relación  $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$  pero con aumento significativo de los valores de  $\text{Ce}_N$  (Gill 1981). La roca correspondiente al filón capa se aleja de ambas tendencias. Un patrón muy semejante se obtiene al graficar La vs. La/Sm, según la propuesta de Allègre y Minster (1978).

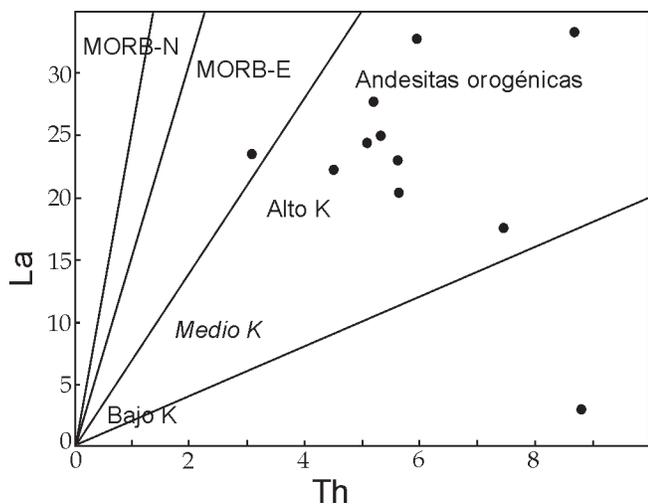
## Discusión

La secuencia de Punta del Agua muestra un amplio rango composicional con abundancia relativa en los términos andesíticos. La comparación con andesitas y riolitas del Grupo Choiyoi (Sato y Llambías 1993) no es concluyente para su homologación. Sato y Llambías (1993) plantean la existencia de líquidos andesíticos de fuerte tendencia calcoalcalina, y riolitas con afinidades transicionales (entre calcoalcalinos y alcalinos de tipo A) marcando el pasaje de régimen subductivo a no orogénico, extensional.

El análisis geoquímico de la Formación Punta del Agua identifica una secuencia de afinidad calcoalcalina de alto



**Figura 6:** Los diagramas a, b y c corresponden a los patrones de las rocas representativas de la secuencia de la Formación Punta del Agua normalizadas a los valores del MORB. En el diagrama d se representan las tendencias de las concentraciones de tierras raras normalizadas con los valores de la condrita propuestos por Boynton (1984). **a)** Las muestras de andesitas básicas tienen patrones con enriquecimiento selectivo en cationes de bajo potencial iónico. La anomalía en Nb es típica de magmas relacionados a zonas de subducción. **b)** Las muestras de rocas andesíticas evidencian menor fraccionamiento de tierras raras pesadas. Se destacan el enriquecimiento relativo de elementos LIL y los empobrecimientos en Nb y Ti. **c)** Las muestras de riolitas y dacitas (reioignimbritas y filón capa respectivamente) presentan un patrón con menor pendiente y fuerte fraccionamiento de Sr y Ti. **d)** Los patrones para tierras raras en las diferentes rocas de la secuencia normalizadas a los valores de la condrita observan diseños con altos valores de tierras raras livianas, en particular para rocas riolíticas.



**Figura 7:** Distribución de las muestras de la secuencia de Punta del Agua según su relación La-Th según la propuesta de Gill (1981).

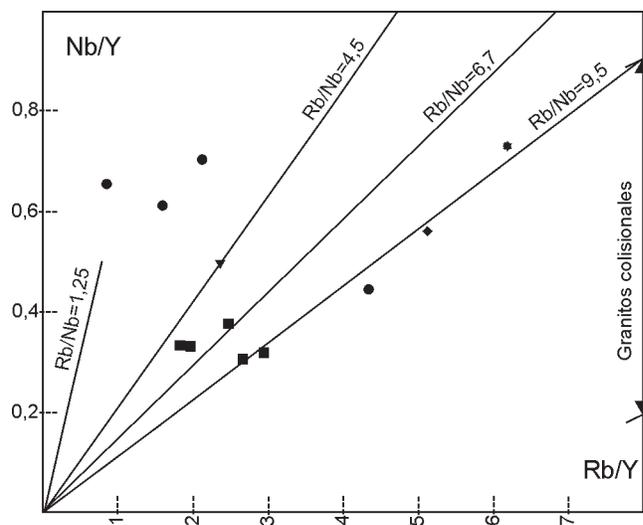
potasio emplazada en un régimen orogénico.

Se puede establecer correspondencia entre los patrones de tierras raras para los grupos litológicos identificados lo que sugiere afinidad entre los líquidos originales. En términos de la evolución desde andesitas básicas a riolitas, los patrones guardan paralelismo implicando que las líneas de descenso del líquido están controladas por minerales que no fraccionan fuertemente grupos de tierras raras entre una y otra roca. Como excepción, la anomalía negativa de Eu, presente en rocas diferenciadas, estaría relacionada a grandes cantidades de plagioclasa removidas durante la cristalización fraccionada. Así como en las riolitas se destaca la anomalía en Eu, marcando el fraccionamiento de plagioclasa, las andesitas, al igual que muchos de los ejemplos citados en la bibliografía, no están empobrecidos en Eu (Gill 1981; Cullers y Graf 1984). Este rasgo puede ser explicado como respuesta a las condiciones de  $fO_2$ .

Por otro lado, el quiebre del patrón de tierras raras livianas a medianas en las ignimbritas riolíticas y en las dacitas del filón capa podría responder al fraccionamiento de una fase mineralógica rica en titanio, lo cual se refleja en la importante anomalía en Ti que excede en casi 10 ordenes de magnitud la de las rocas andesíticas.

Las evidencias sobre el fraccionamiento están soportadas por la covariación de elementos y relaciones de elementos, que son particionados por los principales conjuntos minerales que aparecen como fenocristales. Además, los patrones de elementos normalizados con el MORB reflejan los aportes típicos de regiones orogénicas ricas en fluidos enriquecidos en elementos LIL. Estos diseños, y algunas relaciones de indicadores corticales, también son compatibles con una interacción con la corteza continental; esta influencia parece aumentar con la diferenciación de las rocas.

El filón capa representa una facies póstuma de este evento magmático para la región, según lo corrobora la edad  $Ar^{40}/Ar^{39}$  publicada por Coughlin (2000) de  $287 \pm 0,7$



**Figura 8:** La distribución de los valores de la relación Rb/Nb para los diferentes grupos de muestras permite establecer el aumento de esta relación con la diferenciación.

Ma. Su emplazamiento habría sido acompañado por una importante movilización de la fase fluida que actuó sobre la mineralogía del dique y modificó la química de la roca de caja.

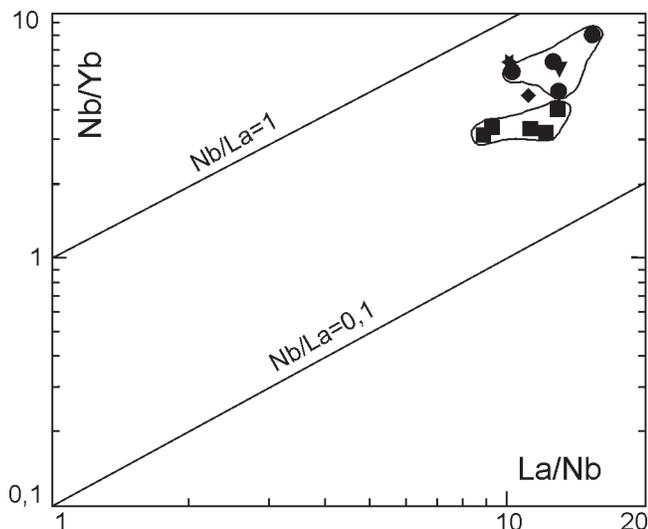
Se pueden definir como improntas típicas de líquidos derivados de la zona de subducción, las anomalías negativas en Nb, Ta y Ti, retenidos en minerales de la corteza oceánica subductada, así como el enriquecimiento selectivo en K, Ba, Sr y tierras raras livianas, fácilmente móviles en fluidos acuosos.

El carácter potásico de estas volcanitas puede ser un aporte derivado de la cuña continental, como se ha reconocido en otras regiones de tectónica semejante. Este componente de placa continental podría ser la responsable de las relaciones  $Zr/Y \geq 3$  (Fig. 11), comparables a las que presentan las rocas del Grupo Calipuy de Perú (Petford y Atherton 1995), el cual es considerado una asociación andina típicamente calcoalcalina con efusiones (basalto-andesita-dacita-riolita) generadas por magmas que atravesaron una zona cratonizada.

Para corroborar el marco tectónico se utilizó el diagrama de Pearce *et al.* (1977), en el cual se observa la distribución de los valores de  $FeO-MgO-Al_2O_3$  de las volcanitas de la Formación Punta del Agua en el campo de las rocas orogénicas y el de Wood (1980), según el cual la proporción de elementos menores (Th-Hf/3-Ta, Fig. 12) ratifican el ambiente de emplazamiento enmarcado en un régimen destructivo en un margen continental.

#### Edad de la Formación Punta de Agua

Ésta puede ser establecida a partir de sus relaciones estratigráficas y de dataciones efectuadas en flujos lávicos de la unidad. En ese sentido su edad no sería más antigua que el Carbonífero Inferior ya que sobreyace en



**Figura 9:** Los valores de las relaciones Nb/La aumentan de las andesitas básicas hacia las andesitas, dacitas y riolitas.

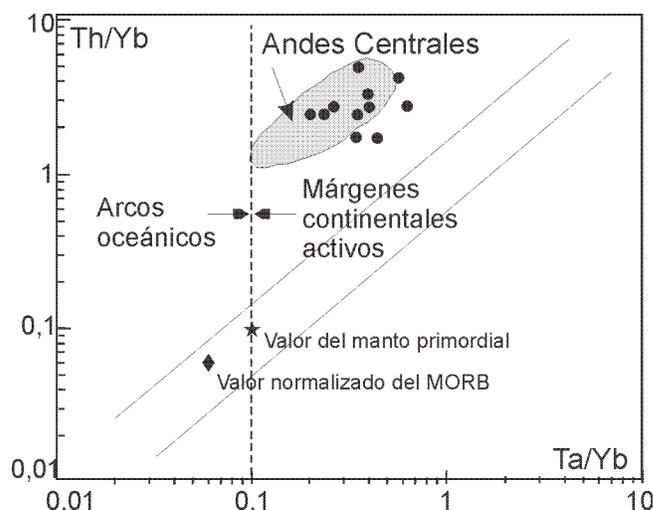
discordancia angular a la Formación Jagüé de edad eocarbonífera (probablemente viséana). Por otro lado, no debe ser más joven que el Pérmico Temprano, edad de la suprayacente Formación Río del Peñón basada en estudios palinológicos y una datación radimétrica (Coughlin 2000).

Datos geocronológicos para la unidad fueron primeramente señalados en el trabajo de Aceñolaza *et al.* (1971). En esta publicación se cita una comunicación verbal de R. González quien proporcionó dos valores provisionales K/Ar de  $327 \pm 18$  Ma (Namuriano) y K/Ar de  $368 \pm 19$  Ma (Devónico). Ambas edades habrían sido obtenidas en los alrededores del cerro Chuscho por lo que su valor para establecer la edad de la Formación Punta del Agua es relativo, de acuerdo a lo discutido por Fauqué y Villar (2003). Por otro lado la segunda de las edades obtenidas no guarda correspondencia con las relaciones estratigráficas observadas.

Una nueva datación radimétrica efectuada sobre una andesita del tope de la Formación Punta del Agua ha sido citada por Fauqué *et al.* (1999); la muestra datada sobre roca total por el método K/Ar proporcionó una edad de  $284 \pm 16$  Ma (Pérmico Temprano). Finalmente, una datación  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  obtenida por Coughlin (2000) en el filón capa que intruye a la Formación Río del Peñón, proporciona un valor de  $287 \pm 0,7$  Ma para esta roca.

En síntesis, a partir de las relaciones estratigráficas e información radimétrica la Formación Punta del Agua es asignada al Carbonífero Tardío, alcanzando muy probablemente sus términos cuspidales el Pérmico más temprano.

La correlación regional de la Formación Punta de Agua con otras series efusivas de similar antigüedad presenta algunos interrogantes. Hacia el oeste la sección inferior del Grupo Choiyoi, en el sentido de Llambías (1999), muestra características composicionales y geoquímicas comparables con la Formación Punta de Agua, aunque la



**Figura 10:** La relación Th/Ta normalizada a los valores de Yb (según Pearce 1983) permite evaluar el comportamiento de estas vulcanitas respecto de su enriquecimiento comparado con los valores del manto y el MORB y su distribución coincidente con el campo representativo de los Andes Centrales.

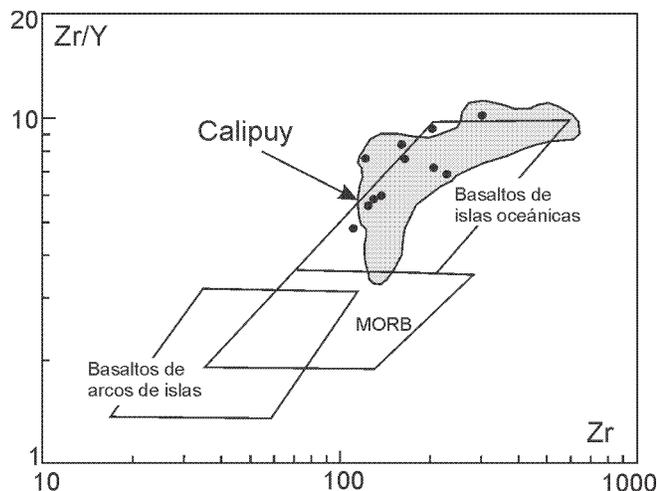
edad de esta última parece ser ligeramente más vieja. En el ámbito de las Sierras Pampeanas Koukharsky *et al.* (2001), describieron diques basálticos del Neopaleozoico-Triásico Temprano. Sólo el basalto de Las Fátimas es comparable en edad a las andesitas de la Formación Punta de Agua, aunque composicionalmente son diferentes y probablemente indiquen distinto ambiente tectónico.

#### *Evolución de la Formación Punta de Agua*

La asociación lávico-piroclástica de Punta del Agua constituye desde el punto de vista litológico una típica asociación volcanoclástica en la que alternan períodos de intensa eruptividad, dominados por distintos tipos de flujos, con lapsos intereruptivos donde predominaron los procesos sedimentarios.

Durante los intervalos de volcanismo intenso, la actividad ígnea se manifestó de dos formas diferentes. Por un lado, la interdigitación de flujos lávicos y flujos lávicos autobrechados y por el otro, brechas y flujos piroclásticos. Los flujos lávicos estuvieron dominados por andesitas basálticas, andesitas y brechas andesíticas que evolucionaron verticalmente a facies dacíticas. La alteración propilitica, que muestran en algunos casos estas rocas (manifestada como cloritas, epidoto y calcita), afecta sólo una parte de las muestras estudiadas, y en todo caso se manifiesta pobremente en relación a secuencias similares.

En lo que respecta a los procesos piroclásticos, se han identificado facies de flujos piroclásticos de bloque y ceniza (*block and ash-flow*) y reoignimbritas. Los primeros resultan brechas muy tenaces, con clastos de hasta 40 cm de diámetro que muestran evidencias de alteración térmica en su superficie y se encuentran inmersos en una matriz



**Figura 11:** El gráfico propuesto por Pearce y Norry (1979) permite observar el enriquecimiento en Zr para estas rocas en comparación con el campo definido por la secuencia peruana de Calipuy (Petford y Atherton, 1995).

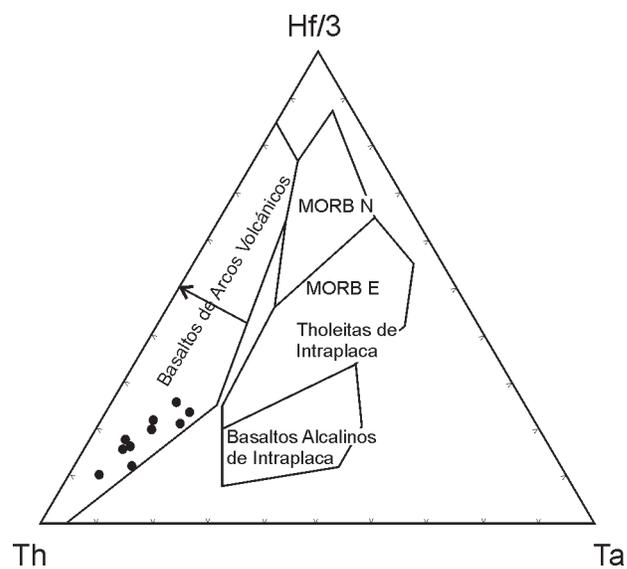
vitroclástica. Las reoignimbritas representan las composiciones más diferenciadas (riolitas).

La observación de la unidad a ambos lados del sinclinal del Rincón Blanco, muestra predominios de flujos lávicos de composición andesítico basáltica y andesítica en el sector oriental, mientras que el flanco occidental está compuesto casi exclusivamente por piroclastitas (brechas volcánicas, ignimbritas y flujos piroclásticos de bloques y ceniza) de composición andesítica a riolítica.

Durante los períodos intereruptivos comenzó el modelado del relieve volcánico por acción fluvial, la que originó tres tipos de depósitos bien diferenciados: 1) brechas y conglomerados matriz soportados, en ocasiones con matriz fangosa, 2) areniscas y ortoconglomerados y 3) secuencias pelíticas de aspecto varvado. La primera corresponde a depósitos de abanicos aluviales y taludes, donde los paraconglomerados y brechas matriz soportadas descritas, probablemente correspondan a lahares (torrentes de barro volcánico) desarrollados a favor de pendientes escarpadas. Debe aclararse que estas rocas pueden en ocasiones ser difíciles de diferenciar de los llamados lahares calientes (*hot lahares*) citados por Hoblitt y Kellogg (1979), Arguden y Rodolfo (1990) y Smith y Lowe (1991), los que en realidad corresponden a flujos piroclásticos de bloques, generados a partir de fluidos a alta temperatura (Limarino *et al.* 2002).

En lo que corresponde a los depósitos de areniscas y conglomerados clasto-soportados, muestran importante participación de estructuras entrecruzadas y desarrollo de paleocanales. El conjunto resulta con toda probabilidad de la sedimentación en cursos fluviales entrelazados de naturaleza proximal, que rellenaron paleovalles durante el lapso intereruptivo y fueron luego cubiertos por coladas al reanudarse la actividad volcánica.

Finalmente la secuencia pelítica de aspecto varvado que aflora en la quebrada del Tuli representaría pequeños lagos formados como resultado del irregular relieve vol-



**Figura 12:** De acuerdo a las relaciones Th-Hf/3-Ta (Wood 1980) se confirma el emplazamiento de la secuencia de Punta del Agua en un ambiente orogénico de margen continental activo.

cánico. La fina estratificación del depósito sugiere la existencia de flujos subácueos tipo *underflows* que alternaban con períodos de bajo aporte clástico y sedimentación básicamente por decantación.

De lo expuesto, y de la información geoquímica presentada en este trabajo, surge claramente que la Formación Punta del Agua caracteriza un margen continental activo. En este contexto las rocas efusivas representan los términos de arco magmático y los conglomerados y areniscas probablemente la sedimentación de intraarco.

## Conclusiones

El análisis de las características litológicas y geoquímicas junto a los datos geocronológicos señalados para la Formación Punta del Agua permiten obtener las siguientes conclusiones:

1. La unidad presenta una composición litológica compleja en la que participan distintos tipos de rocas volcánicas y acumulaciones sedimentarias. Las volcanitas son predominantemente de composición andesítica-basáltica y andesítica, evolucionando verticalmente a términos riolíticos. Por su parte las sedimentitas corresponden a diferentes tipos de conglomerados y areniscas.
2. Los términos volcánicos y sedimentarios se interestratifican indicando períodos sineruptivos e intereruptivos respectivamente. Durante los períodos sineruptivos predominaron flujos lávicos y piroclásticos, estos últimos representados tanto por flujos de bloque y ceniza como por ignimbritas. Los procesos sedimentarios durante este lapso se encontraron muy limitados.
3. Durante la fase intereruptiva se desarrolló una importante actividad fluvial que dio lugar a la generación de depósitos de taludes y abanicos aluviales junto a acumu-

laciones de ríos entrelazados que rellenaron paleovalles. Subsecuente reactivación en el volcanismo, cubrió a las acumulaciones sedimentarias formando nuevo relieve.

4. Los datos geocronológicos y las relaciones estratigráficas indican una edad carbonífera tardía para el volcanismo, el que podría haberse prolongado hasta inicios del Pérmico Temprano.

5. El carácter calcoalcalino de la serie y la abundancia relativa en K de las andesitas, demuestran la derivación de líquidos padres originados en zonas de subducción. La relación de elementos mayores, menores y traza corroboran este emplazamiento y muestran los efectos de procesos de fraccionamiento y contaminación sobreimpuestos.

6. La Formación Punta del Agua prueba la existencia de volcanismo relacionado al arco magmático gondwánico en la Precordillera, genéticamente relacionado con las etapas iniciales de la eruptividad neopaleozoica de la cordillera de Colangüil.

## Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Proyecto PICT-BID 4821 (Agencia de Promoción Científica y Tecnológica) "Estratigrafía, sistemas depositacionales y magmatismo del Paleozoico Superior de la Precordillera en las provincias de San Juan y La Rioja". Los relevamientos geológicos fueron efectuados dentro del marco del levantamiento de la Hoja Tinogasta (SEGEMAR). Finalmente los autores agradecen el apoyo logístico del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Buenos Aires.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aceñolaza, F., 1971. Geología estratigráfica de la zona comprendida entre Punta de Agua y Rincón Blanco, Dpto. Gral. Lamadrid, La Rioja. *Acta Geológica Lilloana* 11(7): 125-150.
- Aceñolaza, F., Toselli, A. y Bernasconi, A., 1971. La Precordillera de Jagüe, La Rioja, Argentina, su importancia geológica y estructura. *Acta Geológica Lilloana* 11 (14): 257-290.
- Allègre, C.L. y Minster J. F., 1978. Quantitative Models of Trace Element Behavior in Magmatic Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38:1-25.
- Arguden, A.T. y Rodolfo, K.S., 1990. Sedimentologic and dynamic differences between hot and cold laharic debris flow of Mayon Volcano, Philippines. *Geological Society of America Bulletin* 102: 865-876.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare Herat elements: Meteorites studies (Chapter 3). In P.Henderson (Ed.). *Rare Earth Elements Geochemistry, Developments in Geochemistry* 2. Elsevier, 510 p.
- Caminos, R., Zamuner, A., Limarino, C. y Fauqué, L., 1995. Triásico superior fosilífero en la Precordillera riojana. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 50 (1-4): 262-265.
- Coughlin, T.J., 2000. Linked orogen-oblique fault zones in the central Argentine Andes: the basis of a new model for Andean orogenesis and metallogenesis. Tesis Doctoral (inédita), Universidad de Queensland, 207 p.
- Cullers, R.L. y Graf, J.L., 1984. Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Intermediate and silicic rocks-ore petrogenesis (Chapter 8). In P.Henderson (Ed.). *Rare Earth Elements Geochemistry, Developments in Geochemistry* 2. Elsevier, 510 p.
- Droux, A. y Delaloye, M., 1996. Petrography and geochemistry of Plio-Quaternary calc-alkaline volcanoes of Southwestern Colombia. *Journal of South American Earth Sciences* 9 (1-2): 27-41.
- Folk, R.L., Andrews, P.B. y Lewis, D.W., 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 13: 937-968.
- Fauqué, L., Limarino, C., Cingolani, C. y Varela, R., 1999. Los movimientos intracarboníferos en la Precordillera riojana. XIV° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 421-424.
- Fauqué, L.E. y Villar, L.M., 2003. Reinterpretación estratigráfica y petrología de la Formación Chuscho. *Precordillera de La Rioja. Revista de la Asociación Geológica Argentina* 58(2): 218-232.
- Gill, J.B., 1981. *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer 390 p. Berlin.
- González, C.R. y Bossi, G.E., 1986. Los depósitos carbónicos al oeste de Jagüel, La Rioja. IV Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, Actas 1: 231-236.
- Hoblitt, R.P. y Kelloggs, K.S., 1979. Emplacement temperature of unsorted and unstratified deposits of volcanic rock debris as determined by paleomagnetic techniques. *Geological Society of America, Bulletin* 90: 633-642.
- Koukharsky, M., C.Tassinari, M.K. de Brodtkorb y Leal, P., 2001. Basaltos del Neopaleozoico-Triásico temprano? en las sierras Norte de Córdoba y de Ambargasta, Sierras Pampeanas Orientales: Petrografía y edades K-Ar. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 56(3): 400-403.
- Le Maitre, R.W, Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Strekeisen, A., Woolley, A.R. y Zanettin, B., 1989. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, pp193. Oxford.
- Limarino, C.; Fauqué, L. y Caminos, R., 1990. Facies y evolución paleoambiental de los bancos rojos triásicos del norte de la Precordillera riojana. III Reunión Argentina de Sedimentología, Actas 1: 169-174.
- Limarino, C.; Fauqué, L.; Cardo, R. Y Gagliardo, M.L. y Escosteguy, L., 2002. La faja volcánica miocena de la Precordillera septentrional. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 57: 289-304.
- Lambias, E.J., 1999. Las Rocas Igneas Gondwánicas. 1. El Magmatismo Gondwanico durante el Paleozoico Superior-Triásico. En Caminos, R. (Ed.): *Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales* 21(14): 349-476.
- Llambias, E.J. y Sato, A.M., 1995. El Batolito de Colangüil: transición entre orogénesis y anorogénesis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50(1-4): 111-131.
- López Escobar, L., Parada, M.A., Moreno, H., Frey, F.A. y Hickey-Vargas, R., 1992. A contribution to the petrogenesis of Osorno and Calbuco volcanoes, Southern Andes (41°-41°30' S): comparative study. *Revista Geológica de Chile*, 20: 33-55.
- López Escobar, L.; Parada, M.A., Hickey-Vargas, R., Frey, F.A.; Kempton, P.D. y H., Moreno, 1995. Calbuco volcano and minor eruptive centres 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119: 345-361.
- Net, L.I., 1999. Petrografía, diagénesis y proveniencia de las areniscas de la sección inferior del Grupo Paganzo, Tesis Doctoral (inédito), Universidad de Buenos Aires (inédita) 498 p., Buenos Aires.
- Pearce, J.A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. En C.J.Hawkesworth y M.J.Norry (eds.) *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*: 230-249. Shiva Publishing Limited.
- Pearce T.H., Gorman, B.E. y Birkett, T.C., 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 36: 121-132.

- Petford, N. y Atherton, M., 1995. Cretaceous-Tertiary volcanism and syn-subduction crustal extension in northern central Peru. In Smellie, J.L. (ed.). *Volcanism Associated with Extension at consuming Plate Margins*, Geological Society Special Publication, 81: 233-248, London.
- Saunders, A.D., 1984. The rare earth element characteristics of igneous rocks from the ocean basins. En Henderson (Ed.): *Rare Earth Elements Geochemistry, Developments in Geochemistry*, 2: 205-236. Elsevier.
- Sato, A.M. y Llambías, E.J., 1993. El Grupo Choiyoi, provincia de San Juan: equivalente efusivo del Batolito de Colangüil. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 4: 156-165.
- Scalabrini Ortiz, J., 1973. El Carbónico de la Precordillera Argentina al norte del Río Jachal. V° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 387-401.
- Scholle, P.A., 1979. A color illustrated guide to constituents, textures, cements, and porosities of sandstone and associated rocks. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 28, 201 p.
- Smith, G.A. y Lowe, D.R., 1991. Lahars: volcano-hidrologic events and deposition in the debris flow-hiperconcentrated flow continuum. En Fisher and Smith (eds.) *Sedimentation in volcanic setting*, SEPM Special Publication, 45: 59-70.
- Thirlwall, M.F., Smith, T.E., Graham, A.M., Theodorou, N., Hollings, P.J., Davidson, P. y Arculus R.J., 1994. High Field Strength Element Anomalies in Arc Lavas: Source or Process. *Journal of Petrology*, 35(3): 819-838.
- 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.
- Wood, D.A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planetary Science Letters*, 50:11-30.

**Recibido:** 8 de abril, 2003

**Aceptado:** 7 de julio, 2004