



## BRECHAS ASOCIADAS A LA INTRUSIÓN DE UN LACOLITO EN SECUENCIAS PIROCLÁSTICAS PERMO-TRIÁSICAS DE LA CORDILLERA FRONTAL, PROVINCIA DE SAN JUAN, ARGENTINA

Gerardo N. PÁEZ<sup>1</sup>, Conrado PERMUY VIDAL<sup>1</sup>, Luciano LÓPEZ<sup>1</sup>, Sebastián M. JOVIC<sup>1</sup>,  
Diego S. PALMA<sup>2</sup>, Diego M. GUIDO<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Instituto de Recursos Minerales (INREMI).  
Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Paseo del Bosque s/n,  
B1900FWA, La Plata. Argentina. E-mail: gerardo.paez.unlp@gmail.com

<sup>2</sup>CONICET. YPF Tecnología (Y-TEC), Berisso, Argentina.

<sup>3</sup> Austral Gold Ltd.

### RESUMEN

En este trabajo se presenta una detallada descripción de la arquitectura de facies de un lacolito de composición andesítica que intruye a una secuencia piroclástica que se encontraba húmeda y poco consolidada al momento de la intrusión. Estas rocas corresponden a parte del extenso complejo volcánico Permo-Triásico denominado formalmente Grupo Choiyoi, y están ubicadas en la provincia de San Juan (Argentina). Al momento de la intrusión el magma andesítico sufrió un fuerte sobreenfriamiento (*quenching*), lo que llevó a la formación de un potente envoltorio de hialoclastitas intrusivas, que rodean al núcleo coherente del lacolito. Las rocas de caja (mayormente depósitos piroclásticos de surge) se encontraban saturados en agua y poco consolidados al momento de la intrusión, lo que también facilitó la formación de peperitas hacia la parte más externa del envoltorio de brechas. Por último, la arquitectura de facies es utilizada para proponer un modelo conceptual que permite explicar los mecanismos de intrusión y crecimiento del lacolito.

**Palabras clave:** Hialoclastita, peperita, hidromagmatismo, volcanismo, Choiyoi.

### ABSTRACT

*Breccia facies associated with laccolith intrusions in Permo-Triassic pyroclastic sequences of the Frontal Cordillera, San Juan province, Argentina.* In this work, we present a comprehensive description of the facies architecture of an andesitic laccolith intruding a wet and unconsolidated pyroclastic sequence associated to the Permo-Triassic Choiyoi Group, an extensive volcanic complex outcropping in western Argentina. Upon intrusion, the andesitic magma suffered extensive quenching, leading to the development of a thick envelope of intrusive hyaloclastites that encloses the coherent interior of the laccolith. The host rocks (mostly pyroclastic surge deposits) were water saturated and most likely also unconsolidated at the time of the intrusion, leading to the development of peperites at the outer edge of the breccia envelope. Finally, facies architecture is used as a tool for assessing intrusion mechanisms for the laccolith, leading to an intrusion model that accounts for most of the field evidences presented on this work.

**Keywords:** Hyaloclastite, peperite, hydromagmatism, volcanism, Choiyoi.

### INTRODUCCIÓN

Cuando un magma intruye una secuencia clástica saturada en agua y pobremente consolidada, el brusco enfriamiento del fundido es acompañado por la disgregación mecánica del mismo. Esto da lugar a la formación de un tipo de roca denominado hialoclastita intrusiva (McPhie *et al.* 1993), que consisten en brechas pobremente seleccionadas, clasto a matriz soportadas, com-

puestas por fragmentos ígneos sobre enfriados (generalmente vítreos), que se presentan formando una envoltura que rodea al intrusivo (*e.g.* Stewart y McPhie 2003; Németh *et al.* 2008; van Otterloo *et al.* 2015). Bajo estas condiciones, también puede formarse una roca híbrida conocida como peperita (Doyle 2000; Skilling *et al.* 2002), que es un término genético utilizado para hacer referencia a brechas matriz-soportadas compuestas por material ígneo disgregado, mezclado con partículas deri-

vadas de las rocas clásticas provenientes de la caja del intrusivo.

En este trabajo se describen las características texturales, composicionales y morfológicas de un conjunto de brechas asociadas a un lacolito que aflora en la Cordillera Frontal sanjuanina ( $31^{\circ}10'36,65''S$  y  $69^{\circ}40'45,18''O$ ), a unos 30 km al noroeste de la localidad de Calingasta y a 5 km al noroeste de la Mina Casposo. Analizando la arquitectura de las facies descritas, se propone un modelo conceptual que permite explicar los mecanismos de intrusión y crecimiento del cuerpo ígneo.

### MARCO GEOLÓGICO

El Grupo Choiyoi constituye una extensa unidad ígnea de edad Pérmica a Triásica que cubre un área de al menos 200.000 km<sup>2</sup> en el oeste de Argentina. Consiste en una sección inferior andesítica a dacítica y una sección superior principalmente riolítica (Llambías *et al.* 1993). Las rocas volcánicas están asociadas genéticamente a extensos campos de rocas plutónicas que en su conjunto definen asociaciones volcano-plutónicas con geometrías complejas (Llambías *et al.* 1993).

En la zona de trabajo el volcanismo del Grupo Choiyoi inicia con un espeso paquete piroclástico (>600 m), monótono, denominado informalmente **Ignimbrita Andesítica**. Está compuesta por flujos piroclásticos muy homogéneos, contextura eutaxítica y estratificación difusa. Presenta 60 a 80% de cristaloclastos de plagioclasas, anfíboles y en menor medida cuarzo. Los litoclastos son escasos, representados por granitoides y andesitas, y pueden alcanzar hasta 50 cm de diámetro.

En discordancia erosiva, se reconoce otro paquete piroclástico de espesor variable (entre 30 y 50 m), que ha sido denominado informalmente **Ignimbrita Morada**. Este paquete inicia con potentes brechas líticas masivas, con fragmentos subangulosos a subredondeados de hasta 2 m de diámetro compuestos mayormente por ignimbritas andesíticas, en una matriz cinerítica rojiza rica en cristaloclastos de plagioclasas, anfíboles y cantidades menores de cuarzo. En el tramo superior se observa una fuerte, aunque progresiva, disminución en el tamaño de los litoclastos, que es acompañado por un incremento en la proporción de matriz y fragmentos pumíceos. Hacia el techo esta unidad esta coronada por paquetes de depósitos de oleadas piroclásticas (surges) de hasta 50 m de potencia. Se trata de depósitos relativamente bien seleccionados y con arreglo matriz a clasto-sostén, donde alternan niveles centi a decimétricos que varían desde lapilli hasta ceniza fina. El conjunto se presenta bien estratificado, con abundantes estructuras sedimentarias incluyendo capa plana, laminación cruzada de bajo ángulo y eventuales antidunas. Por último, los depósitos de surge pueden presentarse apoyando directamente sobre la Ignimbrita Andesítica, lo que sugiere también una variación lateral entre los depósitos de brechas y los depósitos de oleadas piroclásticas.

Culminando la secuencia volcánica Permo-Triásica,

y mediando una suave discordancia angular, se observa una secuencia piroclástica de unos 100 m de potencia y de composiciones netamente riolíticas, denominada informalmente **Ignimbrita Cerro Pelado**. Esta unidad agrupa un conjunto de depósitos ricos en matriz cinerítica y con bajos contenidos de cristaloclastos de feldespatos alcalinos y cuarzo. Hacia la base se presentan fuertemente soldadas y en los niveles superiores se evidencian texturas eutaxíticas con grandes fiammes discoidales. Todo el paquete presenta un arreglo grano creciente respecto a los litoclastos, que también aumentan significativamente en cantidad hacia el techo de la unidad, donde alcanzan diámetros de hasta 15 cm.

Finalmente, la secuencia está intruída por un cuerpo sub volcánico aproximadamente concordante y de composición feno-andesítica, denominado informalmente como **Lacolito Cerro Pelado** en base a su geometría dominada por una base plana y un techo irregular abovedado (Fig. 1a; Llambías 2004). El cuerpo presenta unos 700 m de diámetro y se intruye en el contacto entre la Ignimbrita Andesítica y los depósitos de surge de la Ignimbrita Morada con espesores máximos que pueden alcanzar los 50 m de potencia (Fig. 1a). Litológicamente está compuesto por feno-andesitas porfíricas, con fenocristales de plagioclasas y anfíboles de 1 a 5 mm, rodeados por una pasta afanítica de coloración oscura, y en los contactos con las rocas de caja presenta extensos cuerpos de brechas, motivo de la presente comunicación.

### MODELO DE FACIES DEL LACOLITO CERRO PELADO

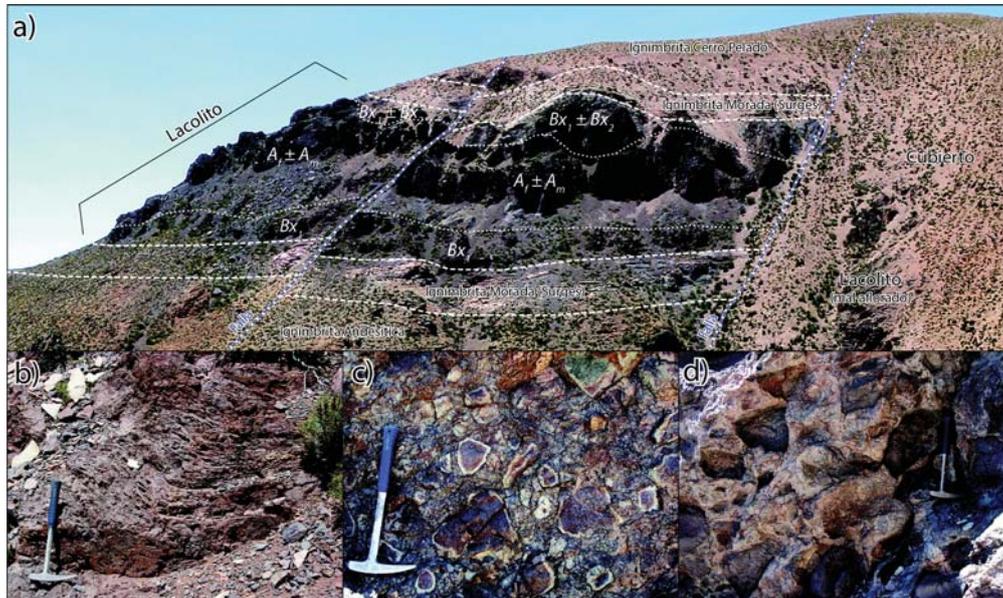
En esta sección se describen las facies que constituyen el interior del Lacolito Cerro Pelado, incluyendo sus características composicionales y texturales, junto con la geometría y arquitectura de los cuerpos de roca identificados.

#### Facies Coherentes

Las facies coherentes constituyen el núcleo del lacolito (Fig. 1a y 1b), formando un único cuerpo irregular con espesor variable entre 2 y 30 m de espesor., que en todos los casos está rodeado por una o dos de las facies brechosas. Como se mencionó anteriormente, se componen de feno-andesitas porfíricas con pasta afanítica y fenocristales de plagioclasas y anfíboles, no se observó la presencia de vesículas.

Las partes más externas de este dominio presentan un sistema de fracturas irregulares, con planos suavemente curvos, que definen una serie de bloques de aspecto poligonado, y que pueden asimilarse a los denominados pseudopillows de Forbes *et al.* (2012).

*Andesitas foliadas (A<sub>f</sub>)*. Esta facies es la más abundante dentro de los dominios coherentes del lacolito, constituyendo más del 90% de los afloramientos. Las andesitas de esta facies se caracterizan por una foliación ígnea de escala centimétrica (Fig. 1b), que por sectores



**Figura 1.** Lacolito Cerro Pelado. a) Vista regional hacia el Este mostrando la distribución de las distintas facies que componen el intrusivo. b) Facies de Andesitas foliadas ( $A_f$ ). c) Facies de Brechas andesíticas clasto a matriz sostenidas ( $Bx_1$ ) mostrando clastos con bordes hidrotermalizados. d) Facies de Brechas andesíticas con matriz tobácea ( $Bx_2$ ).

se encuentra replegada formando pliegues moderadamente cerrados, a veces volcados. Esta facies también puede ser encontrada como clastos en las partes más internas del anillo de brechas que rodea a las facies coherentes.

*Andesitas masivas ( $A_m$ ).* Esta facies tiene un desarrollo limitado dentro de los dominios coherentes del lacolito, representando menos del 10% de los afloramientos. Se trata de andesitas masivas, sin desarrollo el de ninguna estructura ígnea. Si bien su desarrollo es limitado en el núcleo del intrusivo, esta facies constituye un volumen significativo de los clastos presentes en las facies de brechas, especialmente hacia las partes medias y externas del anillo de brechas que rodea al cuerpo.

### Facies de Brechas

Considerando el espesor total del Lacolito Cerro Pelado, las facies brechosas constituyen un volumen significativo del cuerpo ígneo (Fig. 1a), pudiendo alcanzar por sectores más del 50% del espesor total del cuerpo, y formando una envolvente continua de entre 5 y 20 m de espesor que rodea a las facies coherentes.

*Brechas andesíticas clasto a matriz sostenidas ( $Bx_1$ ).* Esta facies constituye más del 90% del volumen de los cuerpos de brechas, formando un envoltorio continuo que rodea a las facies coherentes con espesores que pueden variar entre 1 y 15 m. Presenta contactos transicionales hacia las facies coherentes ubicadas en el interior del intrusivo. Mientras que, hacia el exterior, se la puede observar en contacto directo (intrusivo) con la roca de caja piroclástica, o bien puede gradar transicionalmente

hacia las facies de *Brechas andesíticas con matriz tobácea ( $Bx_2$ ).* Por último, esta facies también puede ser observada formando diques que se intruyen desde los bordes hacia la parte central de las facies coherentes. Estos diques tienen contactos netos o transicionales, y en general desarrollan espesores máximos de 1 a 2 m, adelgazándose hacia el interior del intrusivo hasta desaparecer.

Se trata de brechas monolitológicas pobremente seleccionadas (Fig. 1c), clasto a matriz soportadas, cuya estructura interna presenta en la zona interna una predominancia de clastos con arreglo en rompecabezas que gradan transicionalmente hacia los sectores externos a una disposición desordenada con movimiento rotacional de los clastos.

Los clastos varían en tamaño desde 2 mm hasta 1 m de diámetro, están compuestos mayormente por andesitas masivas ( $A_m$ ) y en menor medida por andesitas foliadas ( $A_f$ ), son subangulosos a subredondeados, y presentan bordes de geometría curvilinear. Los clastos masivos son más abundantes hacia la parte externa de los cuerpos de brechas, donde pueden presentar bordes hidrotermalizados (Fig. 1c), mientras que los clastos bandeados son más abundantes hacia el interior y en general se presentan inalterados. La matriz muestra una coloración oscura y está compuesta por clastos de grano fino de andesita molida (menores a 2 mm, mayormente tamaño limo a arena fina). La proporción de matriz varía gradualmente desde contenidos inferiores al 20% hacia el interior de los cuerpos de brechas (en las proximidades de las facies coherentes), hasta contenidos de matriz que superan el 40% en el exterior de los mismos.

*Brechas andesíticas con matriz tobácea ( $Bx_2$ ).* Esta

facies tiene una distribución discontinua a lo largo del contacto superior del lacolito, con espesores que pueden variar entre unos pocos centímetros hasta más de 5 m de potencia. El contacto superior es transicional con los depósitos de surge de la Ignimbrita Morada, que hacia arriba pasa a un paquete de hasta 2 m de las tobas que se presentan masivas (re-homogeneizadas) o bien con las estructuras sedimentarias desdibujadas. A diferencia del contacto superior, estas brechas están por completo ausentes hacia la base del lacolito, donde  $Bx_1$  está en contacto directo con las brechas líticas de la Ignimbrita Morada o bien con la Ignimbrita Andesítica. Por último, hacia el interior de la envolvente de brechas, esta facies pasa transicionalmente hacia  $Bx_1$  mediando una progresiva disminución en el contenido de matriz, y en algunos casos se la puede observar formando pequeños diques de algunos centímetros, internándose dentro de  $Bx_1$ .

Esta facies se compone de brechas matriz-sostén, pobremente seleccionadas con clastos blocosos rodeados por una matriz tobácea idéntica a la que compone los depósitos de surge de la Ignimbrita Morada, y que representan la principal roca de caja del intrusivo (Fig. 1d).

Los clastos varían en tamaño desde 1 a 60 cm de diámetro y corresponden únicamente a las andesitas masivas ( $A_m$ ). Se trata de clastos subangulosos a subredondeados con bordes de geometría curvilinear. La matriz es masiva y abundante, aunque puede variar entre un 20 y un 60% en cortas distancias (centímetros a decímetros).

## DISCUSIÓN

Considerando las relaciones de campo, las composiciones de los clastos y la matriz, la organización interna de los cuerpos de brecha, junto con las relaciones con las demás facies que componen el lacolito, la facies de *Brechas andesíticas clasto a matriz sostenidas* ( $Bx_1$ ) pueden ser interpretadas como hialoclastitas intrusivas (McPhie *et al.* 1993). Estas resultan de la fragmentación no explosiva del magma como consecuencia del sobre enfriamiento del mismo en ambientes intrusivos sujetos a grandes contrastes térmicos (van Otterloo *et al.* 2015), y por lo tanto son indicativas de la presencia de un refrigerante externo (agua poral) en las inmediaciones del cuerpo ígneo. Los bordes hidrotermalizados de muchos de los clastos apoyan también esta idea.

De manera similar, las facies de *Brechas andesíticas con matriz tobácea* ( $Bx_2$ ) pueden ser interpretadas como peperitas de tipo disperso, originadas como resultado de la intrusión del lacolito en una secuencia piroclástica poco consolidada y saturada en agua (Doyle 2000; Skilling *et al.* 2002). Esto produce vaporización del refrigerante y la consecuente fluidización de las rocas de caja no consolidadas, que es acompañada por la fragmentación y dispersión de la andesita dentro de los depósitos de surge. La presencia de un intervalo de tobas re-homogeneizadas, o con estructuras sedimentarias desdibujadas, en el contacto superior de las peperitas, soportan a

la fluidización como el principal mecanismo de movimiento de los clastos.

Bajo estas condiciones, el magma es súbitamente enfriado (en inglés: *quenched*), y de manera simultánea fragmentado *in-situ* por la propagación de una red de fracturas contraccionales producto del stress térmico (van Otterloo *et al.* 2015). La presencia de clastos con límites curvilineales en  $Bx_1$  y  $Bx_2$ , arreglos clasto sostenidos en rompecabezas en  $Bx_1$ , junto con la presencia de estructuras de tipo pseudo pillow en las partes externas de las facies coherentes ( $A_j$  y  $A_m$ ), son características diagnósticas de este proceso (McPhie *et al.* 1993; Forbes *et al.* 2012; van Otterloo *et al.* 2015).

En el caso de las hialoclastitas, el pasaje transicional observado desde las facies coherentes, las hialoclastitas clasto-sostén y las hialoclastitas matriz-sostén desde el núcleo del cuerpo hasta el exterior del mismo, es interpretado como el resultado del aumento de la intensidad de la fragmentación hacia los bordes del lacolito, con las texturas matriz-sostén indicando condiciones extremas de fragmentación hialoclástica en el contacto externo del cuerpo (van Otterloo *et al.* 2015). En este sentido, la presencia de diques de hialoclastitas que se internan en las facies coherentes, estarían indicando el avance del frente de enfriamiento hacia el interior del intrusivo y el posible ingreso de agua a través fisuras.

Por otra parte, las texturas rotacionales en las hialoclastitas indicarían el movimiento de los clastos desde su posición original en rompecabezas, esto puede ocurrir como resultado de la vesiculación activa del magma durante la fragmentación, por el flujo del magma durante la intrusión, o bien por el flujo del refrigerante externo (agua) que ingresa dentro del envoltorio de brechas y desplaza los clastos (McPhie *et al.* 1993; van Otterloo *et al.* 2015). En el caso de estudio, la explicación más probable es la acción combinada de la fluidización de las hialoclastitas y el movimiento (flujo) del magma. En este sentido, los contactos gradacionales observados entre las hialoclastitas y las peperitas apuntan hacia la fluidización, mientras la presencia de foliación y repliegues en las facies coherentes son indicativas del flujo del magma durante el crecimiento del cuerpo ígneo (van Otterloo *et al.* 2015).

## CONCLUSIONES

La presencia de un envoltorio de hialoclastitas intrusivas y peperitas rodeando a las facies coherentes del Lacolito Cerro Pelado, no solo es indicativo de un origen intrusivo para el cuerpo en estudio, sino que también evidencia condiciones de saturación de agua y una pobre consolidación en los depósitos intruidos (oleadas piroclásticas e ignimbritas) al momento de la intrusión (McPhie *et al.* 1993; Skilling *et al.* 2002; van Otterloo *et al.* 2015). Además, esto sugiere un corto intervalo de tiempo entre la depositación de las rocas piroclásticas y la subsecuente intrusión del lacolito.

Por otra parte, la geometría relativamente simple de

las facies analizadas, su distribución concéntrica y sus contactos transicionales, indicarían que el cuerpo ígneo se habría formado a partir de la inyección continua de magma en un único pulso intrusivo, de manera similar a lo observado en otros cuerpos similares como por ejemplo el de la isla de Milos en Grecia (Stewart y McPhie 2003). Por último, se puede estimar que la profundidad a la que se intruyó el Lacolito Cerro Pelado sería inferior a 1,6 km en base a los cálculos de Kookelaar (1982), quien determinó que a profundidades mayores los procesos de fluidización inducida por calor quedarían inhibidos por el aumento de la presión confinante.

De esta manera, la correcta identificación de este tipo de brechas ayuda a determinar el origen intrusivo o extrusivo de cuerpos de rocas porfíricas en secuencias volcánicas antiguas, proveyendo además herramientas para analizar los mecanismos de intrusión de los cuerpos ígneos en estudio.

#### LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Doyle, M.G. 2000. Clast shape and textural associations in peperite as a guide to hydromagmatic interactions: Upper Permian basaltic and basaltic andesite examples from Kiama, Australia. *Aust. Journal of Earth Science* 47: 167-177.
- Forbes, A.E.S., Blake, S., Mcgarvie, D. W. y Tuffen, H. 2012. Pseudopillow fracture systems in lavas: Insights into cooling mechanisms and environments from lava flow fractures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 245-246: 68-80.
- Kokelaar, B.P. 1982. Fluidization of wet sediments during the emplacement and cooling of various igneous bodies. *Journal of the Geological Society* 139(1): 21-33.
- Llambías, E.J. 2004. Geología de los cuerpos ígneos. Asociación Geológica Argentina, Serie B27. Buenos Aires. 182 pp.
- Llambías, E.J., Kleiman, L.E. y Salvarredi, J.A. 1993. El Magmatismo Gondwánico. En: Ramos, V.A. (Ed.), Geología y Recursos Naturales de Mendoza, Relatorio, XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos (Mendoza), pp. 53-64.
- McPhie, J., Doyle, M. y Allen, R. 1993. *Volcanic Textures: A Guide to the Interpretation of Textures in Volcanic Rocks*. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania, Hobart. 198 pp.
- Nemeth, K., Pecskey, Z., Martin, U., Gmeling, K., Molnar, F. y Cronin, S.J. 2008. Hyaloclastites, peperites and soft-sediment deformation textures of a shallow subaqueous Miocene rhyolitic dome-cryptodome complex, Palhaza, Hungary. *Geological Society, London, Special Publications* 302(1): 63-86.
- Skilling, I.P., White, J.D.L. y McPhie, J. 2002. Peperite: A review of magma-sediment mingling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 114: 1-17.
- Stewart, A. L. y McPhie, J. 2003. Internal structure and emplacement of an Upper Pliocene dacite cryptodome, Milos Island, Greece. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 124(1-2): 129-148.
- van Otterloo, J., Cas, R.A.F. y Scutter, C.R. 2015. The fracture behaviour of volcanic glass and relevance to quench fragmentation during formation of hyaloclastite and phreatomagmatism. *Earth-Science Reviews* 151: 79-116.