

PETROFÍSICA BÁSICA DE LOS DEPÓSITOS DEL CICLO PRECUYANO, SIERRA DE LA CARA CURA, MENDOZA

Marina Drosina ¹, Silvia Barredo ¹, Luis Stinco ¹, Laura Giambiagi ², Osvaldo Migliavacca ¹

¹ Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Av. E. Madero 399. CABA.

mdrosina@itba.edu.ar; sbarredo@itba.edu.ar; lpstinco@itba.edu.ar; omigliav@itba.edu.ar

² CONICET-IANIGLA-CCT Mendoza. Adrián Leal s/n, Parque San Martín, Mendoza. lgiambiagi@mendoza-conicet.gob.ar

ARTICLE INFO

Article history

Received March 1, 2018

Accepted September 3, 2018

Available online September 25, 2018

Handling Editor

Sebastian Richiano

Keywords

Rocas volcánicas

Porosidad

Permeabilidad

Ciclo Precuyano

RESUMEN

En este trabajo se analiza la sucesión aflorante en el sector norte de la Sierra de la Cara Cura conformada por rocas volcánicas pertenecientes al Ciclo Precuyano. Estos depósitos se caracterizan por la presencia de niveles de brechas masivas monomíticas de hasta 15 m de espesor que intercalan niveles de rocas volcánicas de entre 5 y 8 m de espesor. El análisis integral de las muestras recolectadas, permitió obtener los valores de porosidad y permeabilidad de depósitos de bloques y cenizas y flujos lávicos de composición andesítica para determinar su potencial como roca reservorio de yacimientos convencionales. La porosidad total observada al microscopio es pobre, menor al 5% para las rocas ígneas y de un 7 % para las rocas volcánicas. De los estudios de laboratorio se pudieron obtener valores de porosidad efectiva y permeabilidad al gas, comprendidos entre 9,7 y 21,46% y 0,288 y 1,339 mD en los depósitos volcánicos y de entre 8,6 y 19,5% y 0,009 y 0,014 mD en los flujos lávicos. En función de estos resultados se pudo caracterizar la porosidad, analizar su origen e interpretar los factores que la pudieron modificar. Se comprobó que el espacio poral para muestras de afloramiento de los niveles ígneos resulta fundamentalmente de los procesos que afectaron a estas rocas durante su emplazamiento y posterior diagénesis (primeramente fracturación y alteración de minerales). Se estimó que un 70% del volumen total de porosidad en la roca ígnea corresponde a poros secundarios, mientras que el 30% restante son primarios. La porosidad secundaria está dada por la presencia de fracturas, tanto de origen tectónico como hidrotermal, y a procesos de disolución, mientras que la porosidad primaria se debe a la presencia de disyunciones columnares, vesículas en las coladas lávicas y alteración mineral. Las rocas volcánicas presentan un 80% de porosidad secundaria asociada a fracturas de origen tectónico y a procesos de disolución mientras que el 20 % restante corresponde a porosidad primaria asociada a vesículas y a una incipiente disyunción columnar. Este estudio se enfocó en definir los procesos que posibilitaron a rocas ígneas y volcánicas poseer características de reservorios, como posible herramienta para definir zonas favorables dentro de los cuerpos rocosos para el almacenamiento y vías de migración de los hidrocarburos. Se concluye que las facies piroclásticas asociadas a los flujos de bloques y cenizas presentan las mejores propiedades de reservorio en esta localidad, a la vez que la porosidad que predomina es del tipo secundaria, generada por microfracturación y por la disolución de componentes. En este trabajo se propone la existencia de dos tipos de reservorios en los depósitos estudiados del Precuyano, el primero, constituido por los depósitos de bloques y cenizas,

donde este sistema poroso-permeable podría ser comparable a aquellos de origen carbonáticos fracturados, mientras que el segundo está representado por las coladas andesíticas que se comportan como un reservorio fisurado.

EXTENDED ABSTRACT

Basic petrophysics of the Precuyano Cycle, Cara Cura hills, Mendoza

In the ninetieth, the discovery of hydrocarbons in volcanic or volcanoclastic rocks was not considered economically viable in the petroleum exploration because of the lack of reservoir quality. However, during last decades many examples from our country proved to be real targets like, Campo Océano, Octógono, Cupén Mahuida (Sruoga *et al.*, 2004; Sruoga and Rubinstein, 2007; Schiuma *et al.*, 2011; Velo *et al.*, 2014). These latter and the need to increase gas/oil production challenged industry to deepen into the knowledge of the pore structure of their deposits.

Volcanic and volcanoclastics deposits can develop porosity in different ways. The more elemental process that lead to the possible formation of porosity takes place once fragments have been ejected from the volcano edifice. As they are deposited mechanically by gravity or fluid transport, porosity results from the degree of sorting of fragments and their type of packaging. After deposition pore space will be modified by diagenetic processes being the more important burial and compactation and cement/clay formation similar to clastics deposits. But unlike typical sedimentary rocks, the nature and style of the eruption and subsequent cooling of these rocks add significant controlling factors over the evolution of the porosity. Some of the most relevant are the alteration of chemically unstable minerals during volcanic processes, the welding of hot material after deposition and fracturing due to cooling. Primary porosity comprises gas voids, vesicles, intergranular pores and some cooling joints; secondary porosity includes intracrystalline dissolution, matrix dissolution pores, fractures, fissures, weathering cracks and interstices. The secondary porosity is frequently the only kind present and may be the result of hydrothermal alteration, fracturing and late-stage

diagenetic mineral alteration.

The main purpose of this contribution is to characterize a volcanoclastic and volcanic sequence of the Precuyano Cycle in the north flank of Sierra de la Cara Cura, Neuquén Basin (Fig. 1). The region holds block and ash flows and lava facies detailed previously by Drosina *et al.* (2017) (Fig. 2, 3). Results of core observation, thin section analysis and scanning electronic microscope (SEM) indicate that the quality of volcanic rock reservoirs is controlled not only by their lithofacies but also by the diagenetic and tectonic processes affecting them. Detailed petrophysical laboratory studies permitted us to additionally arrive to numerical values of the porosity and permeability of the most representative levels of volcanoclastics and volcanic deposits of the Precuyano Cycle.

The volcanoclastics levels are composed of block and ash deposits (Figs 2 and 3). There are poorly sorted, massive mixtures of decimeter- to meter-sized blocks set within a fine lapilli to medium ash-grade matrix; thickness range from 12.50 to 0.95 meters in the SE-NW direction. Primary porosity is controlled by vesiculation in the andesitic pyroclasts and some and scarce columnar jointing. Secondary porosity is represented by micro structures in the andesitic blocks frequently filled-in with iron oxides. Meso-fractures are prevalent and cut through multiple lava flows and block and ash deposits. Another secondary porosity corresponds to crystalloclast dissolution with the consequent intracrystalline and vuggy types porosities (0.004 – 0.62 mm, micropores) (Fig. 4). The effective porosity and permeability to gas, for the sequence varies between 9.7 to 21.46% and 0.288 to 1.339 mD respectively (Table 1 and Fig. 8).

The volcanic levels are composed of abundant tabular andesitic flows facies that are laterally continuous along several kilometers (Figs. 2 and 3). Their thicknesses range from 5.2 to 8.4 meters. Individual lava flows can be divided into base, core and top facies, with lava piles comprising repeated cycles of these distinct facies. The best reservoir

quality concerning primary porosity occurs in andesitic flow tops where vesicular interconnected porosity dominates but significantly decreases to the core of due to compactation and mineral alteration. Secondary porosity results mainly from jointing and fracturing from both tectonic and long-lasting cooling. They cut throughout multiple flows to connect the flow tops (the favorable reservoir) horizons and even with the flow core. Syn- and post-depositional hydrothermal alteration induces a hydraulic local fracture network. Weathering alteration products also fill-in open spaces like dissolution cavities, vesicles, fractures and form mineral aggregates as part of phenocrystal replacement (Figs. 4 and 5). The effective porosity and permeability to gas, for the sequence varies between 8.6 and 19.5%, 0.014 and 0.009 mD with anomalous values of up to 32.182 mD (Table 1 and Fig. 6).

The results obtained herein permit to propose the existence two types of reservoirs in the Precuyano Cycle of the Cara Cura depocenter. One observed in the volcanoclastics deposits that proved to be complex enough to be compare with that observed in fractured carbonate reservoirs and the other is associated with the volcanic deposits. Significant pore reduction was observed in numerous levels results from compactation, tuff welding and mineral alteration, commonly of sericite type, induced by the volcanic process itself and by diagenesis. These latter point to a grade of “uncertainty” when exploring and producing these oil fields due to the resulting lateral and vertical heterogeneities in the texture and structure of the rock bodies that greatly condition the drilling and seismic operations and lately, the production programs.

Keywords: volcanoclastics rocks, porosity, permeability, Precuyano Cycle.

INTRODUCCIÓN

El almacenamiento de fluidos, tales como agua, petróleo o gas, es posible en principio en cualquier tipo de roca, ya sean sedimentarias, metamórficas o ígneas, siempre y cuando desarrollen características físicas que permitan la acumulación y la movilidad de los fluidos a través de ellas. De todos los tipos de rocas anteriormente mencionadas, son las sedimentarias, las que presentan comúnmente las mejores propiedades de porosidad y permeabilidad

para constituirse como rocas reservorios. Sin embargo, son numerosos los yacimientos que producen de rocas volcánicas o piroclásticas que las hacen objetivos importantes a la hora de analizar reservorios, a pesar de presentar características complejas al momento de ser evaluadas (Corbera y Kraemer, 2001; Pángaro *et al.*, 2002; Sruoga *et al.*, 2004; Sruoga y Rubinstein, 2007; Catalano y Rubinstein, 2011; Porras *et al.*, 2011; Schiuma *et al.*, 2011; Drosina *et al.*, 2014; Velo *et al.*, 2014; entre otros).

Las rocas volcánicas y piroclásticas requieren un cabal conocimiento del amplio espectro de mecanismos eruptivos involucrados en su formación y de su evolución diagenética posterior. Las texturas sin-genéticas que hay que considerar resultan de la disposición de los componentes y de los fluidos que contiene el magma y/o el flujo, que debido a sus condiciones físico-químicas puede interactuar con los componentes minerales presentes. Así la vesicularidad producida durante la liberación de los gases y la frecuente alteración del vidrio productos de la migración de dichos fluidos condicionará parte del posible espacio poral resultante (Orton, 1996; Fisher y Schmincke, 1984; Cas y Wright, 1987). Así mismo, el fracturamiento en estas rocas es un rasgo fundamental en la generación de espacio poral. Se produce en el mismo proceso eruptivo como el enfriamiento (fracturas primarias) o posteriormente como resultado de la actividad tectónica (fracturas secundarias) (Petford, 2003) o hidrotermal (Sruoga y Rubinstein, 2007).

Este trabajo tiene como propósito contribuir al conocimiento de los reservorios en rocas volcánicas y piroclásticas del Ciclo Precuyano, del relleno de la Cuenca Neuquina localizados en el sector norte de la Sierras de la Cara Cura (Fig. 1). Para ello se realizaron estudios macroscópico y microscópicos de sus niveles piroclásticos y volcánicos, mientras que se analizaron en el laboratorio parte de las propiedades petrofísicas como la porosidad y permeabilidad.

METODOLOGÍA

Se midieron secciones estratigráficas correspondientes al Ciclo Precuyano y realizó un muestreo sistemático en las quebradas de Los Paredones y el Zorro, en el extremo noroccidental de la Sierra de la Cara Cura, y en las dos quebradas subsiguientes hacia el sector nororiental, las quebradas Morada y sin nombre (Figs. 1, 2, 3). En gabinete fueron descriptas

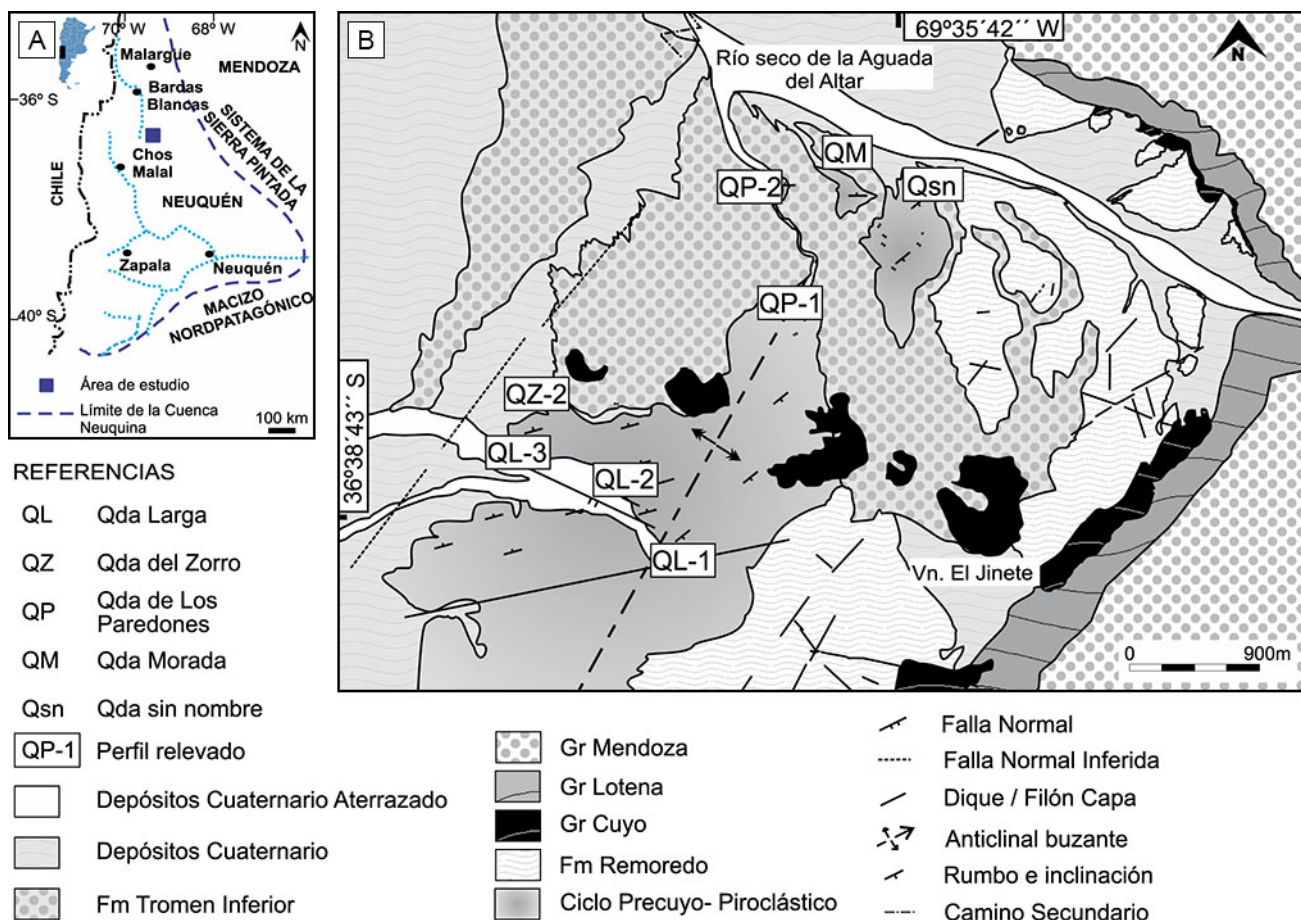


Figura 1. a) Mapa general de la Cuenca Neuquina en donde se observa el área de estudio. b) Mapa geológico del sector norte de la Sierra de la Cara Cura.

Figure 1. a) Map of the Neuquén Basin and its main boundaries, showing the study area. b) Geological map of the Precuyano Cycle in the north flank of Sierra de la Cara Cura.

31 muestras de mano y 24 cortes petrográficos. En este último caso se utilizó un microscopio Schönfeld Optik® del laboratorio de análisis petrofísico del Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA). Para clasificar las rocas piroclásticas se utilizó la propuesta de Fisher y Schmincke (1984), mientras que para las rocas volcánicas se recurrió al diagrama de Winchester y Floyd (1977) en el cual se utilizan los elementos inmóviles (Nb/Y vs Zr/TiO₂), debido a que las rocas se encuentran alteradas. Los estudios de geoquímica fueron realizados en el laboratorio ALS Mineral Division - Mendoza, por fluorescencia de Rayos X y por ICP/MS (inductively coupled plasma-mass spectrometry). Las rocas del área de estudio están especialmente afectadas por distintos procesos de alteración. Se considera alteración a cualquier cambio en la composición mineralógica y en el arreglo textural de una roca originada por

la acción de soluciones acuosas frías o calientes, o gases del sistema (McPhie *et al.*, 1993). En este caso, la asociación de minerales depende no solo de la composición química del vidrio aportado por los fragmentos juveniles, sino de las condiciones físico – químicas del medio (McPhie *et al.*, 1993).

A los efectos de analizar las características petrofísicas referidas a la porosidad y permeabilidad de las rocas volcánicas y piroclásticas del Ciclo Precuyano, se realizaron ensayos de porosidad efectiva y permeabilidad total al Nitrógeno sobre 12 especímenes de afloramiento de niveles que también se han localizado en subsuelo. El estudio de los minerales y texturas se realizó por microscopía óptica. Para poder realizar un análisis estadístico de la porosidad visual, se midieron entre 190-260 puntos por cada corte petrográfico. Para estimar semi-cuantitativamente el contenido de arcillas, se realizó

la difracción de Rayos X (DRX) con un difractómetro de marca Philips, modelo PW 1730/10 perteneciente al Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA). Mientras que para caracterizar su fábrica se utilizó el microscopio de barrido electrónico (SEM), marca Zeiss, modelo SUPRA 40, del Centro de Microscopías Avanzadas, FCEyN-UBA.

En este trabajo para clasificar la porosidad se utilizó la propuesta por Petford (2003) con modificaciones. Dicho autor definió la porosidad primaria en las rocas volcánicas y volcanoclásticas como la resultante del emplazamiento y enfriamiento del magma o fluidos piroclásticos y preservadas en estado sólido. Mientras que la porosidad secundaria correspondería a aquella resultante del clima, alteración hidrotermal, esfuerzos tectónicos y disolución mineral por el pasaje de agua subterránea, ambas porosidades son complementarias y están estrechamente asociadas.

Las mediciones de porosidad efectiva de este trabajo fueron realizadas en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA) utilizando para ello un porosímetro tipo CoreLab, el cual utiliza Helio como gas inerte. Su funcionamiento está basado en la Ley de Boyle, donde un volumen conocido de helio (contenido de referencia) es lentamente presurizado y luego, expandido isotérmicamente en un volumen vacío desconocido. Después de la expansión, la presión de equilibrio resultante estará dada por la magnitud del volumen desconocido; esta presión es medida. La porosidad efectiva es determinada midiendo el volumen de granos y el volumen poroso en una muestra de roca. Con los datos medidos por el equipo se calcula la porosidad expresada en porcentaje. Las mediciones se realizaron a 24°C, en testigos secos de una pulgada de diámetro por 1,5 pulgada de longitud, con una presión de expansión de 100 psi. Mientras que las mediciones de permeabilidad al gas realizadas sobre los mismos testigos, fueron realizadas en los laboratorios de LCV S.R.L., en condiciones estándar. La permeabilidad es una propiedad isotrópica del medio que atraviesa, por lo tanto puede variar en función a la dirección en la cual es medida. En el caso particular de las rocas efusivas y piroclásticas, las permeabilidades son tan pequeñas que pueden considerarse como nulas desde el punto de vista práctico. Sin embargo a través de fracturas y zonas con disolución de fenocristales/cristaloclastos pueden desarrollarse considerables porosidades y permeabilidades (Petford y McCaffrey,

2003). Para poder estimar la profundidad a la que llegó la pila volcano-sedimentaria estudiada en este trabajo, se utilizaron las ecuaciones de variación lineal de temperatura-profundidad, propuestas por Sigismondi (2012), para el gradiente geotérmico de la Cuenca Neuquina:

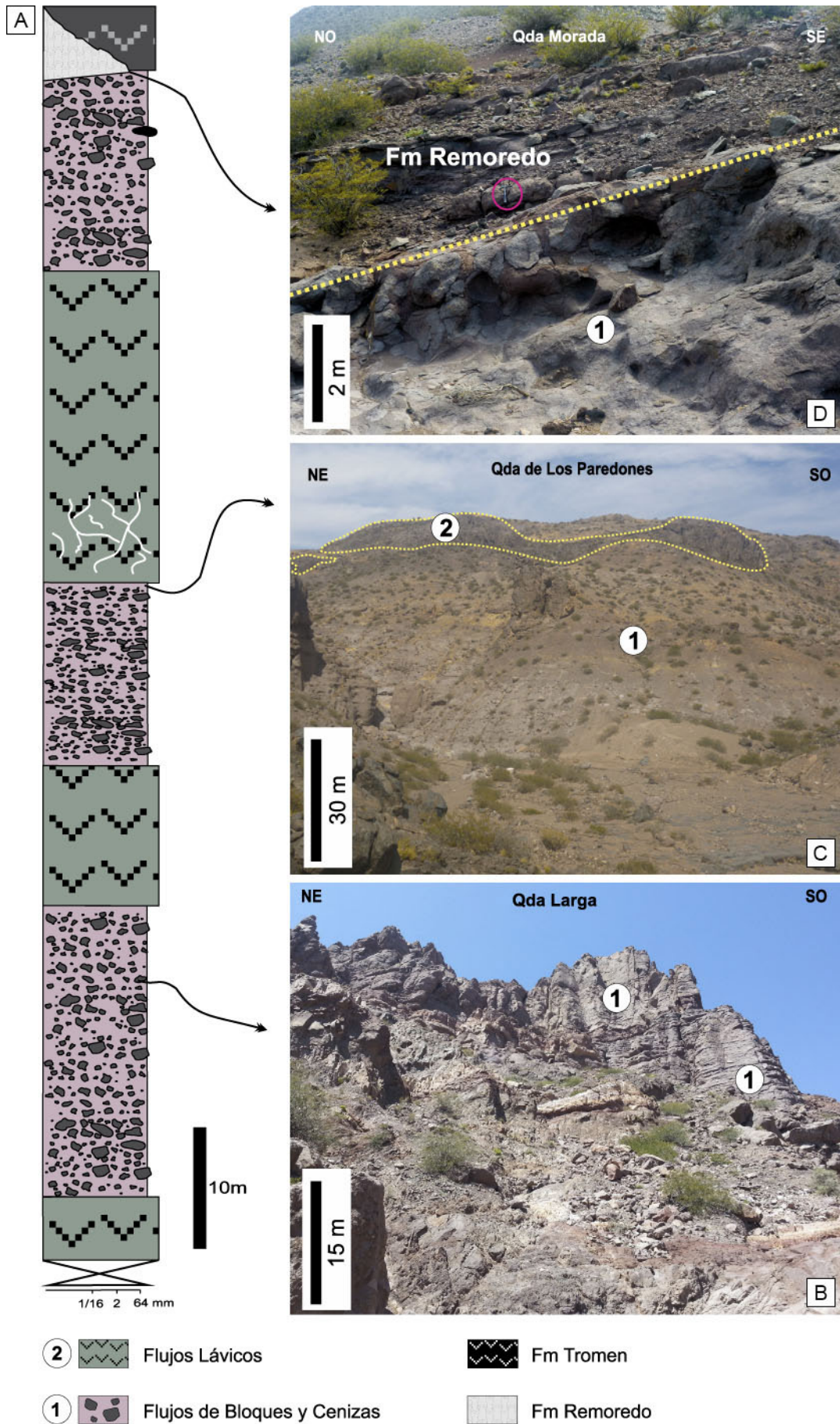
$T: +0,0443 \times Z + 9,5967$ T: temperatura (°C), Z: profundidad (m)

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina (Fig. 1) se ubica en la región centro-oeste de Argentina, entre los 32° y 41° S. Geométricamente, presenta una forma que semeja a un triángulo, con un sector más elongado en dirección nor-noroeste, conocido como sector andino cuya evolución estuvo controlada por la deformación cretácico-cenozoica. Al sur de los 37° S en cambio se extiende hacia el este, en lo que se conoce como engolfamiento. Los depocentros del sector andino, se desarrollaron durante la etapa de extensión mecánica, conformando hemigrábenes de rumbo noroeste hasta nor-noroeste (Vergani *et al.*, 1995; Franzese y Spalletti, 2001; Pángaro *et al.*, 2002; Muravchik *et al.*, 2008; Giambiagi *et al.*, 2009; Barredo y Stinco, 2013; entre otros). Dentro de esta área se encuentra el depocentro de la Sierra de la Cara Cura (Fig.1b).

La etapa inicial de apertura de la Cuenca Neuquina quedó caracterizada por la presencia de sedimentos continentales de ambientes aluviales, fluviales y lacustres con abundante contenido piroclástico agrupados dentro del Ciclo Precuyano (Gulisano *et al.*, 1984), localizados dentro de hemigrábenes extensionales. Además de estas facies, el relleno de estos depocentros se caracteriza por una espesa sucesión de flujos lávicos andesíticos, flujos de densidad piroclásticos, flujos de bloques y cenizas, y en menor proporción depósitos de caída, los cuales alcanzan un espesor mínimo de 700 m. Estos niveles tiene un COT que varía entre 2 y 11%, Romax (%) entre 0,4 y 0,8, HI hasta 900 mgHC/gCOT, SPI de 10 t HC/m², kerógeno tipo I a I/ III y un VKA que sugiere un importante aporte terrestre adicionado a la producción algácea lacustre (Legarreta y Villar, 2011; Barredo y Stinco, 2014).

La edad asignada por Pángaro *et al.* (2004) en base a restos vegetales fósiles hallados la Sierra de la Cara Cura es Jurásica inferior. Por su parte, el estudio realizado por Naipouer *et al.* (2016) sobre dacitas



precuyanas y depósitos de tobas de la Formación Remoredo en la Sierra de la Cara Cura, determinó edades U-Pb SHRIMP para esta última unidad entre 199 ± 2 y 195 ± 1 Ma (Raetiano - Sinemuriano). Por encima de estos depósitos, se dispone una columna Jurásica - Cretácica, que comprende un total de 2.300 metros de sedimentos que abarcan desde el Grupo Cuyo hasta el Grupo Bajada del Agrio (Narciso *et al.*, 2001) (Fig. 1b). Suprayaciendo estos depósitos, se disponen las vulcanitas cenozoicas de la Formación Tromen asociadas a aparatos volcánicos emplazados en la serranía (Narciso *et al.*, 2001) (Fig. 1b).

El área de estudio se localiza en la Sierra de la Cara Cura, ubicada en el frente orogénico de la faja plegada y corrida de Malargüe. Abarca aproximadamente 8 km de ancho por 20 km de largo, con un desnivel topográfico de unos 1000 metros (Fig. 1). El rasgo morfoestructural más destacado corresponde a dos braquianticlinales gemelos asimétricos, de amplitud semejantes entre sí (*sensu* Groeber, 1933). Estas estructuras presentan rumbos N-S a NE-SO, la vergencia es oeste y el limbo frontal es empinado respecto del limbo dorsal más tendido. Su flanco NW presenta inclinaciones de entre 14° y 34° , mientras que el flanco NE tiene inclinaciones mucho más suaves de entre 13° y 17° .

En el sector norte de la Sierra de la Cara Cura afloran 193 metros de una secuencia de rocas volcánicas pertenecientes al Ciclo Precuyano (Fig. 2). La secuencia se encuentra integrada por 108 metros de depósitos de bloques y cenizas, intercalados con flujos lávicos los cuales sumados representan un espesor de 85 metros (Fig. 2). Suprayaciendo a estos depósitos, se localiza una serie de flujos lávicos de composición basáltica pertenecientes a la Formación Trómen (Figs. 2, 3a). En el tramo más oriental del flanco norte de la sierra, sobre los depósitos de bloques y cenizas pertenecientes al Ciclo Precuyano, descansa en forma discordante la sección clástica basal de la Formación Remoredo (Figs. 2, 3b).

CARACTERIZACIÓN DE LOS DEPÓSITOS

Las muestras estudiadas del Ciclo Precuyano comprenden 2 tipos de litofacies. Estas se distinguen por su tipo de roca, estructura, tamaño de grano y consisten en brechas líticas masiva monomíticas y lavas de composición andesítica.

Depósitos volcanoclásticos y volcánicos

Los depósitos de bloques y cenizas comprenden brechas masivas monomíticas matriz sostén, compuestas por líticas volcánicas de composición andesítica de entre 0,17 y 3 m que se encuentran inmersos en una matriz tamaño lapilli fino a grueso que presenta cristaloclastos de plagioclasas (Fig. 4a-b). Se presentan como bancos tabulares que abarcan 3,74 km de largo y con un ancho parcial en el campo de 3,05 km, se encuentran cubiertos por depósitos de la Formación Remoredo, en el sector noroeste de la serranía (Figs. 1, 2d). Los cuerpos presentan espesores que varían entre 12,5 a 0,95 m. La secuencia se encuentra afectada por dos sistemas de fracturas hidráulicas que presentan un azimut de 66° y 301° respectivamente (Figs. 4c-d). Estas fracturas tienen un ancho de entre 1 y 13 cm, están parcialmente rellenas por óxidos de hierro y carbonato de calcio. Se encuentran interconectadas por sectores y presentan óxidos de hierro que se difunden desde el centro de la fractura hacia los bordes, lo que sugiere la presencia de micro-canales por los cuales migraron los fluidos (Figs. 4c-d-h).

Por su parte, los flujos lávicos se presentan como cuerpos tabulares de entre 5,2 y 8,4 m de espesor, alcanzan 5,4 km de largo. Se encuentran cubiertos por depósitos de los basaltos de la Formación Trómen (Figs. 1, 3a-b, 5a). Las facies volcánicas corresponden a lavas andesíticas masivas. Se encuentran afectadas por dos juegos de diaclasas con azimut de 246° y 334° respectivamente (Figs. 5b-c). Este diaclasamiento

Figura 2. a) Columna estratigráfica de la sección superior del Ciclo Precuyano. b) Vista de los afloramientos en el perfil Quebrada Larga (QL-1). c) Intercalación de depósitos de bloques y cenizas y flujos lávicos andesíticos en el sector inferior de la Quebrada de Los Paredones (QP-1). d) Discordancia angular observada en la Quebrada Morada entre los depósitos de flujos y cenizas y la Formación Remoredo. 1- Depósitos de bloques y cenizas. 2- Flujos lávicos andesíticos.

Figure 2. a) Stratigraphic column of the upper section of the Precuyano Cycle. b) View of the outcrops in the Larga Gorge profile (QP-1). c) Intercalation of block and ash deposits and andesitic flows in the lower section of Los Paredones Gorge (QP-1). d) Angular unconformity between the block and ash deposits and the Remoredo Formation in the Morada Gorge. 1- Block and ash deposits. 2- Andesitic Lava Flows.

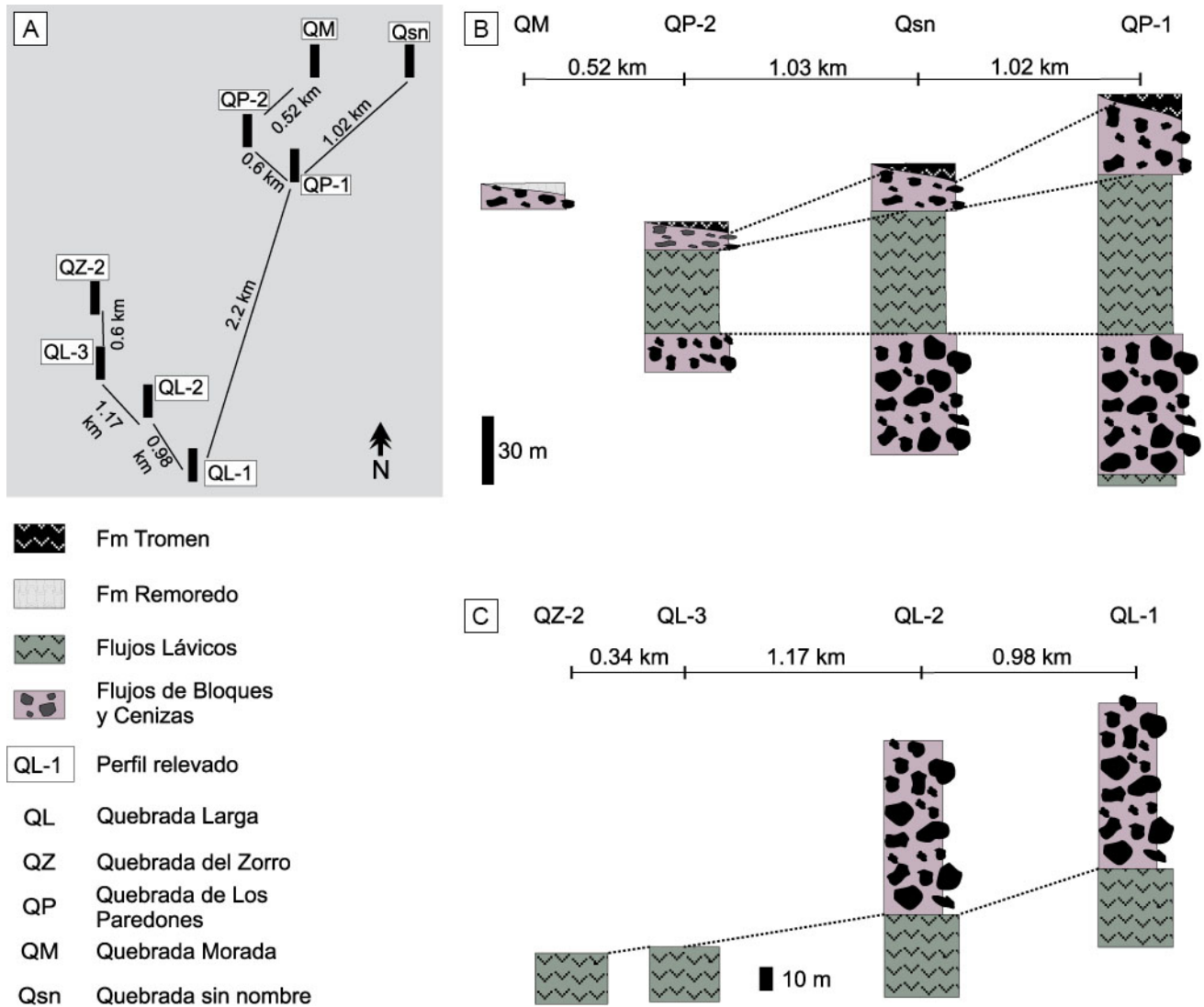


Figura 3. a) Distribución de los perfiles en el área estudiada. b) Secciones relevadas en los arroyos de Los Paredones, Morada y sin nombre. c) Secciones relevadas en los arroyos Larga y del Zorro.
Figure 3. a) Distribution of profiles in the study area. b) Sections recovered in the Los Paredones, Morada and sin nombre creeks. c) Section recovered in Larga and Zorro creeks.

les confiere un aspecto en bloques de entre 8 a 13 cm de ancho por 15 a 35 cm de espesor (Fig. 5b-c), observándose entre 8 y 10 diaclasas verticales por metro lineal, mientras que horizontalmente hay entre 4 y 6 diaclasas (Figs. 5b-c). Las lavas andesíticas fracturadas hidráulicamente (por aguas termales) presentan textura en “rompecabeza” y brechamiento (Fig. 5d). Las fracturas están parcial a totalmente rellenas con sílice e impregnadas con óxidos de hierro, esta impregnación sugiere que los depósitos presentan una red de microfracturas que permitió la difusión de los fluidos hidrotermales (Fig. 5d).

En base a la densidad de vesículas presentes en

los flujos lávicos, estos pueden dividirse en tres secciones: 1- Base, presenta una alta porosidad con una gran cantidad de poros elongados, debido a la sobrecarga que produce el flujo lávico durante su movimiento; 2- Centro, tiende a ser masivo y con ausencia de poros; 3- Techo, es la sección con mayor porosidad del flujo. En este sector, sus poros son esféricos, en esta zona la carga del peso de la lava es menor durante la deposición del flujo.

Porosidad y permeabilidad de los depósitos

En los depósitos de bloques y cenizas, la pro-

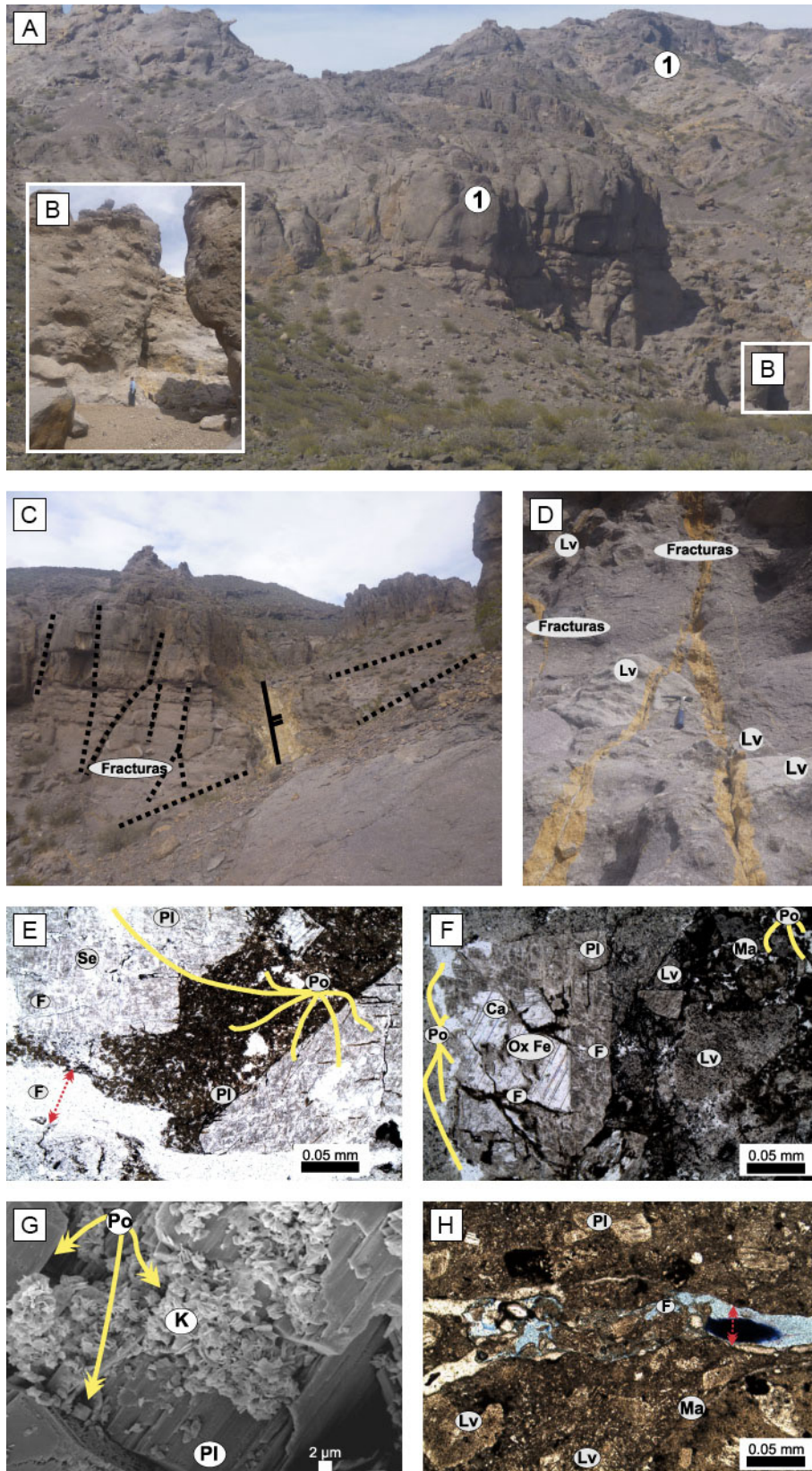


Figura 4. a) Depósitos de bloques y cenizas relevados en la Quebrada de Los Paredones (QP-1). b) Detalle del sector inferior de los afloramientos del perfil QP-1. c) Sistema de juegos de diaclasas con azimut de 66° y 301° respectivamente. Se observa la presencia de una falla directa impregnada de óxidos de hierro. d) Detalle de la relación entre los bloques y la matriz. Los bloques de composición andesítica, se encuentran fracturados. Las fracturas están parcialmente rellenas con sílice y carbonatos, sus bordes se presentan tapizados por óxidos de hierro. e) Roca volcánica en donde los cristaloclastos de plagioclasas se encuentran

parcialmente disueltos y reemplazados por arcillas y carbonatos de calcio, generando porosidad intracristalina. Atravesando todo el corte se observa una fractura abierta de entre 0,016–0,047 mm. f) En esta sección, se observa disolución en los cristaloclastos de plagioclasas y el posterior relleno con carbonatos, así como también microfracturas parcialmente rellenas con óxidos de hierro. La porosidad es de tipo vugular, los poros se encuentran escasamente interconectados por las microfracturas. g) Poros generados por disolución en las plagioclasas parcialmente rellenos con caolinitas. h) En esta sección, la matriz y los líticos volcánicos son atravesados por fracturas parcialmente abiertas (celestes). PL: plagioclasas, Se: sericita; Ca: calcita; Ox Fe: óxido de hierro; F: fracturas, Po: poros, Lv: lítico volcánico, K: caolinitas. 1- Depósitos de bloques y cenizas. 2- Flujos lávicos andesíticos.

Figure 4. a) Block and ash deposits in the Los Paredones Gorge. b) Detail of lower section of the outcrops of QP-1. c) Joint system with azimuth of 66° and 301° respectively. The presence of direct fault impregnated with iron oxides is observed. d) Detail of relationship between the blocks and the matrix. The blocks of andesitic are fractured. The fractures are partially filled with silica, carbonates, and iron oxides. e) Plagioclase crystaloclast with intracrystalline porosity and filled with oxides cutting by an open fracture. f) Plagioclase crystaloclast with intracrystalline and vuggy porosity and filled with calcite and oxides. g) Phenocrystals with intracrystalline porosity filling with kaolinite. f) Opened fracture porosity cuts through the matrix (light-blue). PL: plagioclase, Se: sericite; Ca: calcite; Ox de Fe: iron oxide; Px: piroxene, Fr: fractures, Po: porous, Lv: volcanic clasts, K: kaolinite. 1- Block and ash deposits. 2- Andesitic Lava Flows.

sidad observada al microscopio es pobre, menor al 7 %. La porosidad primaria presente en los litoclastos andesíticos es de tipo vesicular. Los cristaloclastos inmersos en la matriz, presentan porosidad secundaria de tipo intracristalina (Fig. 4e) y vugular (Fig. 4f), generando un espacio poral de entre 0,004 – 0,62 mm (microporos) en los mismos (Figs. 4e-h), por su parte en los litoclastos se observa porosidad intragranular. Se observa la presencia de microfracturas irregulares de entre 0,016 – 0,047 mm (Figs. 4e, f, h). La matriz presenta abundante material intersticial desvitrificado generando porosidad intergranular, con material arcilloso (esmectita y caolinita) e impregnaciones de óxidos de hierro (Figs. 4e-g). Estos óxidos habrían posibilitado la oclusión parcial del espacio poral primario.

El porcentaje de la porosidad efectiva en las brechas masivas monomícticas en roca total varía entre 9,1 y 21,46%. En cuanto a la permeabilidad relativa al gas varía entre 0,288 y 1,339 mD. Dentro de los parámetros medidos en los líticos andesíticos, se incluyen la porosidad efectiva, que varía entre 8,21 y 11,3%, y la permeabilidad relativa al gas que varía entre 0,007 y 0,011mD. La relación porosidad-permeabilidad presenta una correlación alta, con un R^2 de 0,8911 (Tabla 1, Fig. 6). En base a 13 observaciones se estima que el 20% corresponde a porosidad primaria y el 80% restante a secundaria.

Por su parte en las rocas volcánicas, la porosidad primaria está representada por disyunciones columnares (Fig. 5e) y vesículas (Fig. 5f), total o parcialmente rellenas con minerales secundarios como arcillas (esmectitas). Las vesículas tienen entre 0,01 – 0,03 mm de longitud lo que da lugar a microporos que

se presentan parcialmente conectados. La porosidad secundaria de estas muestras resulta de la disolución total o parcial de fenocristales de plagioclasas (Fig. 5g-h), de piroxenos (Fig. 5h-i) y pasta.

Las microfracturas tectónicas observadas, miden de 0,01 a 0,03 mm (microporos) y se encuentran parcialmente rellenas con óxidos de hierro (Fig. 5i). Se han reconocido fracturas resultantes de esfuerzos tectónicos en la base y el tope de los flujos lávicos respectivamente. La mayoría se presentan conectadas, y por sectores esto genera que las vesículas se unan entre sí, lo que favorece el desarrollo de una porosidad efectiva alta. En el caso de las fracturas de escala macroscópica se considera que fueron originadas por procesos hidrotermales observadas en afloramiento, presentan un ancho de hasta 4,5 cm de espesor, se encuentran parcialmente rellenas por carbonato de calcio y sílice, lo que oblitera en forma parcial el espacio poral abierto; además se encuentran tapizadas de óxidos e hidróxidos de hierro. El proceso de oxidación posterior está distribuido en toda el área de alteración, dando lugar a una limonitización que conforma vetillas e impregnaciones. Al igual que las microfracturas, estas discontinuidades también conectan vesículas. La porosidad efectiva arroja valores que varían entre 8,6 y 19,6%. En cuanto a la permeabilidad relativa al gas el rango oscila entre 0,009 y 32,182 mD (Tabla 1, Fig. 6). La distribución de los poros es heterogénea, y se observa tanto porosidad del tipo primaria como secundaria. La relación porosidad-permeabilidad presenta una correlación moderada, con un R^2 de 0,5283. Para realizar esta correlación se ha descartado el punto

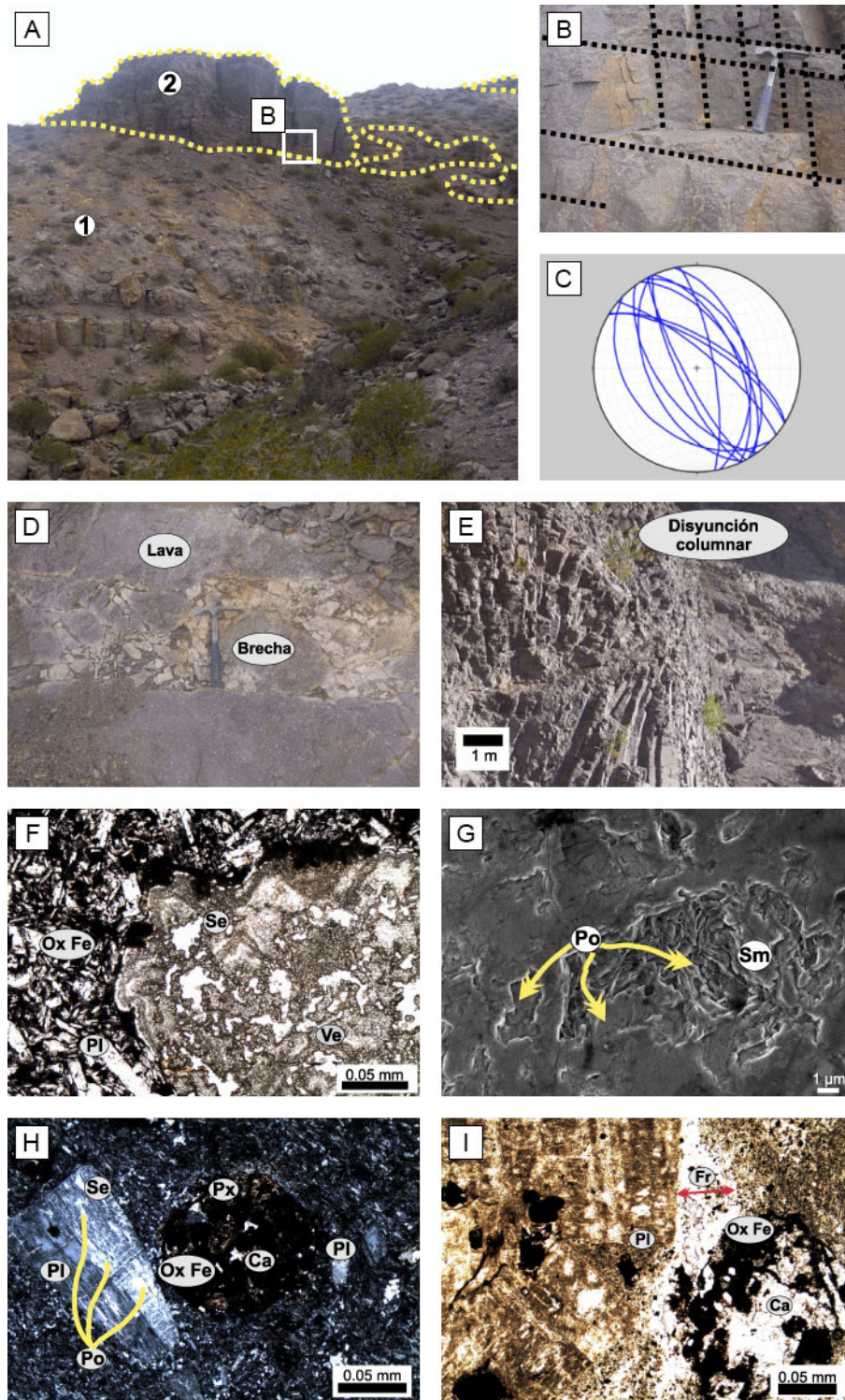


Figura 5. a) Flujos lávicos (en amarillo) intercalados entre depósitos de bloques y cenizas. b) Detalle del tamaño de los bloques producidos por los sistemas de diaclasas. c) Datos cinemáticos relevados en el sector noroeste de la Sierra de la Cara Cura. Graficados con el programa Stereonet® de Richard Allmendinger. d) Brechas en lavas andesíticas fracturadas hidráulicamente. e) Disyunción columnar en coladas andesíticas. f) Porosidad primaria de tipo vesicular. Las vesículas están parcialmente rellena de Sericita. g) Poros generados por disolución en fenocristales de plagioclasas. Los mismos se encuentran limpios y/o parcialmente relleno con esmectitas. h) Roca volcánica en donde los fenocristales de plagioclasas y piroxenos se encuentran parcialmente disueltos y reemplazados, generando porosidad intracristalina. i) En esta sección, se observa disolución en los fenocristales de plagioclasas y piroxenos, así como también microfracturas parcialmente rellenas. PL: plagioclasas, Se: sericita; Ca: calcita; Ox de Fe: óxido de hierro; Px: piroxeno, Fr: fracturas, Po: poros, Sm: esmectitas, Ve: vesícula. Martillo de escala: 28

cm. 1- Depósitos de bloques y cenizas. 2- Flujos lávicos andesíticos.

Figure 5. a) Lavas flows (in yellow) intercalated with block and ash deposits. b) Detail of the size of the blocks produced by joint systems. c) Kinematic data obtained in the Northwest sector of the Cara Cura Hills. Plotted with Richard Allmendinger Stereonet® program. d) Breccia flow with fractures filled with subangular clasts of andesitic e) Columnar jointing in a tabular flow. f) Primary porosity of vesicular type. The vesicles are partially filled with a brownish sericite. g) The intracrystalline pores were formed by dissolution of phenocrystals. The micropores are partially filled with greenish smectite. h) Plagioclase phenocrystal with intracrystalline porosity. i) In this section, dissolution is observed in the phenocrystals of plagioclases and piroxenes, partially filled, microfractures are also observed. Fracture porosity cuts through the groundmass. PL: plagioclase, Se: sericite; Ca: calcite; Ox de Fe: iron oxide; Px: piroxene, Fr: fractures, Po: porous, Sm: esmectite, Ve: vesicles. Hammer scale: 28 cm. 1- Block and ash deposits. 2- Andesitic Lava Flows.

enmarcado en un círculo verde en la figura 6, debido a que esta muestra se encuentra fracturada. El 30% de la porosidad observada corresponde a porosidad primaria y el 70% restante a secundaria. En base a las 11 observaciones realizadas se estima que predomina la porosidad secundaria sobre la primaria en una relación 70-80% y 30-20% para los depósitos volcánicos y piroclásticos respectivamente.

Arcillas de los depósitos

Los minerales arcillosos estudiados en los depósitos de Ciclo Precuyano consisten en caolinitas, esmectitas en su mayoría. El interstratificado I/S se encuentra de manera subordinada, en las muestras estudiadas (Tabla 2). Las caolinitas y esmectitas, se encuentran como relleno de poros o como reemplazo de granos/cristales en las rocas estudiadas. Los cristaloclastos y fenocristales de los depósitos analizados son reemplazados principalmente por arcillas que ópticamente aparecen como masas castañas-verdosas que corresponden a caolinitas y esmectitas. Las caolinitas se presentan como un mineral de aspecto terroso, cuya proporción se presenta en la tabla 2 (Fig. 4g). Este mineral se halla como reemplazo de cristaloclastos/fenocristales de plagioclasas y como relleno de poros. Por otro lado, las esmectitas presentan una proporción menor que las caolinitas (Tabla 2, Fig. 5g). Este mineral se presenta como relleno de poros, y bordeando los cristales y cristaloclastos en forma de *coating*.

DISCUSIÓN

El reconocimiento de facies volcánicas “proximales” y “distales” y su contexto estructural es la clave para la prognosis de la distribución areal de estos reservorios y para la configuración de las potenciales

trampas. En ese sentido y sobre la metodología utilizada se ha comprobado la presencia de facies generadas como resultado del colapso gravitacional no explosivo de un domo (*sensu* Branney y Kokelaar, 2002) y/o de un flujo lávico (*sensu* Cas y Wright, 1987; Mc Phie *et al.*, 1993; Schwarzkopf *et al.*, 2005; Németh y Martin, 2007).

Respecto a la extensión de los reservorios asociados a depósitos de bloques y cenizas, se midieron espesores entre 61-108 metros (Fig. 2, 3), los cuales abarcan 3,74 km de largo y con un ancho parcial en el campo de 3,05 km. Los depósitos en general conforman un restringido halo de dispersión a partir de los conductos volcánicos, y la presencia de secuencias espesas (menores a los 100 m) monótonas, indicando posiciones medio-proximales de los depósitos.

La porosidad primaria en las rocas piroclásticas está representada por porosidad tipo vesicular. Cuando los flujos piroclásticos de densidad son eyectados en la superficie, se comienzan a formar los primeros poros por escape de volátiles hacia la atmósfera. La porosidad vesicular observada es resultado de la exsolución de volátiles magmáticos durante el enfriamiento (Petford, 2003; Sruoga *et al.*, 2004).

Por su parte la porosidad primaria de las rocas volcánicas está representada por la presencia de disyunciones columnares (Fig. 5e) y vesículas (Fig. 5f). Las vesículas son abundantes en los sectores superiores e inferiores de los cuerpos lávicos. En ambos tipos de depósitos, la porosidad primaria vesicular sugiere que el contenido de volátiles en el magma, tendría una gran influencia, la vesicularidad depende del contenido de volátiles y de la velocidad de enfriamiento (Hon *et al.*, 1994; Cashman y Kauahikaua, 1997).

Por otro lado, la fracturación por contracción térmica observada en las rocas volcánicas es el

Asociación de facies	Observación	Porosidad (%)	Permeabilidad (mD)
Coladas lávicas andesíticas	Macisa	8.60	0.009
	Diaclasas	12.20	0.014
	Fracturas abiertas	19.60	32.182
Flujo de Bloques y Cenizas	Matriz	9,7 - 21,46	0,288 - 1,339
	Clastos	8,21 - 11,30	0,007 - 0,011

Tabla 1. Datos de porosidad y permeabilidad del Ciclo Precuyano en las muestras analizadas.

Table 1. Porosity and permeability data of the Precuyano Cycle in the analyzed samples.

resultado del emplazamiento del magma y rápido enfriamiento (*sensu* Komatsu *et al.*, 1983; McPhie *et al.*, 1993). Este proceso generó disyunciones columnares en las unidades estudiadas como las que se observan en la figura 5e, sin embargo en la base de las coladas, y por encontrarse contra el substrato, las estructuras se encuentran menos desarrolladas, debido a la menor transferencia de calor.

En todos los depósitos domina la porosidad secundaria, principalmente del tipo fractura y en menor medida intracristalina por disolución selectiva de fenocristales/cristaloclastos. Los poros inmersos en los cristales en su mayoría se encuentran aislados conduciendo a bajas permeabilidades. Mientras que los sectores con porosidad vugular presentan una baja conexión entre sus poros. En las rocas piroclásticas, la porosidad secundaria es similar a la observada en las rocas volcánicas, aunque en una proporción mayor como se observa en la Tabla 1.

Se han diferenciado fracturas asociadas con la actividad hidrotermal y otras de origen tectónico. Las primeras presentan texturas drusoide, en “rompecabeza” y brechamiento, así mismo desarrollan una alteración de tipo no penetrativa. Este tipo de discontinuidades se generan por el pasaje de soluciones a altas temperaturas (*e.g.* Mc Phie *et al.*, 1993; Gifkins y Allen, 2001; Gifkins *et al.*, 2005; Srouga y Rubinstein, 2007). Por su parte las fracturas de origen tectónico corresponden a deformación mecánica, presentan planos netos, sin relleno de materiales de alteración, donde se reconocen indicadores cinemáticos (Fig. 5c).

En ambos tipos de depósitos, la porosidad secundaria, se vio afectada por la actividad hidrotermal, en donde los cristaloclastos y las plagioclasas de composición intermedia, fueron alterados a caolini-

ta, y sericitas. La alteración así resultante relleno los espacios porales, reduciendo significativamente la permeabilidad de los depósitos. Como consecuencia de estos fluidos hidrotermales, las fracturas incrementaron su tamaño, de pocos mm hasta 4,5 cm y la frecuencia (entre 4 y 7 fracturas por metro lineal), generando una red de fracturas que interconectan a las distintas litologías. Este tipo de fracturas, generan brechamiento y texturas de tipo rompecabezas como las observadas en los flujos lávicos andesíticos. Las mismas atraviesan subverticalmente a los afloramientos estudiados, tienen un ancho de entre 0,01 mm y 4,5 cm, se hallan parcialmente rellenas con sílice e impregnadas con óxidos de hierro, generando costras de óxidos. En el caso de los flujos de bloques y cenizas, la intensidad del fracturamiento es menor a la observada en las lavas. Esta circulación de fluidos restringe el espacio poral secundario abierto durante la fracturación y conecta en algunos sectores vesículas aisladas generando canales de migración. El tipo de alteración hidrotermal observada en la serranía, ha sido mencionado como una propiedad intrínseca en unidades de litología semejante que actúan como roca reservorio en el subsuelo de la Cuenca Neuquina (Pángaro *et al.*, 2002, D’Elia y Franceze, 2005; Schiuma y Llambias, 2008; Drosina *et al.*, 2017). Es importante destacar la presencia de evidencias de una actividad hidrotermal en las rocas que infra/suprayacen a la secuencia estudiada.

La fracturación tectónica ha sido mencionada como un control importante en el desarrollo de los reservorios ignimbríticos del subsuelo en el Ciclo Precuyano (Pángaro *et al.*, 2002; Sissini *et al.*, 2011). Los flujos lávicos del Ciclo Precuyano, presentan hasta 10 fracturas en sentido vertical y hasta 6 fracturas horizontales por metro lineal (Fig. 5c). Esta densidad

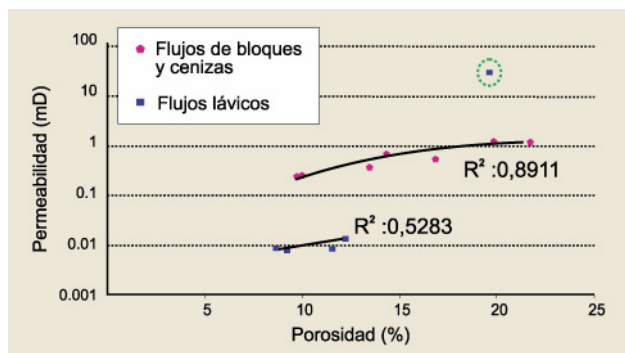


Figura 6. Gráfico de porosidad *versus* permeabilidad en los depósitos de Ciclo Precuyano estudiados en este caso de estudio. El punto anómalo de permeabilidad en las lavas, se debe que el testigo se encuentra fracturado, con fracturas abiertas. Las fracturas son productos de la contracción térmica sufrida.

Figure 6. Correlation of porosity and permeability of volcanoclastics and lavas of the Precuyano Cycle. The anomalous point of permeability in the lava is because the plugs is fractured, with opened fractures. The fractures are products of the thermal long-suffering contraction.

de fracturas tiene la potencialidad de conectar poros aislados en una colada, así como conectar flujos que se encuentran apilados verticalmente entre sí. En el área de estudio, se observan fracturas que conectan distintas litologías como lavas y flujos de bloques y cenizas. Por su parte, la mineralización a lo largo de los planos de fracturas, implica que estas funcionaron como vías de migración. La circulación de fluidos hidrotermales ocluyó parcialmente el espacio poral abierto por la precipitación de minerales como arcillas y carbonatos. Con respecto a los valores obtenidos en el laboratorio de la porosidad efectiva, hay que considerar que las fracturas medidas corresponden a las de micro-escala.

Observaciones análogas a las realizadas en este estudio fueron obtenidas por Catalano y Rubinstein (2011), en el ámbito de la Dorsal de Huincul en estudios realizados en rocas pertenecientes al Ciclo Precuyano. Estos autores observan que en las litofacies piroclásticas, fueron el grado de soldadura y la vesiculación los principales controles de la porosidad, mientras que para las andesitas brechadas, fueron la vesiculación y el brechamiento hidrotermal. Según estos mismos autores, las dos litofacies no han generado buena porosidad efectiva, presentando una alteración de origen hidrotermal para las andesitas brechadas. Mientras que para

Pángaro *et al.* (2002), en estudios realizados en el Yacimiento 25 de Mayo-Medanito SE, la porosidad es generada a partir de eventos de disolución de granos y en menor proporción de cementos previos. Se considera que la secuencia estudiada presenta un doble sistema de porosidad dada por los aportes de la matriz y de las fracturas. Estas observaciones son coherentes con las obtenidas por Pángaro *et al.* (2002) y Zubiri y Silvestro (2007), en las área del Yacimiento 25 de Mayo-Medanito SE y Cupen Mahuida respectivamente en rocas volcánicas y en depósitos de flujos piroclásticos pertenecientes al Ciclo Precuyano.

Las porosidades y permeabilidades estudiadas se vieron afectadas por la presencia de minerales autigénicos arcillosos, cementos carbonáticos y por la circulación de fluidos calientes en las fracturas abiertas. La caolinita tiende a reducir el espacio intergranular (Wilson y Pittman, 1977) pero también pueden actuar como “filtro” de material más fino dentro del sistema poral lo que asegura que el poro no quede totalmente obliterado. Por su parte, las esmectitas pueden producir un efecto perjudicial en el espacio poral, debido a que ellas presentan nanoporosidad que muchas veces está aislada (porosidad intracristalina) pero además y en presencia de agua pueden expandirse llegando a ocluir los espacios porales. Estos minerales obliteran casi por completo la porosidad primaria y en menor grado la porosidad secundaria. Mientras que los cementos carbonáticos forman un producto diagenéticos significativo en algunas muestras del Ciclo Precuyano (Pángaro *et al.*, 2002, D’Elia y Franzese, 2005; Drosina *et al.*, 2017). Estos cementos afectan en su mayoría a la porosidad secundaria, rellenan los poros generados por disolución (intracristalina y vugular) y parcialmente las fracturas abiertas.

En cuanto a la profundidad de soterramiento calculado en este estudio utilizando la ecuación de Sigismondi (2012) y sobre la base de las arcillas presentes, se estima comprendida entre 2,05 y 2,95 km para la columna estudiada. A estas profundidades, las rocas preservaron sus texturas originales e incrementaron los valores de porosidad y permeabilidad por la existencia de las fracturas presentes. No obstante las presiones de confinamiento a estas profundidades, darían lugar a una reducción de los espacios porales y cierre de fracturas y diaclasas, esta disminución en la doble porosidad efectiva, conlleva como resultado al ló-

Litofacies	Muestras	Minerales de Arcillas	Esmenctita	Caolinita	I/S
Rocas volcánicas	L-2	0%	0	0	0
	L-7	30%	36	64	Traza
	L-15	17%	23	77	Traza
Rocas Piroclásticas	BA-5	26%	41	59	0
	BA-9	21%	11	89	Traza
	BA-13	14%	49	51	Traza

Tabla 2. Abundancia semicuantitativa de minerales arcillosos en las muestras analizadas del Ciclo Precuyano. Muestras L2 y BA5 provienen del perfil QL1; Muestras L7 y BA9 provienen del perfil QP1; Muestras L15 y BA13 provienen del perfil QP2. Localidades según Figura 1.

Table 2. Semiquantitative abundance of clay minerals in the analysed samples of the Precuyano Cycle. Samples L2 and BA5 are from QL1 section; Samples L7 and BA9 are from QP1 section; Samples L15 and BA13 are from QP2 section. Localities as Figure 1.

gico descenso de la permeabilidad. Sin embargo, este efecto se ve contrarrestado por la apertura de fracturas dispuestas en forma perpendicular al esfuerzo horizontal mínimo. Así mismo, la presencia de rellenos minerales puede favorecer o desfavorecer la circulación de fluidos según la forma y cantidad en que se dispongan dentro de ellas.

Los depósitos de bloques y cenizas, se consideran como los reservorios potencialmente más importantes, y están caracterizados por porosidad secundaria principalmente. La combinación de microporosidad, alteración hidrotermal, disolución de componentes, hacen de este sistema poroso-permeable resultante un reservorio complejo. El segundo tipo de reservorio está representado por las coladas andesíticas, que combina la porosidad primaria original con la porosidad secundaria asociada a las microfracturación y disolución. En el caso de estudio, las fracturas permiten que rocas impermeables, como los flujos lávicos, puedan tener vías de migración de fluidos, y comportarse de esta manera como un reservorio fisurados. Finalmente, la heterogeneidad morfológica y conectividad de los poros, así como también al grado de fracturamiento presente en las facies piroclásticas y lávicas, hacen posible comparar a estos potenciales reservorios del precuyano con aquellos de origen carbonáticos fracturados y fisurados respectivamente.

CONCLUSIONES

La metodología de caracterización petrofísica en base a estudios macroscópicos y microscópicos de sus componentes en los niveles piroclásticos y volcánicos, conjuntamente con el análisis de laboratorio de las propiedades petrofísicas como la porosidad y permeabilidad, permite concluir que las facies piroclásticas asociadas a los flujos de bloques y cenizas presentan las mejores propiedades de reservorio en este ambiente.

La porosidad total observada al microscopio es pobre. Las mayores porosidades efectivas y permeabilidades al gas se observan en los depósitos volcaniclasticos, mientras que en los depósitos lávicos presentan porosidades efectivas similares, aunque permeabilidades muy inferiores.

El tamaño poral, observados al microscopio, varía de microporo a mesoporo. Siendo el primero el más relevante.

Se propone para el Ciclo Precuyano que la porosidad que predomina para las rocas piroclásticas y volcánicas es del tipo secundaria, generada por microfracturación y por la disolución de componentes. La porosidad primaria está representada por vesículas y disyunciones columnares.

Los parámetros petrofísicos estudiados, dependen de procesos inherentes al volcanismo, como el

contenido de volátiles en el magma, el cual tendría una mayor influencia en la porosidad. Conjuntamente con la velocidad de enfriamiento que controla la formación de fracturas por contracción térmica (disyunción columnar), tendría una influencia mayor en la generación de porosidad primaria.

La permeabilidad es originada por las fracturas por contracción térmica observadas en los flujos lávicos, o asociadas a fracturamiento de tipo hidrotermal o tectónico en los depósitos de bloques y cenizas.

En este trabajo se propone la existencia de dos tipos de reservorios. El primero, constituido por los depósitos de bloques y cenizas, donde este sistema poroso-permeable podría ser comparable a aquellos de origen carbonáticos fracturados. Mientras que el segundo tipo de reservorio está representado por las coladas andesíticas, que combina la porosidad primaria original con la porosidad secundaria asociada a las microfacturación y disolución, comportándose de esta manera como un reservorio fisurado.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con fondos ITBACyT 2012-2014 del Instituto Tecnológico de Buenos Aires. M.D. quiere agradecer a los revisores de este manuscrito, el Dr. Richiano (ed.), la Dra. Sruoga, el Dr. Limarino, y a un revisor anónimo, los cuales han enriquecido este trabajo con sus sugerencias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barredo, S.** y **L. Stinco**, 2013. A Geodynamic View of Oil and Gas Resources Associated to the Unconventional Shale Reservoirs of Argentina. *Unconventional Resources Technology Conference (URTEC)*. American Association of Petroleum Geologists, Estados Unidos.
- Barredo, S.** y **L. Stinco**, 2014. Unconventional reservoir geology of the Neuquén Basin, Argentina. *Society of Petroleum Engineer Annual Technical Conference and Exhibition SPE-170905-MS*, 1-11.
- Branney, M.** y **B. Kokelaar**, 2002. *Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites*. Geological Society, London. *Memoirs* 27, 152 pp.
- Cas, R.** y **J. Wright**, 1987. *Volcanic Successions: Modern and Ancient*. Chapman and Hall, London, 528 pp.
- Catalano, J.** y **N. Rubinstein**, 2011. Procesos geológicos vinculados a la generación de porosidad en rocas volcánicas del precuyano, Cuenca Neuquina, Argentina. *XVIII Congreso Geológico Argentino Abstract*: S11, Neuquén.
- Corbera, R.** y **P. Kraemer**, 2001. Aplicación de Sísmica 3D en un Reservorio no Convencional de Rocas Ignimbríticas. Cuenca Neuquina, Argentina, *EXITEP Exposición Internacional de Tecnología Petrolera Actas* 1-14, D.F. México.
- Cashman, K.** y **J. Kauahikaua**, 1997. Reevaluation of vesicle distributions in basaltic lava flows. *Geology* 25:419-422.
- D'Elia, L.** y **J. Franzese**, 2005. Caracterización litológica y estructural de ignimbritas precuyanas en la sierra de Chacaico, Neuquén, con énfasis en su potencial petrolero. *VI Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, Actas en CD. Mar del Plata.
- Drosina, M., S. Barredo, A. Sosa Massaso y F. Bergese**, 2014. Porosidad en rocas volcánicas. Un caso de estudio el Ciclo Precuyano. En D. Astesiano, E. Breda, A. Montagna, J. Paris, y D. Pérez (Eds.), *Simposio de Evaluación de Formaciones de Archie a los No Convencionales*. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos: 375-398.
- Drosina, M., S. Barredo, A. Martínez y L. Giambiagi**, 2017. Facies volcanoclásticas del Ciclo Precuyano en el sector norte de la Sierra de la Cara Cura, Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74 (2): 179-190.
- Fisher, R.** y **H. Schmincke**, 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer-Verlag, Berlín, 472 pp.
- Franzese, J.** y **L. Spalletti**, 2001. Late Triassic-early Jurassic continental extension in southwestern Gondwana: tectonic segmentation and pre-break-up rifting. *Journal of South American Earth Sciences* 14: 257-270.
- Giambiagi, L., M. Tunik, S. Barredo, F. Bechis, M. Ghiglione, P. Alvarez y M. Drosina**, 2009. Cinemática de la apertura del sector norte de la Cuenca Neuquina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (2):278-282.
- Gifkins, C.** y **R. Allen**, 2001. Textural and chemical characteristics of diagenetic and hydrothermal alteration in glassy volcanic rocks - examples from the Mount Read Volcanics, Tasmania. *Economic Geology* 96: 973-1002.
- Gifkins, C., W. Herrmann y R. Large**, 2005. *Altered Volcanic Rocks: A guide to description and interpretation*. CODES, University of Tasmania, 275 pp.
- Groeber, P.**, 1933. Descripción de la Hoja 31 c "Confluencia de los ríos Grande y Barrancas". *Boletín de la Dirección de Minas y Geología*, 72pp.
- Gulisano, C., A. Gutiérrez Pleimling y R. Digregorio**, 1984. Esquema estratigráfico de la secuencia jurásica del oeste de la provincia del Neuquén. *IX Congreso Geológico Argentino Actas I*: 236-259, San Carlos de Bariloche.
- Hon, K., J. Kauahikaua, R. Denlinger y K. McKay**, 1994. Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii. *Geological Society of America Bulletin* 106: 351-370.
- Komatsu, N., Y. Fujita y O. Sato**, 1983. Cenozoic volcanic rocks as potential hydrocarbon reservoirs. *XI World Petroleum Congress* 2:411-420.
- Legarreta, L.** y **H. Villar**, 2011. Las facies generadoras de hidrocarburos de la Cuenca Neuquina. *Petrotecnia* 14-39.
- Mc Phie, J., M. Doyle y R. Allen**, 1993. *Volcanic textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Centre for Ore Deposits and Exploration Studies, University of Tasmania, 198 pp.
- Muravchik, M., L. D' Elia, A. Bilmes y J. Franzese**, 2008. Caracterización de los depocentros de rift (Ciclo Precuyano) aflorantes en el sector sudoccidental de la Cuenca Neuquina, Argentina. *VII Congreso de Exploración y desarrollo de Hidrocarburos Trabajos Técnicos*: 457-470.
- Naipouer, M., L. Fennell, A. Folguera, M. Pimentel y V. Ramos**, 2016. Edades U-Pb SHRIMP de volcanitas del Ciclo Precuyano: controles temporales en la extensión del depocentro Cara

- Cura-Reyes (36°30'ls), norte de la Cuenca Neuquina. *I Simposio de Tectónica Sudamericana* Abstract: 32.
- Narciso, F., G. Santa María y J. Zanettini**, 2001. Hoja Geológica 3769-I Barrancas (Provincia de Mendoza). *Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina* 1:250.000.
- Németh, K. y U. Martin**, 2007. *Practical Volcanology. Lecture notes for understanding volcanic rocks from field based studies*. Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary 27: 221 pp.
- Orton, G.**, 1996. Volcanic environments. En H. Reading, (Ed.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy Reading*. Blackwell Science, Oxford, 485-567.
- Pángaro, F., R. Corbera, O. Carbone y G. Hinterwimmer**, 2002. Los reservorios del Precuyano. En: M. Schiuma, G. Hinterwimmer, y G. Vergani, (Eds.). *Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas Argentinas*. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Trabajos Técnicos: 229-254, Buenos Aires.
- Pángaro, F., M. Pereira y M. Giorgetti**, 2004. Relevamiento Geológico del Precuyano en las Sierras de Reyes y Cara Cura, Provincia de Mendoza, Argentina. Repsol-YPF, (informe inédito), 22 p., Buenos Aires.
- Petford, N.**, 2003. Controls on primary and permeability development in igneous rocks. En: N. Petford, y K. McCafrey, (Eds.), *Hydrocarbons in Crystalline Rocks*. Geological Society, London, Special Publications 214:93-107.
- Petford, N. y K. McCaffrey**, 2003. Hydrocarbons in crystalline rocks. En: N. Petford, y K. McCafrey, (Eds.), *Hydrocarbons in Crystalline Rocks*. Geological Society, London, Special Publications 214:1-5.
- Porras, J., M. Agüerra, A. Pérez, F. Pagán y H. Belotti**, 2011. Caracterización geológica y potencial petrolífero de los Cuerpos Ígneos intrusivos de la Cuenca Austral, Argentina. *VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos* Trabajos Técnicos: 519-548. Mar del Plata.
- Schiuma, M. y E. Llambías**, 2008. New ages and chemical analysis on Lower Jurassic volcanism close to the Huincul High, Neuquén. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63 (4): 644-652.
- Schiuma, M., E. Rodríguez, L. Tórtora y E. Llambías**, 2011. Depósitos de origen volcánico en el Yacimiento Cupén Mahuida, Cuenca Neuquina Argentina. *VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*. Trabajos Técnicos: 147-167, Mar del Plata.
- Schwarzkopf, L., H. Schmincke y S. Cronin**, 2005. A conceptual model for block and ash flow basal avalanche transport and deposition, based on deposit architecture of 1998 and 1994 Merapi flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 129:117-134.
- Sigismondi, M.**, 2012. *Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura termal, datos de gravedad y sísmica de reflexión*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, 381 pp. (inédita).
- Sissini, V., S. López y M. Lavia**, 2011. Yacimientos de gas no convencionales en el Ciclo Precuyano y en el basamento en el área de la Dorsal de Huincul en la Cuenca Neuquina. *VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos* Trabajos Técnicos: 693-710.
- Sruoga, P. y N. Rubinstetin**, 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoir from the Austral and Neuquén basins, Argentina. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin* 91(1):115-129.
- Sruoga, P., N. Rubinstetin y G. Hinterwimmer**, 2004. Porosity and Permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobífera, South Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 132, 31-43.
- Velo, D., R. Manceda, F. Creus, R. Ugarte, D. Narrillos, L. Ciancio, O. Pioli y M. Mallaviabarrena**, 2014. Caracterización del reservorio en el basamento cristalino de la Cuenca Neuquina. *Petrotécnica* 24-43.
- Vergani, G., A. Tankard, H. Belotti y H. Weisink**, 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén basin, Argentina. En: A. Tankard, S. Suárez y H. Welsink, (Eds.), *Petroleum basins of South America*. American Association of Petroleum Geologist. Memoir 62:383-402.
- Wilson, M. y E. Pittman**, 1977. Authigenic clays in sandstones: recognition and influence on reservoir properties and paleoenvironmental analysis. *Journal Sedimentology Petrology* 47:3-31.
- Winchester, W. y P. Floyd**, 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20:325-343.
- Zubiri, M. y J. Silvestro**, 2007. Fracture Modeling in a Dual Porosity Volcaniclastic Reservoir: A Case Study of the Precuyo Group in Cupen Mahuida field, Neuquén, Argentina. *American Association of Petroleum Geologist*, Annual Convention, Long Beach, California.