

IMPORTANCIA DE LOS SILLS COMO RESERVORIOS EN LA CUENCA NEUQUINA DEL SUR DE MENDOZA

Mario Schiuma¹, Eduardo Jorge Llambías²

1: YPF S.A. mario.schiuma@ypf.com

2: Centro de Investigaciones Geológicas, UNLP-CONICET. llambias@cig.museo.unlp.edu.ar

Palabras clave: Sill, Aureola térmica, Diaclasamiento, Madurez, Migración

ABSTRACT

Significance of sills as reservoirs in the Neuquén Basin in southern Mendoza

By the late 1970s, in the Neuquén basin in southern Mendoza exploration geologists started to pay attention to the manifestations of hydrocarbons associated with intrusive bodies emplaced in rocks of Mendoza Group. At the beginning it was thought that these events were associated with natural fractures in the host rock generated by the stress caused by the intrusion of igneous material. However, was quickly found that hydrocarbons production came from the sills (Perea *et al.*, 1984). The lack of records of such kind of reservoir worldwide, forced to develop techniques to evaluate these rocks and try to distinguish between productive and non-productive, and somehow predict their distribution and geometry. This paper attempts to summarize the working hypotheses and the experiences made in this sense.

INTRODUCCIÓN

Entre los reservorios productivos no convencionales de la cuenca neuquina del sur de Mendoza (Figura 1) se destacan los de origen magmático, constituidos principalmente por cuerpos laminares intruidos concordantemente en capas sedimentarias. Estos cuerpos se denominan en la literatura inglesa *sills* y en nuestro país filones capa, término no utilizado en otros países de lengua española. En esta contribución utilizaremos el término *sill* porque creemos que el término filón capa no tiene difusión universal.

Sills y diques son los cuerpos ígneos laminares más abundantes en los niveles más altos de la corteza superior. Las diferencias entre ellos son importantes en cuanto al modo de emplazamiento. Los *sills* se expanden lateralmente entre las capas de una cuenca sedimentaria o de un estratovolcán y el flujo no depende del gradiente de presión. Los diques, en cambio, son subverticales y dependen del gradiente de presión, por lo cual el magma tiende a desplazarse hacia la superficie.

Los lacolitos están estrechamente relacionados a los *sills*, de manera que en una misma cuenca

comúnmente coexisten ambos. En los *sills* la viscosidad es moderada a baja mientras que en los lacolitos es moderada a alta. Esta diferencia en viscosidad puede ocurrir en una misma secuencia magmática debido a diferencias en cantidad de cristales en suspensión y a la temperatura del magma al momento de la intrusión.

Los *sills* se intruyen preferentemente en niveles sedimentarios con baja competencia mecánica y permeabilidad tales como pelitas y areniscas finas poco porosas. En estas rocas es común que la presión de poros sea superior a la del ambiente (Gressier *et al.* 2010). Por este motivo las secuencias pelíticas de la cuenca neuquina del sur de Mendoza tales como las Formaciones Vaca Muerta y Agrio y en menor medida los niveles pelíticos de la Formación Huitrín y el Grupo Neuquén, son las unidades que contienen el mayor número de *sills*. La porosidad de los *sills* es variable entre casi nula hasta elevada, pero en aquellos casos en los cuales la porosidad es mayor que la de la roca de caja son potencialmente rocas reservorio.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SILLS DEL SUR DE MENDOZA

La abundancia de *sills* andesíticos a andesíticos basálticos en la cuenca neuquina del sur de Mendoza, en particular al este del río Grande, fue resaltada por Schiuma (1994) al realizar su tesis doctoral basada en el análisis de los reservorios ígneos de esta región. A continuación se da una síntesis de sus principales características.

Morfología

Como todo cuerpo laminar techo y base son paralelos (Figura 2a, b) en tramos de varios centenares de metros. Localmente se adelgazan hasta desaparecer (Figura 2c) o se entrelazan con *sills* emplazados en niveles sedimentarios contiguos (Figura 2d). Los espesores son variables entre pocos centímetros y varios metros. En *sills* de varios metros de espesor se observa una estructura interna compuesta por bandas paralelas al techo y base que sugieren el emplazamiento en pulsos sucesivos. No hemos observado en el contacto con el techo y la base capas límites con tasas de cizalla elevadas, como es común en los diques, por lo cual se infiere que la velocidad del flujo en un *sill* es menor que en un dique.

Composición

Las composiciones dominantes son andesíticas a andesíticas basálticas. En las andesitas los fenocristales de plagioclasa (An_{35-40}) son marcadamente zonales y su alteración varía desde nula hasta totalmente reemplazadas por minerales arcillosos. Los fenocristales ferromagnésicos consisten

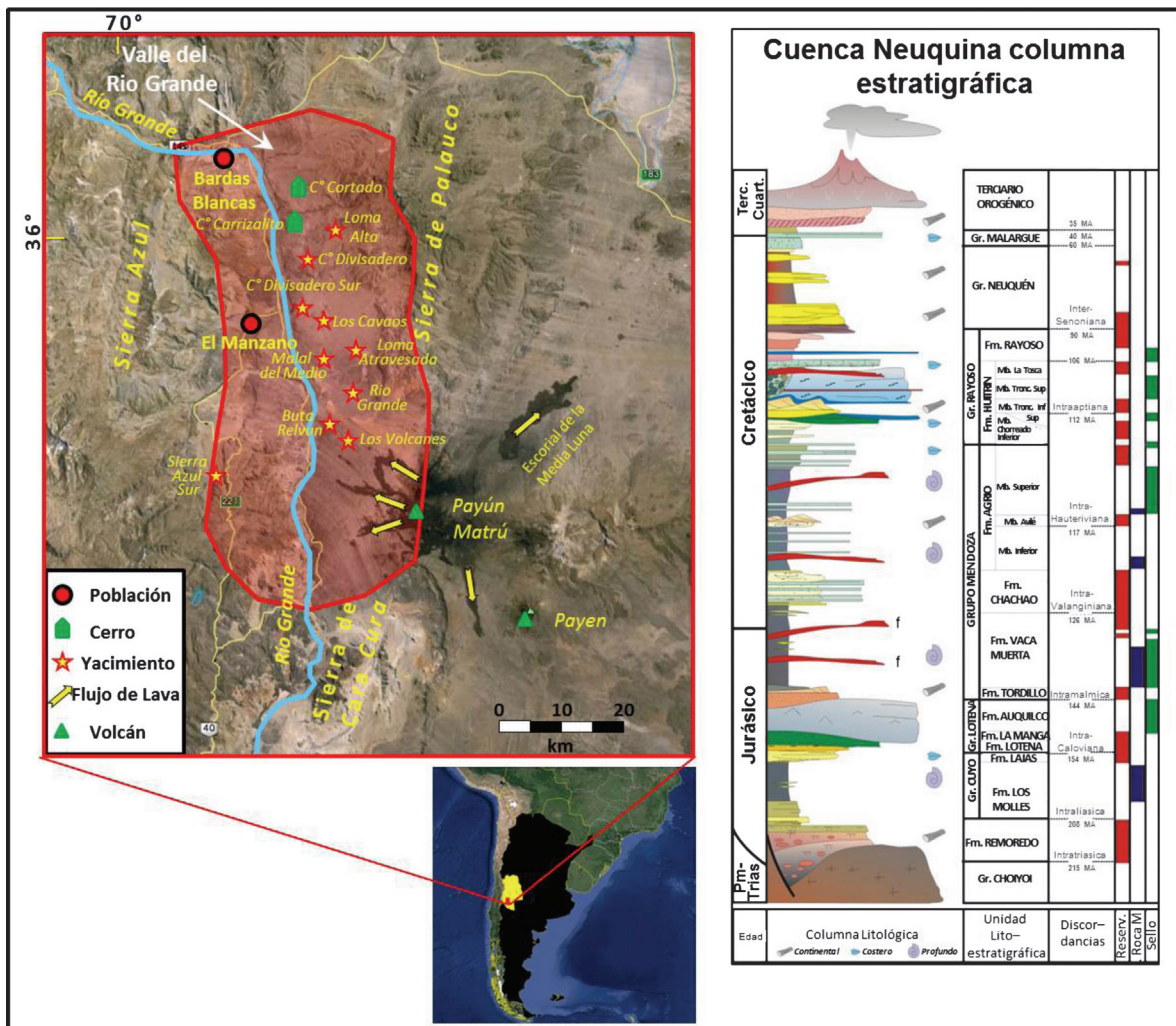


Figura 1. Mapa de ubicación de yacimientos con pozos que atravesaron intrusivos y columna estratigráfica de la Cuenca Neuquina en el sur de Mendoza.

en clinopiroxeno subordinado, anfíbol y escasa biotita. En las andesitas basálticas los fenocristales de plagioclasa (An_{38-45}) son moderadamente zonales y están acompañados por escaso clinopiroxeno, anfíbol y escasa biotita. En la Figura 3 se han seleccionado los ejemplos más representativos de estos dos tipos de rocas.

La alteración de los *sills* comienza durante las etapas finales de la cristalización con la anfibolitización parcial del piroxeno y la alteración incipiente del anfíbol por oxidación del hierro. En la etapa deutérica las plagioclasas son reemplazadas por agregados arcillosos y a veces son microscópicamente lixiviadas, dando origen a porosidad secundaria, pero asociada al enfriamiento del *sill*. Las pastas tienen microvesículas primarias (porosidad primaria) que pueden aumentar de tamaño durante la alteración o también pueden sellarse. Son frecuentes los parches de calcita y cuarzo que a veces ocluyen las microvesículas y en otros casos reemplazan a los minerales primarios e inclusive a los minerales de alteración de mayor temperatura.

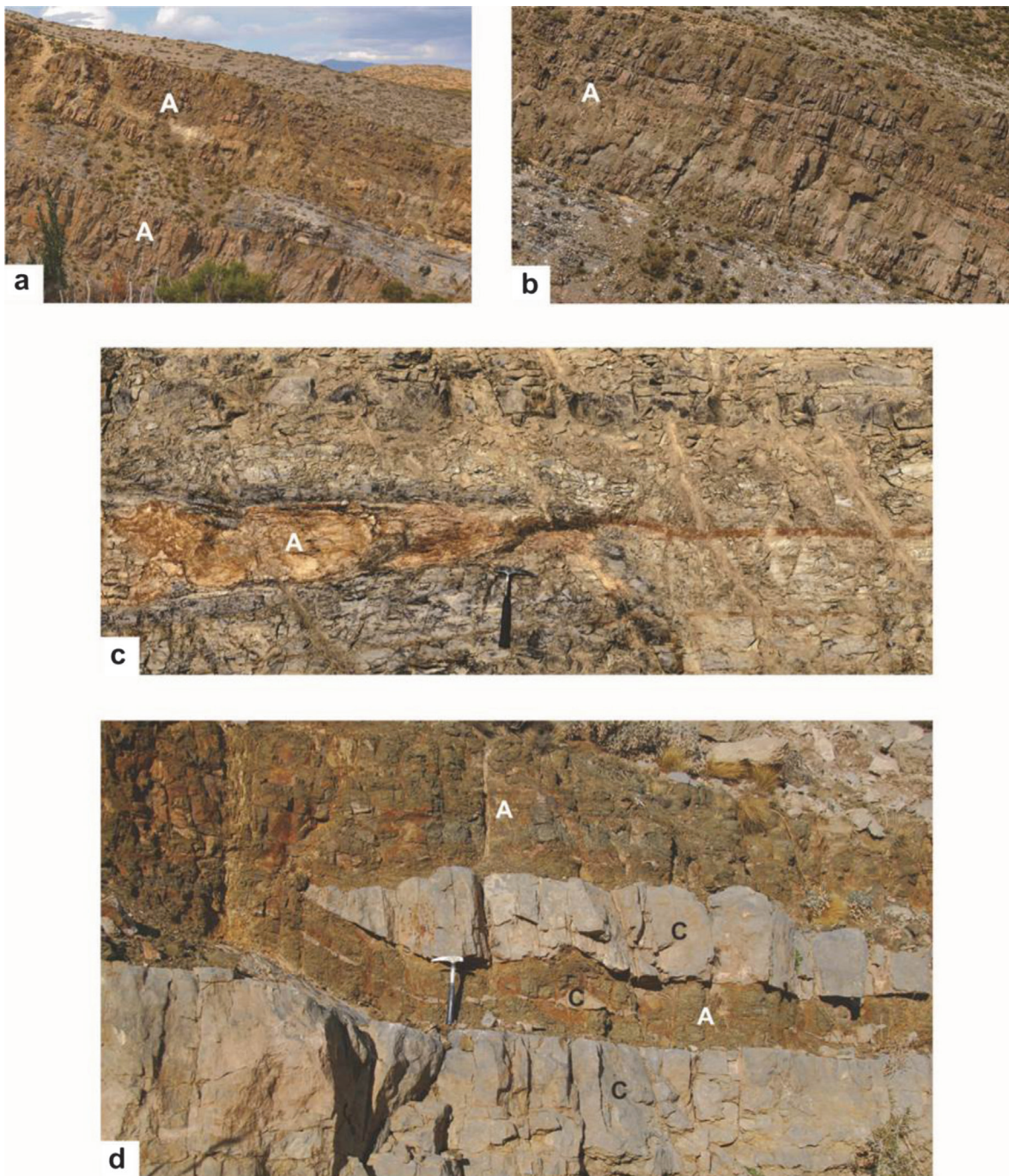


Figura 2. Distintos aspectos de *sills* en afloramientos de la Cuenca Neuquina del sur de Mendoza. a: *Sills* andesíticos (A) intruidos en la Formación Vaca Muerta. El Manzano ($36^{\circ}06'18''\text{S}$; $69^{\circ}49'28''\text{O}$). Se observan dos *sills* paralelos. En b: Se muestra el detalle del *sill* (A) superior, donde se aprecia el diaclasamiento normal y paralelo a techo y base. Además, se observan capas de distinta textura y tonalidad que permite inferir que la intrusión fue en pulsos sucesivos. En c: Acuñaamiento lateral de un *sill* andesítico (A) en la cuesta del Chihuido ($35^{\circ}45'14''\text{S}$; $69^{\circ}34'0''\text{O}$). La delgada faja oxidada que continúa paralela a las capas sugiere expulsión de gases a alta temperatura. En d: *Sill* andesítico (A), rojo oscuro, emplazado en las calizas de la base de la Formación Chachao (C), gris claro. Obsérvese el delgado relicto preservado de esta formación, lo cual sugiere que la intrusión fue pasiva, sin modificar mayormente la estructura de la caja. Cuesta de Chihuido ($35^{\circ}44'49''\text{S}$; $69^{\circ}34'57''\text{O}$).

Espesores y distribución

Los espesores de los *sills* son variables y van desde pocos centímetros hasta 60 m. Tanto en superficie como en testigos corona se han registrado espesores mínimos de 10 a 15 cm, lo cual está de acuerdo con magmas de composiciones andesíticas a basálticas, cuyas viscosidades son moderadamente bajas.

El mínimo espesor detectable con los perfiles de pozo es de alrededor de medio metro, que es el orden de la definición vertical de los registros de subsuelo convencionales. Habitualmente se consideran las intrusiones de un metro o más, porque las de menor espesor ofrecen dudas para su definición.

Un aspecto que debe destacarse es que la condición de reservorio de los *sills* no está relacionada con el espesor, ya que se ha obtenido producción de petróleo de algunos *sills* con menos de 2 metros de espesor y también de otros de 40 ó más metros.

Con el objeto de evaluar la distribución de las rocas ígneas y tratar de establecer la probable zona de aporte magmático, se relevó la información de 266 pozos perforados en la zona. En la Figura 4 se presenta un resumen de los pozos que documentaron la existencia de intrusivos, el máximo espesor acumulado de intrusivos para un solo pozo y el promedio de espesor de intrusivos para cada formación. En el block diagrama de la Figura 5 se representa esquemáticamente la distribución de los *sills* en la cuenca neuquina del sur de Mendoza.

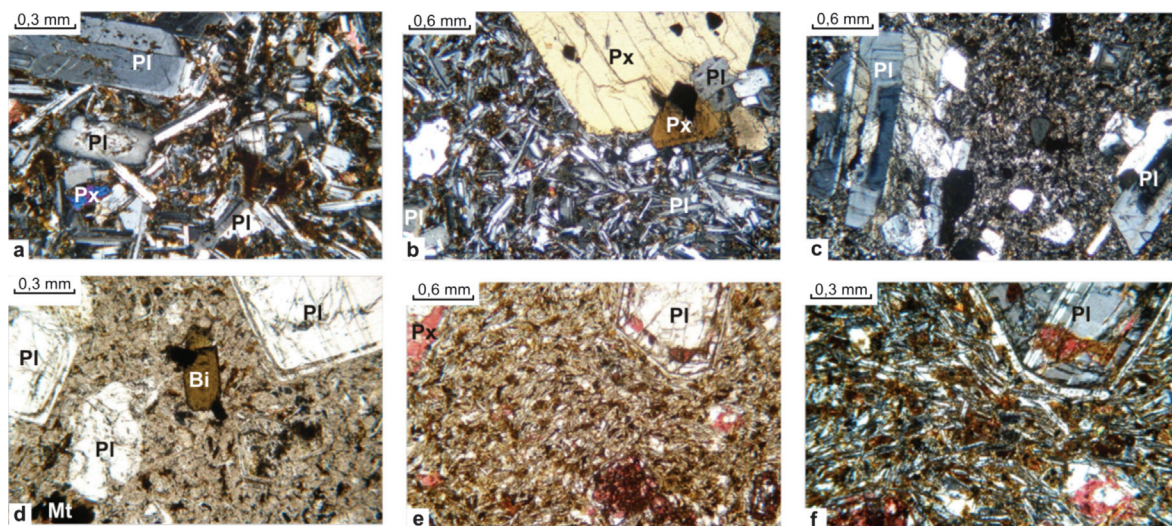


Figura 3. Microfotografías de afloramientos de *sills* en la cuenca neuquina del sur de Mendoza. a y b: Andesita basáltica. Plagioclasa débilmente zonal y clinopiroxenos son los fenocristales más abundantes. Pasta intergranular. Porosidad: < 0,5%, con distribución heterogénea. Mesoporo (0,25 mm): 100%, localizado en el interior de cavidad irregular, rellena por calcita y cuarzo (35°44'56"S; 69°35'9"O). c y d: Andesita. Plagioclasa zonal y anfíbol son los fenocristales más abundantes. Porosidad 4,5%, secundaria, poros de 0,01 a 0,06 mm mayormente por disolución de plagioclasa (35°44'57"S; 69°34'21"O). e y f: Andesita con fenocristales de plagioclasa y minerales ferromagnéticos alterados. Porosidad: 0,5%, secundaria, con distribución heterogénea. Microporos (0,01-0,06 mm): 100%. Poros intracrystalinos por disolución de plagioclasa (35°45'14"S; 69°33'59"O). Referencias: Bi Biotita, Mt Magnetita, Pl Plagioclasa, Px Piroxeno.

Formación	Máximo espesor acumulado m	Yacimientos con máximos espesores	Promedio por formación m	Número de pozos considerados	Número de pozos con intrusivos	Porcentaje de pozos con intrusivos
Vaca Muerta	65	Los Cavaos	27.2	255	222	87.1
Chachao	60	Río Grande	17.4	266	55	20.8
Agrio	109	Cerro Cortado Cerro Carrizal Malal del Medio	35.1	266	230	86.5
Huitrin	44	Los Cavaos	19.6	266	19	7.1
Gr. Neuquén	106	Loma Alta	32.2	266	72	27.1
Gr. Mendoza	161	Cerro Cortado	59.7	266	253	95.1
Total	168	Malal del Medio	69.5	266	256	96.2

Figura 4. En este cuadro se presenta un resumen de los datos de pozos que documentaron la existencia de intrusivos, el máximo espesor acumulado de intrusivos para un solo pozo por formación, la zona donde está ese máximo espesor y el promedio de espesor de intrusivos para cada formación. En el caso del Grupo Mendoza que agrupa las Formaciones Vaca Muerta, Chachao y Agrio se consigna el máximo espesor para todas esas formaciones y la zona donde eso ocurre y el promedio para el grupo. El mismo criterio se aplica al total, que es el máximo espesor acumulado de intrusivos para todo el intervalo perforado y la zona donde ese máximo espesor ocurre y el promedio de espesor para todos los pozos considerados.

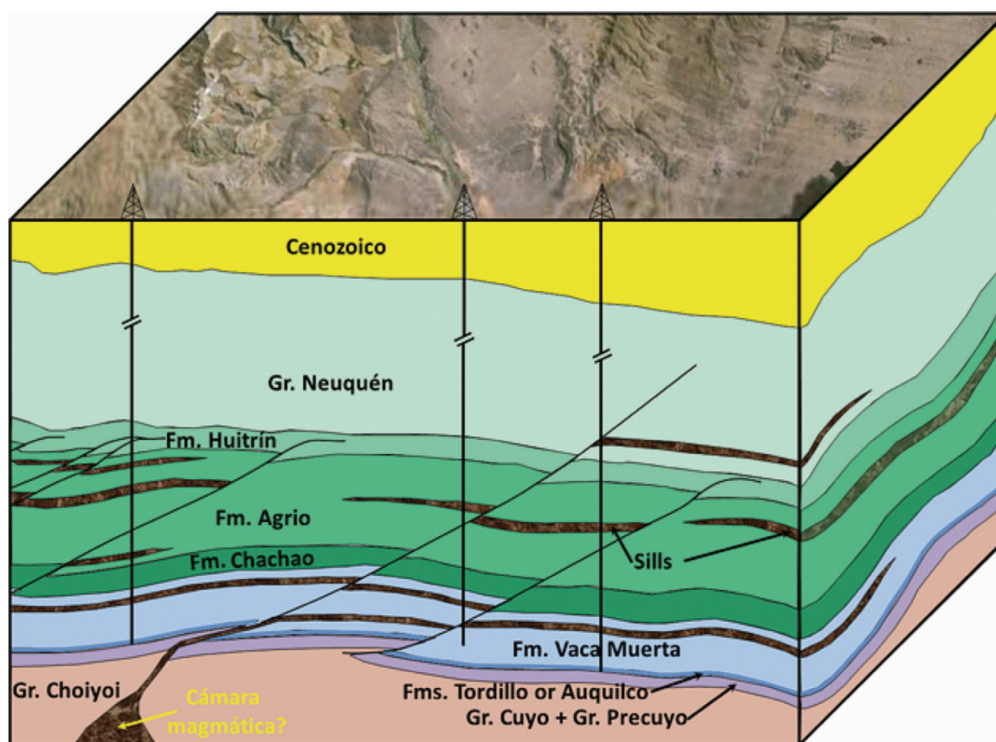


Figura 5. Block diagrama de una sección idealizada que muestra la relación de los sills con las fallas, que son la vía de ingreso del material ígneo.

Estructura interna

Todos los *sills* en superficie muestran un intenso diaclasamiento con dos direcciones predominantes. La más marcada es normal al techo y base del *sill*. La segunda dirección de diaclasamiento es paralela al techo y base. Ambos diaclasamientos conforman paralelepípedos que dan origen a la frecuente alteración catafilar o esferoidal (Figura 6). Esta alteración contribuye a aumentar la porosidad de las rocas ya sea por el aumento de volumen originado por la alteración (Bermúdez y Delpino 2008; Buss *et al.* 2008; Røyne *et al.* 2008) o por los esfuerzos ejercidos por la cristalización en los espacios porales mayores (Jamtveit *et al.* 2011). Cualquiera sea la interpretación estos procesos de alteración generan nuevas microfracturas que favorecen el incremento en la porosidad y permeabilidad del sistema.

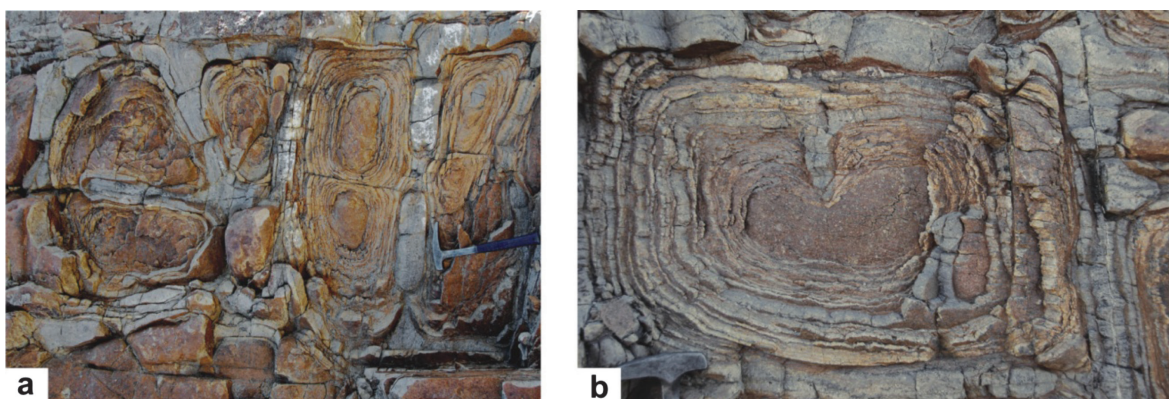


Figura 6. Disyunción esferoidal en un *sill* andesítico de la cuesta del Chihuido. Está controlada por las diaclasas verticales y paralelas al *sill*, común a todos ellos.

Edad de las intrusiones

Gran parte del emplazamiento de los *sills* se produjo durante el Oligoceno Tardío y el Mioceno Temprano (Kay y Copeland 2006; Silvestro y Atencio 2009). En la Figura 7 se presenta una síntesis de las edades y de su distribución.

Rodríguez Monreal *et al.* 2009 han datado en pozos al sur de río Grande edades tan antiguas (49-46 Ma) como la de las secuencias del Eógeno Temprano de Colli Pilli y norte del Neuquén. Estas últimas edades no son frecuentes en los afloramientos del sur de Mendoza aunque no se puede descartar su existencia cuando se intensifiquen las investigaciones geocronológicas.

Edades Ar/Ar obtenidas en afloramientos confirman que la actividad magmática basáltico-andesítica ha sido intensa entre 24 y 7 Ma (Kay y Copeland 2006; Silvestro y Atencio 2009;

Gudnason *et al.* 2012; Dyhr *et al.* 2013). De acuerdo a Dyhr *et al.* (2013) a los 15 Ma el ángulo de inclinación de la subducción de la placa de Nazca se hizo subhorizontal a la latitud de la localidad de Huantraico (69° 52'sur), dando lugar a una tectónica compresiva que modeló la faja plegada de Malargüe. Según Silvestro y Atencio (2009) el comienzo de la fase compresiva que dio origen a esta faja fue a los 20,5 Ma en el valle del río Grande (Figura 7).

Aureola térmica

La temperatura del magma andesítico durante la intrusión de los *sills* se estima que por su composición podría estar comprendida entre 900 y 1000°C, mientras que la temperatura de la roca de caja no excedería los 200°C. El elevado gradiente térmico promovido por la intrusión generó una aureola térmica, la cual no es apreciable a simple vista. No se han observado recristalizaciones que modifiquen la textura de la caja. Esto puede ser explicado por la escasa magnitud de la masa térmica y el corto tiempo empleado para alcanzar el equilibrio térmico. No obstante, estudios de detalle de las aureolas térmicas han revelado significativos cambios en la maduración de materia orgánica, en la volatilización del agua contenida en los poros, en la deshidratación de minerales y en la generación de microfracturas inducidas por el aumento de volumen de los gases (Santos *et al.* 2009; Jiang *et al.* 2011, Rodríguez Monreal *et al.* 2009).

DEFORMACIÓN POST INTRUSIÓN

Varios *sills* han sido desplazados por fallas, probablemente relacionadas con el episodio de deformación que modeló la faja plegada de Malargüe. En estos casos interpretamos que hay una nueva generación de fracturas y que el diaclasamiento producido por el enfriamiento del *sill* fue reactivado y probablemente abierto durante la etapa de ascenso asociada a este episodio de deformación. De esta manera en algunos *sills* aumentan la porosidad y la permeabilidad.

Los *sills* no muestran deformación interna continua. Esto puede ser explicado por ser altamente competentes respecto de la roca de caja. Las deformaciones son absorbidas casi totalmente por las rocas de caja, cuya deformación aumenta en las vecindades del *sill* y localmente tienden a estrangularlo (Figura 8).

CARACTERÍSTICAS COMO ROCA ALMACÉN

Las rocas ígneas intrusivas no presentan originalmente características como roca almacén. Por lo cual la hipótesis que estas propiedades han sido adquiridas luego del emplazamiento del cuerpo

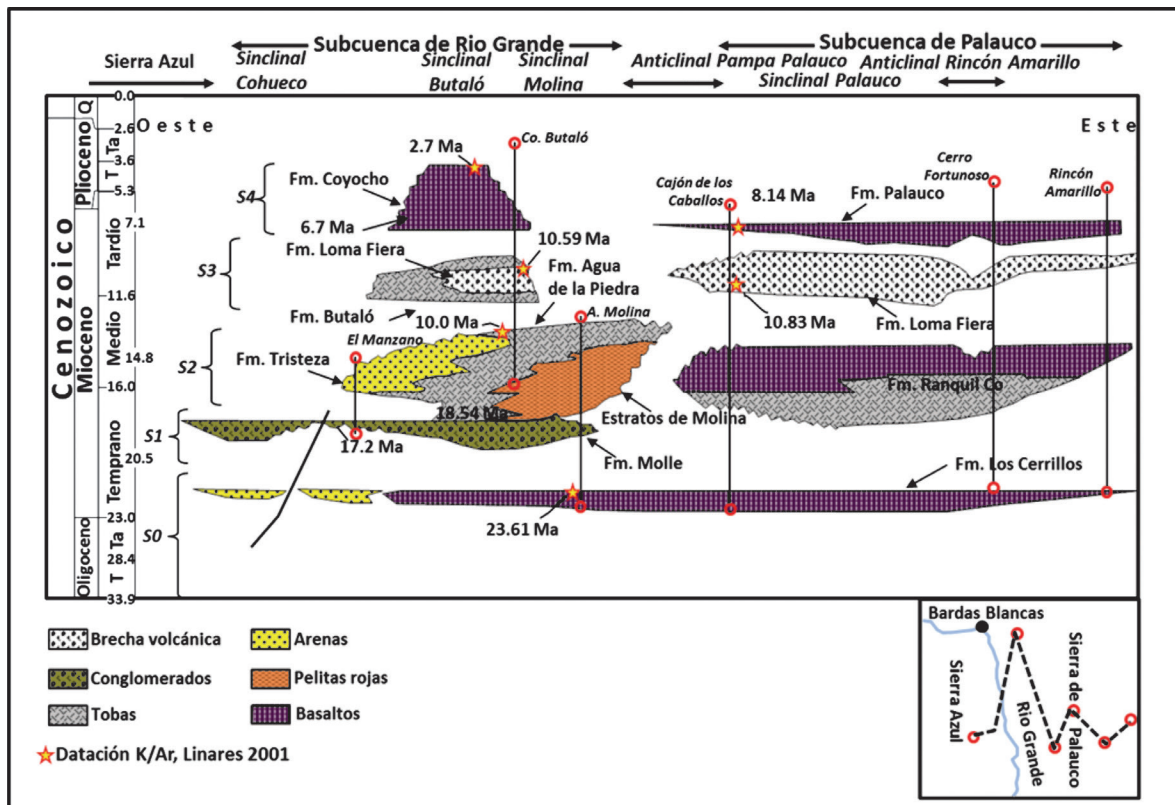


Figura 7. Esquema con los principales eventos ígneos y orogénicos ocurridos desde el Oligoceno al presente en el ámbito del valle del Río Grande y la sierra de Palauco. Modificado de Silvestro y Atencio (2009).

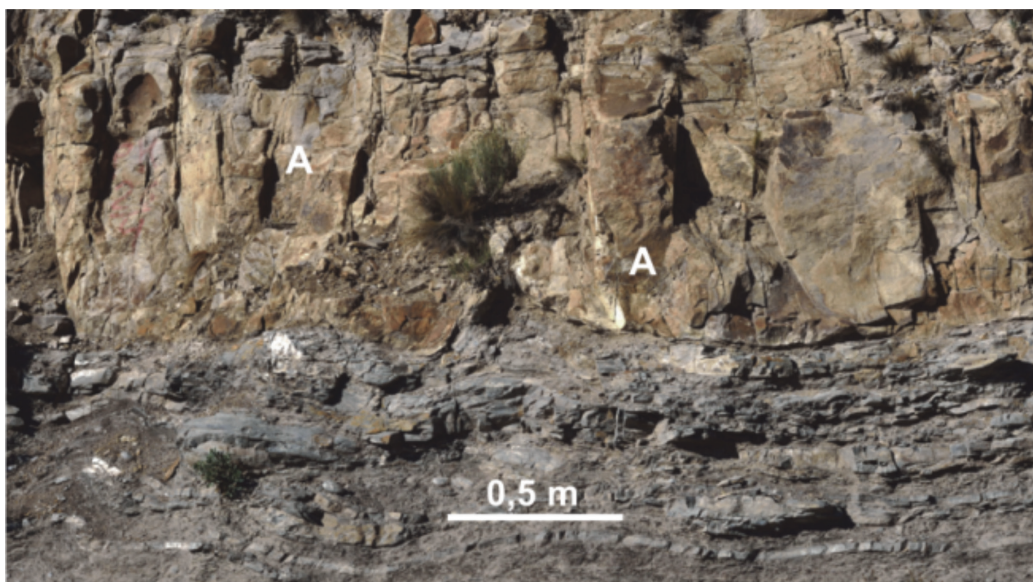


Figura 8. Sill andesítico (A) intruido en la Formación Vaca Muerta, cuesta de Chihuido. La deformación no afectó internamente al sill porque se concentró en las pelitas adyacentes al mismo. No obstante, los esfuerzos tendieron a estrangular el sill fluendo las pelitas hacia la apertura del budín.

parece la más aceptable. Entonces la identificación de los mecanismos que generan las condiciones petrofísicas para que funcionen como reservorios de hidrocarburos es clave para prospeccionar estos filones.

En rocas efusivas la adquisición de porosidad y permeabilidad puede tener diferentes causas, como por ejemplo la fracturación producida por el rápido enfriamiento y por la concentración y pérdida de gases que pueden formar alvéolos, sumado a la acción de agentes meteóricos, como parece ocurrir en el yacimiento Palmar Largo en la provincia de Formosa (Di Persia *et al.* 1991). Asimismo en rocas intrusivas expuestas al intemperismo, la meteorización puede provocar la adquisición de porosidad y permeabilidad, un ejemplo de esto pueden ser los yacimientos que producen de pórfidos alterados (Daniel y Hvala, 1982). Sin embargo, dado que estos intrusivos nunca afloraron debe descartarse la acción de elementos meteóricos. El volumen de fracturas por enfriamiento es muy pequeño y no provoca el aumento considerable de la porosidad y menos de la permeabilidad. Por lo cual la génesis de estos reservorios debe adjudicarse a la acción de los esfuerzos tectónicos a que fueron sometidos. Es probable que la fracturación se deba a más de un evento tectónico, sin embargo la aparición de las primeras fracturas, seguramente facilitó la circulación de fluidos con el subsecuente proceso de alteración y mejoramiento tanto de la porosidad como de la permeabilidad.

Si se admite que estos cuerpos comenzaron a emplazarse en el Eoceno tardío, las intrusiones más antiguas, que se corresponden con la secuencia 0 (véase Figura 7), han sufrido por lo menos cinco fases diastróficas. En los filones más cercanos a zonas de falla, y por lo tanto sometidos a mayores esfuerzos, se habrían originado fracturas a través de las cuales se movieron fluidos cargados de soluciones que produjeron disoluciones, deposiciones y alteraciones, que le han conferido a estas rocas excelentes características para albergar y conducir fluidos.

Como ya se indicó, los filones intruyen con preferencia a las Formaciones Agrio y Vaca Muerta. Ambas tienen capacidad oleogénica demostrada a través de ensayos de laboratorio.

Es interesante discutir el efecto que produjeron las intrusiones en la materia orgánica de la roca madre y en el petróleo preexistente, ya que a altas temperaturas el petróleo se descompone. Para dilucidar este punto se realizaron estudios geoquímicos que llegaron a las siguientes conclusiones (Geoquímica operativa YPF 1984):

1. El petróleo presente en las intrusiones y la materia orgánica de las rocas de caja adyacentes están genéticamente relacionados.
2. La materia orgánica es más madura en la zona cercana a los intrusivos. Este efecto se presenta en un espesor igual al de los intrusivos hacia abajo y dos espesores hacia arriba. Sin embargo, no se detectó en ningún caso que se haya producido sobremaduración de la materia orgánica que implique la destrucción de los hidrocarburos preexistentes a la intrusión.

Este análisis indica que las aureolas térmicas fueron de tamaño pequeño así como el tiempo

de equilibrio térmico. Concuerda con esto el escaso metamorfismo de contacto que se observa en la roca de caja.

El resultado de este análisis confirmaría la hipótesis de una migración corta desde las rocas de caja a los intrusivos.

En este mismo sentido Rodríguez Monreal *et al.* (2009) proponen también una migración corta, e indican que coexisten dos tipos de petróleo, ambos relacionados genéticamente, uno más maduro debido a la cercanía de la roca madre a los intrusivos y otro de menor madurez generado en las zonas más alejadas de los intrusivos.

Es muy probable que cuando empezaron a intruirse las rocas ígneas (Oligoceno-Mioceno) el petróleo ya se había formado, dado que la Formación Vaca Muerta se depositó unos 108 Ma antes de las primeras intrusiones, en tanto que la Formación Agrio lo hizo unos 93 Ma antes de dicho evento. Estudios realizados en la zona estiman el inicio de la generación-expulsión durante el Eoceno. La iniciación de la orogenia terciaria debe haber comenzado a generar estructuras favorables para la acumulación de hidrocarburos, además, la intrusión de los cuerpos ígneos también generó estructuras positivas. No obstante, tanto las rocas del Grupo Mendoza como los *sills* no tuvieron valores significativos de porosidad y permeabilidad primaria de modo que debe haber habido un déficit de roca reservorio. Con la aparición y posterior fracturación de las rocas ígneas y de algunas de las rocas del Grupo Mendoza se generaron las rocas almacén capaces de albergar los hidrocarburos preexistentes. Es decir que el mismo mecanismo que produjo la fracturación de las rocas ígneas también es responsable de haber generado las estructuras que se constituyeron en trampas de hidrocarburos. Si se admite que las primeras intrusiones comenzaron a producirse en el Oligoceno tardío y luego de esto el primer evento diastrófico a los 23 Ma, se infiere que a partir de esta edad existió la posibilidad que se establecieran reservorios de hidrocarburos. Una evidencia que apuntaría a favor de la hipótesis de la existencia de estos reservorios tempranos está dada por el hecho de haber encontrado en algunos yacimientos distribuciones de fluidos anómalas. Es decir, que si se analiza el yacimiento en conjunto se encuentra gas en posiciones estructurales bajas o agua en posiciones que en otro sector corresponden a petróleo. Luego de analizar este comportamiento se comprobó que la distribución de fluidos era particular para cada bloque determinado por las fallas principales. Es decir que había un reservorio anterior que fue subdividido por el fallamiento y luego los fluidos se acomodaron de acuerdo a su densidad, pero restringiendo sus movimientos a cada bloque.

Cabe destacar que si bien se obtuvo producción de agua en algunos de los filones que intruyen a la Formación Huitrín o al Grupo Neuquén nunca se obtuvo producción de hidrocarburos de ellos, con la única excepción de un *sill* que intruye el Grupo Neuquén en el yacimiento Cerro Fortunoso, que está cortado por una falla de gran magnitud de rumbo aproximado E-O y a la cual se considera responsable de la carga de hidrocarburos de los reservorios del Grupo Neuquén.

IDENTIFICACIÓN DE LOS FILONES CON TÉCNICAS DE SUBSUELO

La identificación de filones con técnicas de subsuelo es relativamente simple ya que presentan respuestas muy características debido al alto contraste de propiedades físicas con respecto a las rocas que los rodean.

En el *cutting* son fácilmente reconocibles si tienen suficiente espesor como para ser reconocidos, teniendo en cuenta que en general se toma una muestra cada dos metros por lo cual espesores menores a este muestreo no serán reconocidos o sólo se los reconocerá en un porcentaje pequeño de la muestra, lo mismo ocurre con la curva de penetración de la perforación que tendrá un efecto apreciable si el cuerpo tiene un espesor considerable.

La sísmica 3D es un poderoso auxiliar para identificar estos cuerpos en el subsuelo, siempre y cuando tengan el espesor suficiente para superar la definición vertical de la sísmica que varía con el contenido de frecuencia de la misma pero está en el orden de los 20 m. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de la identificación de filones.

El registro de los *sills* en perfiles de pozo también es muy notable y tiene una respuesta típica frente a los registros de pozo más comunes. En este caso también depende de la definición vertical de los mismos que está en el orden de 0.5 m. Sin embargo, por cuestiones prácticas y debido a que espesores de menos de 1 m generan cierta incertidumbre en la respuesta solo se consideran aquellos *sills* que tienen un metro o más de espesor.

El perfil de potencial espontáneo suele presentar fuertes deflexiones tanto en el tope como en la base, debido al fuerte contraste de resistividades (muchas veces debido a la presencia de piritita) lo cual genera un SP electrocinético.

Dada su composición mesosilícica a básica, pobres en potasio, tienen bajos valores de rayos gama (GR) alrededor de 40°API. Como siempre se presentan intruyendo pelitas de alto valor de GR el contraste es notable y es una de las herramientas más confiables no sólo para identificarlos sino para correlacionarlos.

También son muy notables en los registros de densidad y neutrón, en la densidad aparecen siempre con altos valores de densidad (entre 2,75 g/cm³ a algo más de 2,9 g/cm³), en tanto que el neutrón presenta frente a ellos altos valores de porosidad, hecho que se atribuye a la presencia de minerales de mica y algunas arcillas producto de la alteración de plagioclasas y feldespatos.

El perfil sónico o acústico presenta altos valores de tiempo de tránsito en el orden de 50 a 52 μ s/pie.

Los *sills* en los perfiles de resistividad también son muy notables dado el fuerte contraste de resistividades con las pelitas que los rodean.

También en muchos casos es notable la expresión de las zonas fracturadas en los *sills* que se manifiestan con bruscas caídas de la densidad o el tiempo de tránsito y también con fuertes caídas en la resistividad cercana (*Microlaterolog* o similares). En la Figura 10 se presenta un ejemplo con la respuesta típica de los registros de subsuelo.

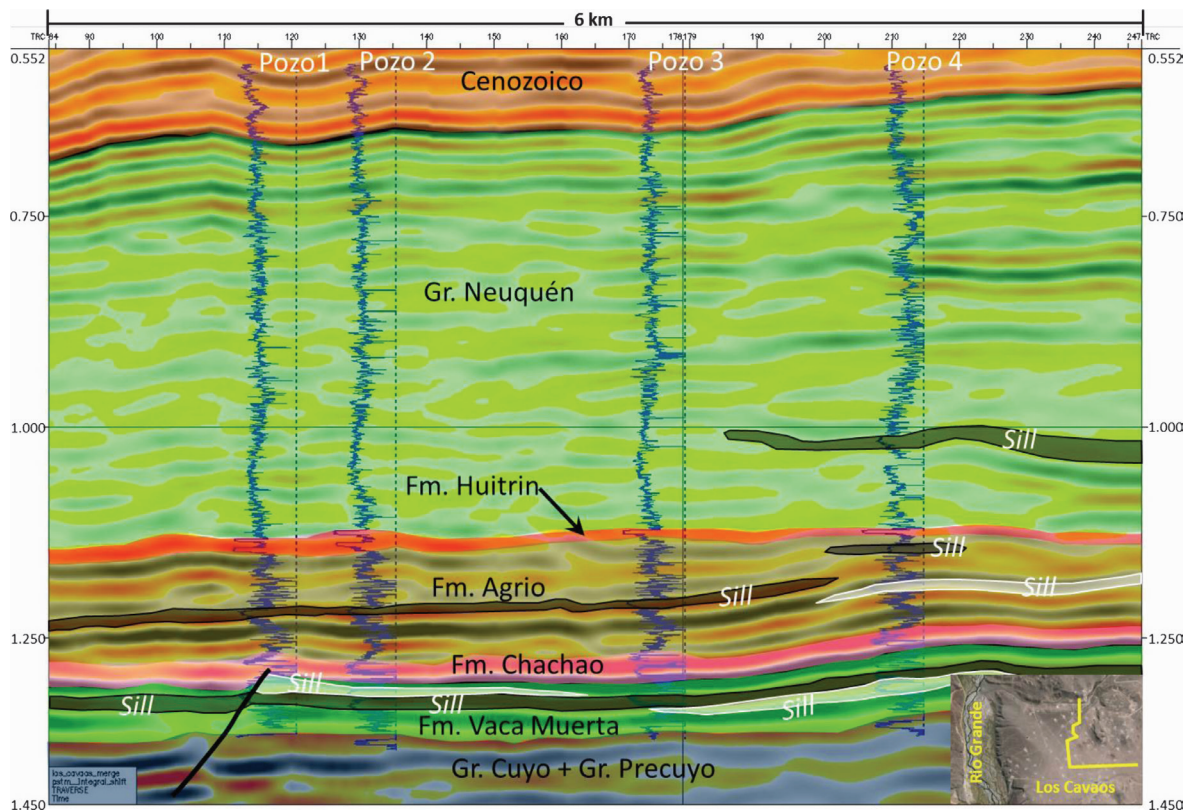


Figura 9. Sección sísmica mostrando la expresión de los sills en las diferentes formaciones intruidas y también la respuesta en el perfil de rayos gamma registrado en los pozos.

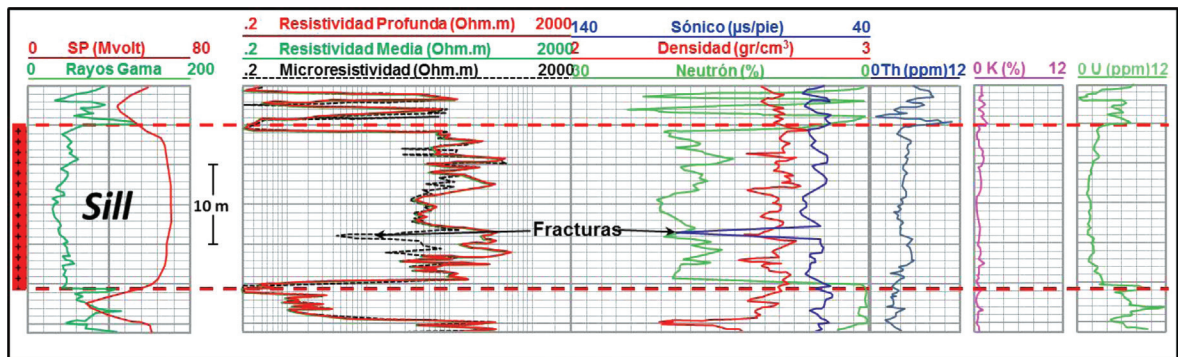


Figura 10. Perfiles de pozo mostrando la respuesta de los mismos frente a los intrusivos y también la expresión de las fracturas presentes en esos cuerpos.

Un poderoso auxiliar en la identificación de estos cuerpos y de las redes de fracturas son las imágenes de pozo, tanto las eléctricas como las acústicas. En la Figura 11 se muestra un ejemplo. Por último y como se mencionó, el registro de GR es muy útil para conocer la continuidad de estos cuerpos dado que como no hay digestión de la roca de caja, esto se comprueba porque si se quita el sill del registro de GR y se lo compara con un pozo sin intrusiones la correlación es perfecta (Figura 12).

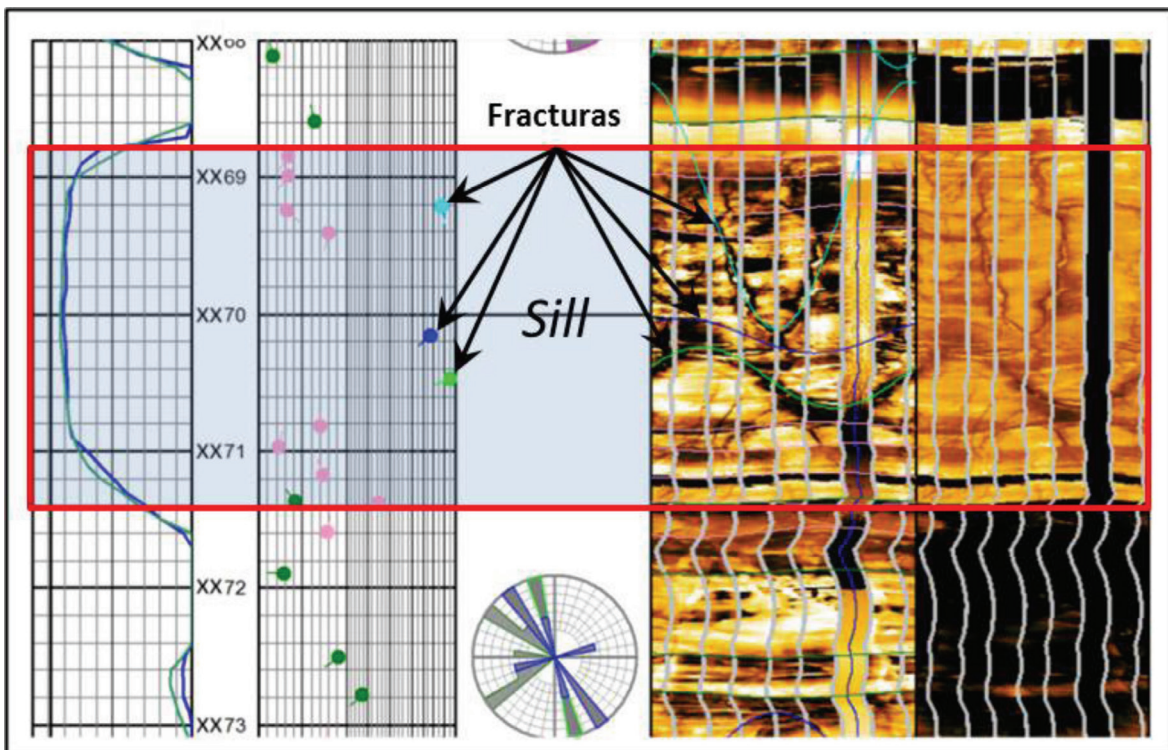


Figura 11. Imagen eléctrica de pozo, nótese la expresión de las fracturas y el contraste entre la roca de caja y el sill sobre todo en la imagen que está a la derecha donde se aplicó una escala de colores estática, en tanto que la izquierda es una imagen con escala dinámica que no marca tanto las diferencias de resistividad pero resalta detalles de la textura.

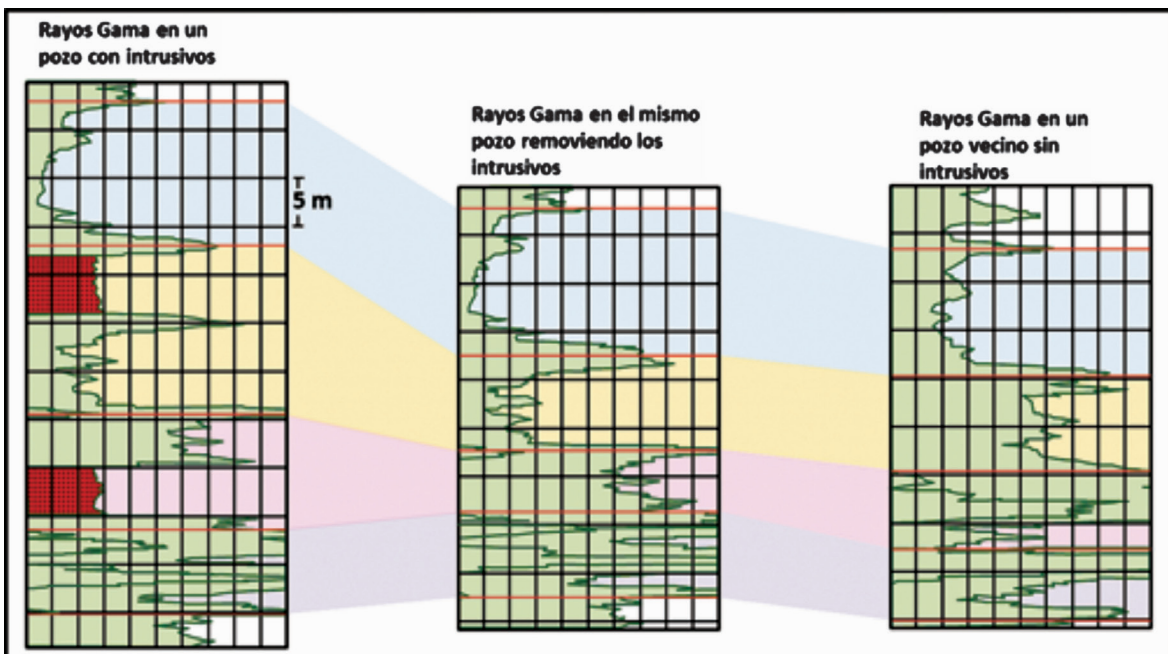


Figura 12. Ejemplo del uso de rayos *gamma* para la correlación de los intrusivos y para demostrar que no hay digestión ni alteración notable de la roca de caja.

DISCUSIÓN

La intrusión de un *sill* introduce en el entorno el aumento de la temperatura ambiente y genera nuevos esfuerzos relacionados con el proceso de intrusión. En la aureola térmica se acelera la maduración de la materia orgánica y el aumento del volumen de los gases contenidos en los microporos (Santos *et al.* 2009; Jiang *et al.* 2011; Rodríguez Monreal *et al.* 2009). Con este aumento se relaciona la generación de un campo de microesfuerzos que favorecen la microfracturación hidráulica, incrementando la permeabilidad de la roca de caja. Con posterioridad, durante la etapa de deformación miocena, todas las fracturas se reactivan e incluso pueden abrirse si se registra descompresión por el ascenso tectónico de las rocas. Las fracturas preexistentes relacionadas con el enfriamiento del *sill* (diaclasas de enfriamiento) y las nuevas generadas por proceso tectónico son las que más ganan espacio, aunque también lo hace la microfracturación hidráulica de las pelitas. El resultado es la migración de los hidrocarburos desde las pelitas hacia los *sills*.

La distribución de la porosidad y permeabilidad de los *sills* es irregular y hasta ahora no se han establecido leyes que permitan realizar extrapolaciones confiables. La porosidad primaria, relacionada con el enfriamiento, se manifiesta en microporos intercristalinos, vesículas y fracturación por enfriamiento (Bermúdez y Delpino 2008). A su vez, parte de los microporos son sellados por los minerales arcillosos que se forman por el ataque de los gases residuales que se separan del magma. Durante esta etapa, conocida como etapa deutérica, a veces puede haber equilibrio entre el sello de porosidad y la creación de nueva porosidad por lixiviación de los feldespatos. No obstante, creemos que esta porosidad fue muy baja, irrelevante para la acumulación de fluidos.

La porosidad aumenta durante la etapa de deformación miocena, relacionada con la faja plegada de Malargüe, por reactivación de las fracturas primarias y por la generación de nuevas fracturas. Es muy difícil, con los datos que se tienen actualmente, establecer un balance sobre la porosidad final. En los afloramientos menos afectados por la tectónica es probable que predomine la porosidad relacionada con el enfriamiento y la fase deutérica, mientras que en los más afectados por la reactivación de fracturas la porosidad debida a este fenómeno es más relevante.

La hipótesis de una migración corta desde la roca de caja (que es también roca madre) hacia los *sills* se ve reforzada por el hecho que cuando estos cuerpos no intruyen roca madre no han sido cargados por hidrocarburos, salvo el caso ya señalado de Cerro Fortunoso donde el *sill* fue cargado por la misma migración que cargó los reservorios de Grupo Neuquén como resultado de una migración larga a través de fallas.

En la Figura 13 se ha querido mostrar la evolución tectónica y la actividad ígnea desde el oligoceno hasta el presente en el valle del río Grande donde la cercanía a las fallas y la edad de los intrusivos ha sido la clave para la prospección exitosa de las acumulaciones de hidrocarburos relacionadas con los cuerpos ígneos.

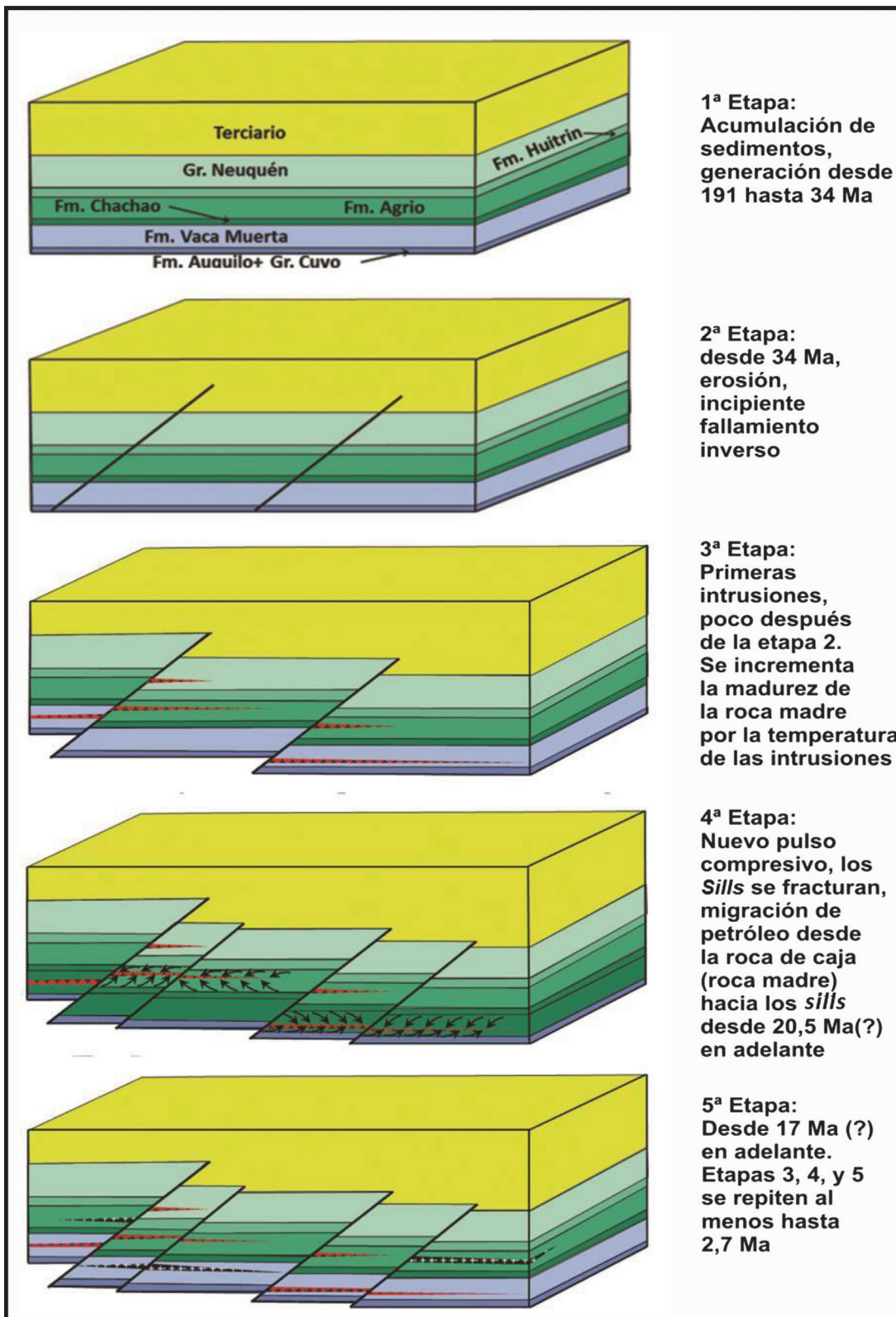


Figura 13. Dibujo esquemático que explica la evolución de la cuenca neuquina en el ámbito del valle de río Grande mostrando la relación entre los distintos pulsos tectónicos y las etapas de intrusión y fracturación de los sills y los efectos térmicos que ellos provocan en la roca de caja.

CONCLUSIONES

Los *sills* de la cuenca neuquina del sur de Mendoza tienen composiciones andesíticas y andesíticas basálticas. Se intruyeron preferencialmente en las secciones pelíticas del Grupo Mendoza (Formaciones Vaca Muerta y Agrio) y en menor extensión en la Formación Huitrín y en el Grupo Neuquén. No todos tienen condiciones petrofísicas para ser roca reservorio. Cuanto más viejo es el *sill* más chance tiene de ser reservorio.

La porosidad primaria, vesículas y espacios intercristalinos, ha sido obliterada durante la etapa de enfriamiento por reacciones con los gases residuales. A su vez, durante esta etapa se produjeron fracturas de enfriamiento transversales y paralelas al *sill*. Durante los episodios tectónicos compresivos del terciario se reactivaron estas fracturas y se produjeron nuevas, que son las que en definitiva le confieren características como roca almacén.

Las aureolas térmicas son débiles y contribuyeron a la maduración de la materia orgánica. No se han observado fenómenos de sobremaduración.

En los *sills* donde la porosidad es mayor que la de la roca de caja, la transferencia de fluidos hacia el *sill* fue facilitada por la microfracturación de la aureola térmica y su reactivación durante la tectónica. En caso de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio, en su carácter de rocas madres, los fluidos transferidos fueron los hidrocarburos por ellas generados.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a YPF por la autorización a publicar este trabajo y a Santiago Periale por su revisión y comentarios.

REFERENCIAS CITADAS

- Bermúdez, A. y D. H. Delpino, 2008. Concentric and radial joint systems within basic *sills* and their associated porosity enhancement, Neuquén basin, Argentina. En K. Thompson, y N. Petford (eds.) Structure and emplacement of high-level magmatic systems. Geological Society, London, Special Publications, 302, p. 185-198.
- Buss, H. L., P. B. Sal, A. M. Webb, and S. L. Brantley, (2008). Weathering of the Rio Blanco quartz diorite, Luquillo Mountains, Puerto Rico: Coupling oxidation, dissolution, and fracturing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72, p. 4488-4507, doi:10.1016/j.gca.2008.06.020.
- Daniel G. y O. Hvala, 1982. Análisis de rocas tobáceas y volcánicas a partir de los perfiles sísmico y de resistividad (Grupo Choiyoi-Yacimiento 25 de Mayo-Medanito S.E.). Primer Congreso Nacional de Hidrocarburos. Tomo explotación, p. 99-126. Buenos Aires, Argentina.

- Di Persia O., R. Carle y H. Belotti, 1991. Geología del sector noroeste de la provincia de Formosa". BIP (Boletín de Informaciones Petroleras). Tercera época - Año VIII - N° 26, p 2-17. YPF-BS. AS. Argentina.
- Dyhr, C. T., P. M. Holm, E. J. Llambías, y A. Scherstén, 2013. Subduction controls on Miocene back-arc lavas from Sierra de Huantraico and La Matancilla and new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating from the Mendoza Region, Argentina. *Lithos* 179, p. 67-83.
- Geoquímica operativa YPF, 1984. Síntesis de las relaciones encontradas entre algunos petróleos y rocas de la zona de andesitas (Mendoza). Gerencia de Investigación y Desarrollo YPF. Informe inédito.
- Gressier, J. B., R. Mourgues, L. Bodet, J. Y. Matthieu, O. Galland y P. Cobbold, 2010. Control of pore fluid pressure on depth of emplacement of magmatic *sills*: An experimental approach. *Tectonophysics* 489, p. 1-13.
- Gudnason, J., P. M. Holm, N. Søger, y E. J. Llambías, 2012. Geochronology of the late Pliocene to recent volcanic activity in the Payenia. *Journal of South American Earth Sciences* 37, p. 191-201.
- Jamtveit, B., M. Kobchenko, H. Austrheim, A. Malthesørenssen, A. Røyne, y H. Svensen, 2011. Porosity evolution and crystallization-driven fragmentation during weathering of andesite. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, p. B12204, doi:10.1029/2011JB008649.
- Jiang J.Y., Y. P. Cheng, L. Wang, W. Li y L. Wang, 2011. Petrographic and geochemical effects of *sill* intrusions on coal and their implications for gas outbursts in the Wolonghu Mine, Huaibei Coalfield, China. *International Journal of Coal Geology* 88, p. 55-66.
- Kay, S.M. y P.C. Copeland, 2006. Early to Middle Miocene backarc magmas of the Neuquen Basin: Geochemical consequences of the slab shallowing and the westward drift of South America. En S. M. Kay y V. A. Ramos, (eds.) *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén basin (35°-39°S lat)*. Geological Society of America Special Paper 407, p. 215-246.
- Linares, E. 2001. Catálogo de edades radiométricas de la República Argentina. Parte II: años 1988-2000: Publicaciones Especiales de la Asociación Geológica Argentina.
- Perea D., M. Schiuma y J. Vilosio, 1984. Las rocas ígneas como reservorios de hidrocarburos. *Actas IX Congreso Geológico Argentino*, Tomo VII, p. 21-39. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.
- Rodríguez Monreal, F., H.J. Villar, R. Baudino, D. Delpino, y D. S. Zencich, 2009. Modeling an atypical petroleum system: A case study of hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous intrusions in the Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 26, p. 590-605.
- Royne, A., B. Jamtveit, J. Mathiesen, y A. Malthesørenssen, 2008. Controls on weathering rates by reaction induced hierarchical fracturing, *Earth and Planetary Science Letters*, 275, p. 364-369, doi:10.1016/j.epsl.2008.08.035
- Santos, R. V., E. L. Dantas, C. Gouveia de Oliveira, C. J., Souza de Alvarenga, C. W. Dias dos Anjos, E. Mendes Guimarães y F. B. Oliveira, 2009. Geochemical and thermal effects of a basic *sill* on black shales and limestones of the Permian Iratí Formation. *Journal of South American Earth Sciences* 28, p. 14-24.

Schiuma, M., 1994. Intrusivos del valle del Río Grande, provincia de Mendoza, su importancia como reservorios de hidrocarburos. Tesis doctoral Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo.

Silvestro, J. y M. Atencio, 2009. La Cuenca Cenozoica del río Grande y Palauco: Edad, evolución y control estructural. Faja plegada de Malargüe (36°S). Revista de la Asociación Geológica Argentina 65, p. 154-169.