

CONTROLES ESTRUCTURALES Y MAGMÁTICOS EN RESERVORIOS DE LA FORMACIÓN MULICHINCO EN EL YACIMIENTO VOLCÁN AUCA MAHUIDA, PROVINCIA DE NEUQUÉN, ARGENTINA

Sabina Chiacchiera¹, Soledad Ribas² y Darío L. Orts³

1: Instituto de Recursos Minerales (CIC-INREMI) Universidad Nacional de La Plata. sabina.chiacchiera@gmail.com

2: YPF S.A. soledad.ribas@ypf.com

3: Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de Río Negro). dorts@unrn.edu.ar

Palabras clave: Sistema Petrolero Atípico, Vulcanismo, Cuenca Neuquina, Volcán Auca Mahuida

ABSTRACT

The Auca Mahuida volcano, 37°45'S and 68°56'W, is developed northeast of the Neuquén basin, in the Neuquén Embayment. The sedimentary filling of the basin in this area comprises a petroleum system which was affected for a Pliocene – Pleistocene magmatism. The analysis of well data, satellite images and geological background information has allowed interpretation of structures in an area located northeast of the main crater, and establishes the control they exert together with the magmatism in the reservoir conditions of the Mulichinco Formation. This work shows that borehole imaging and satellite images constitute an essential tool in areas where seismic acquisition is not applicable due to the topography and the high acoustic impedance of the upper basaltic cover. The identified intrusive bodies have the same strike and dip that the previous structures which indicates that the magmas used these ways to intrude. Because of the structural study focused on the Mulichinco Formation, four blocks that disconnect the fluid in the reservoirs were defined. The petrophysical conditions were not altered by metamorphism but the presence of hydrothermal activity produced a hydrocarbon remigration. Large amounts of gas indicate that the increased heat generated by the intrusion, increased the maturation in source rocks, going from the oil window to the gas window. The study of the fluids and their interaction with the subsurface structure allows expanding the knowledge of the structural model and to give a greater precision in the development of the oilfield.

INTRODUCCIÓN

El volcán Auca Mahuida de edad pliocena - pleistocena se ubica al noreste de la provincia de Neuquén. Es un centro eruptivo que pertenece al sector más austral de la Provincia Volcánica de Retroarco de Payenia (Fig. 1) y que en esta región se encuentra emplazado en las sedimentitas de la Cuenca Neuquina.

Las intrusiones ígneas se presentan en muchas cuencas sedimentarias donde la explotación

y exploración de hidrocarburos se desarrolla activamente (Senger *et al.* 2017). Esta actividad magmática puede afectar de manera positiva o negativa a cualquiera de los componentes del sistema petrolero. Los yacimientos Volcán Auca Mahuida y Risco Alto – Las Manadas (Fig. 2, arriba) pertenecen a uno de los tantos casos donde un magmatismo posterior se emplazó y generó modificaciones sobre la estructura, las rocas y fluidos preexistentes.

La complejidad estructural asociada al volcán y el interés petrolero, han dado lugar a numerosos estudios y a la propuesta de diversos modelos que explican la evolución de la zona (Pallares *et al.* 2016; Longo 2017; Ventura *et al.* 2013). En este contexto, el presente trabajo incorpora el estudio de un pequeño sector ubicado al noreste del cráter principal (Fig. 2, abajo). Mediante el análisis de diferentes perfiles de pozo, información regional e interpretación por imágenes se busca esclarecer el comportamiento estructural de los cuerpos intrusivos y su correlación con la estratigrafía y el sistema petrolero de la zona. Además, se hace hincapié en los reservorios de la Formación Mulichinco que son los que poseen el principal interés productivo en la actualidad.

MARCO GEOLÓGICO

El volcán Auca Mahuida es el edificio más austral de la Provincia Volcánica de Retroarco de Payenia, que se extiende a unos 400 km al este de la cordillera de los Andes entre los 35°E y 38°S de latitud (Ramos y Kay 2006). Las causas de este evento se deben a una pluma mantélica que fue “arrollada” (*overriding*) por la placa sudamericana, haciendo migrar el vulcanismo durante el Plioceno y el Cuaternario (Gianni *et al.* 2017) (Fig. 3). Los principales eventos ígneos ocurrieron bajo regímenes extensionales que generaron fracturas profundas, necesarias para el levantamiento de los fluidos desde grandes profundidades (Longo *et al.* 2015).

El campo volcánico del Auca Mahuida (37° 44' S, 68° 55' O) consiste en un *plateau* de flujos de lava de orientación E – O con un espesor cercano a los 900 m en su punto más alto, coincidente con el cráter principal. Sobre las coladas se despliegan numerosos conos parásitos orientados también en sentido E – O (Ventura *et al.* 2013). El mismo se encuentra emplazado sobre las sedimentitas de la Cuenca Neuquina, una columna sedimentaria de más de 6 km de espesor que incluye rocas marinas y continentales. La historia evolutiva de la cuenca comienza a fines del Triásico, cuando el margen centro-oeste de la placa de América del Sur estaba sometido a procesos tectónicos extensionales asociados al desmembramiento de Pangea. Como resultado se generaron hemigraben de rumbo noroeste. Luego, en una etapa de *syn-rift* se depositaron secuencias intercaladas de sedimentos volcánicos y continentales. Durante el Jurásico Inferior se restableció en el margen occidental de Gondwana un sistema de subducción, desarrollando el primer arco magmático mesozoico y la formación de cuencas de intra-arco y retroarco, caracterizadas por depósitos de ambientes mayormente marinos. Desde el Jurásico Medio hasta el Cretácico Inferior la Cuenca Neuquina se comportó como una cuenca de retroarco y, hacia

fin del Cretácico Temprano, debido al levantamiento de la Cordillera de los Andes se convirtió en una cuenca de antepaís (Casadío y Montagna 2015). El proceso de levantamiento cordillerano produjo el retiro definitivo de las ingresiones provenientes del Pacífico y permitió la ingresión marina del Océano Atlántico durante el Cretácico Tardío. La reactivación de la faja plegada y corrida durante el Mioceno marcó la culminación de la estructuración de la cuenca (Ramos 1999; Ramos y Folguera 2005).

Dentro de la zona de estudio, la Formación Mulichinco (Valanginiano inferior a Valanginiano superior) destaca debido a que actualmente es el principal reservorio del activo. Son areniscas con porosidad promedio de 18% (Vottero y González 2002) mientras que la permeabilidad varía entre 5 a 280 mD (Malimachi *et al.* 2017). Se caracterizan por una alta continuidad areal y dispuestas de manera tabular, separadas por niveles impermeables finos (sellos locales). Apoya en contacto neto sobre los depósitos de la Formación Quintuco, base que se asigna a la discontinuidad Intravalanginiana (Gulisano *et al.* 1984). Esta formación se divide en cuatro intervalos informales (con los que se trabajará a lo largo de todo el trabajo) que, de base a techo, son: Intervalos verde, azul, rojo (subdivido en rojo inferior, rojo medio y rojo superior), e intervalo amarillo (Schwarz *et al.* 2008).



Figura 1. Ubicación del vulcanismo de la Provincia Volcánica de Retroarco de Payenia. En el recuadro verde, localización del volcán Auca Mahuida. Imagen tomada y modificada de Ramos y Folguera (2011).

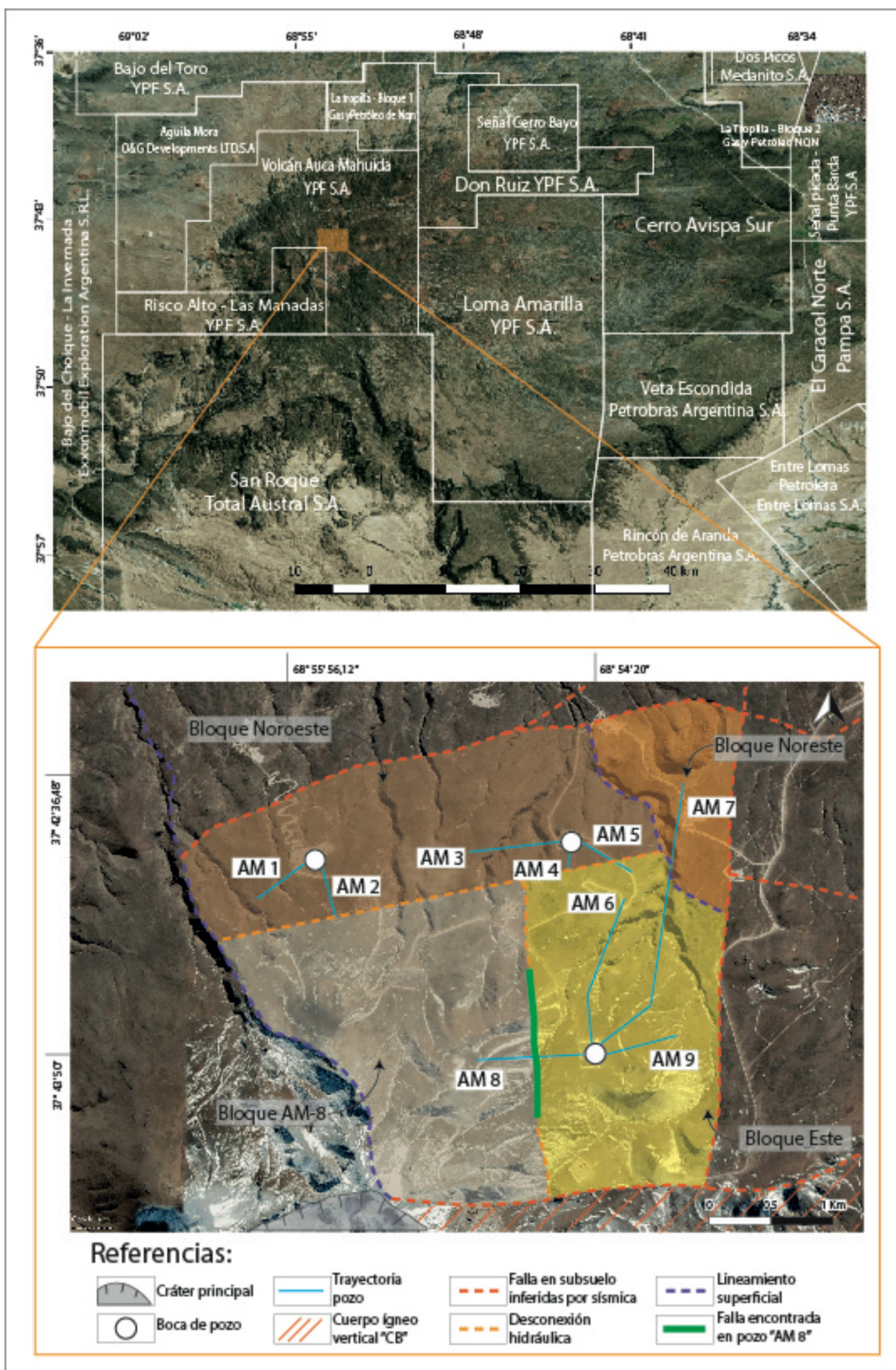


Figura 2. Arriba: imagen satelital de Google Earth del volcán Auca Mahuida con las diferentes concesiones de hidrocarburos de la región (obtenidos de la Subsecretaría de Energía, Minería e Hidrocarburos de la provincia de Neuquén). En naranja el área de estudio del presente trabajo. Abajo: imagen de la zona de estudio. En colores se dividen los cuatro bloques hidráulicamente desconectados discutidos en este trabajo. Imagen obtenida de Google Earth.

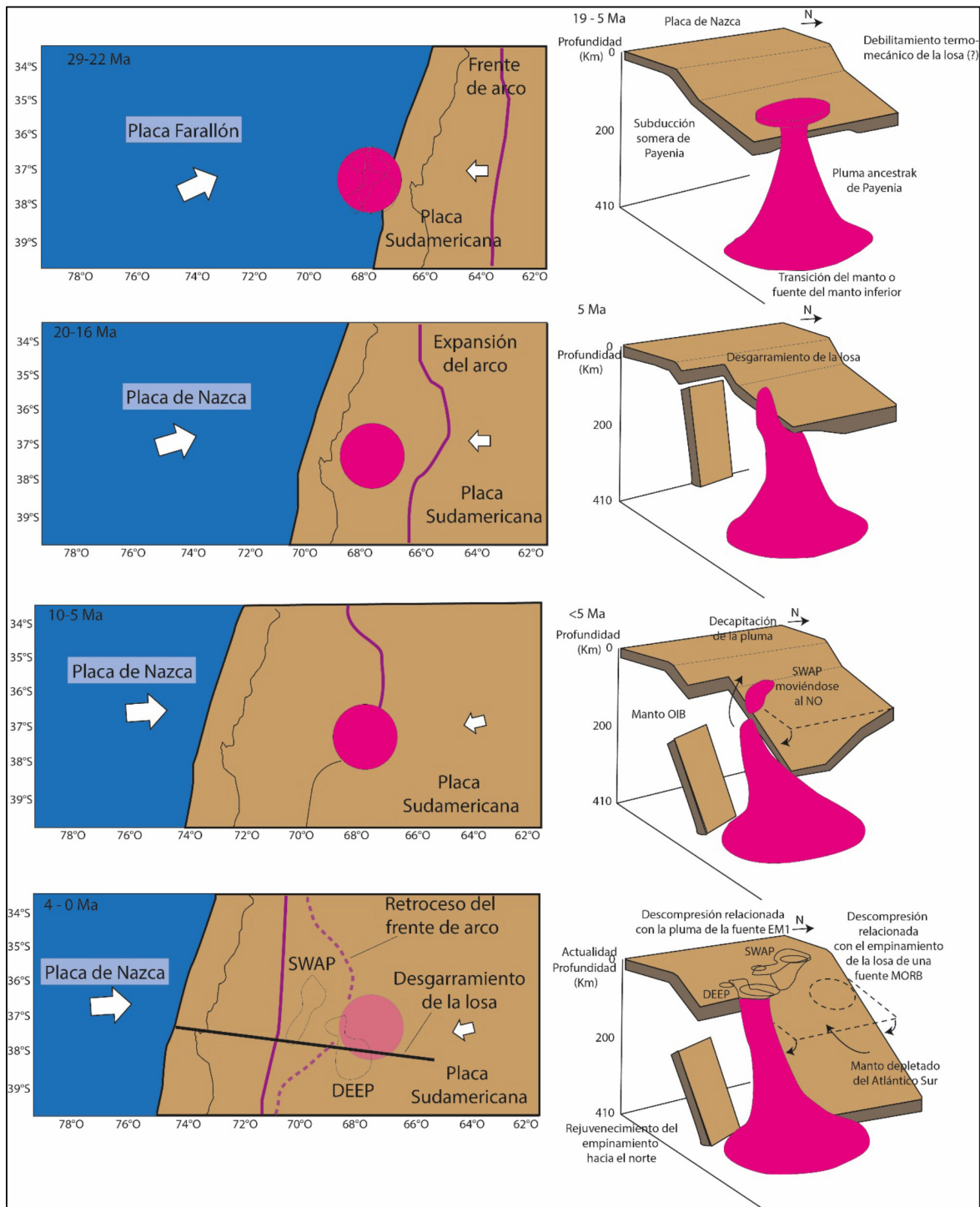


Figura 3. Izquierda: reconstrucción de la migración de las placas y de la primera pluma única durante el Neógeno con su posterior separación en dos plumas, denominadas SWAP y DEEP. Derecha: modelo geológico propuesto que relaciona la subducción de la pluma de Payenia, la somerización de la losa y posterior desgarramiento, empinamiento y decapitación de la pluma. Tomado y modificado de Gianni *et al.* (2017).

En este trabajo, los pozos perforados llegan hasta el techo de la Formación Quintuco atravesando las formaciones Mulichinco, Centenario, Rayoso, Grupo Neuquén y la cobertura basáltica, además de diferentes cuerpos intrusivos productos del vulcanismo (Fig. 4).

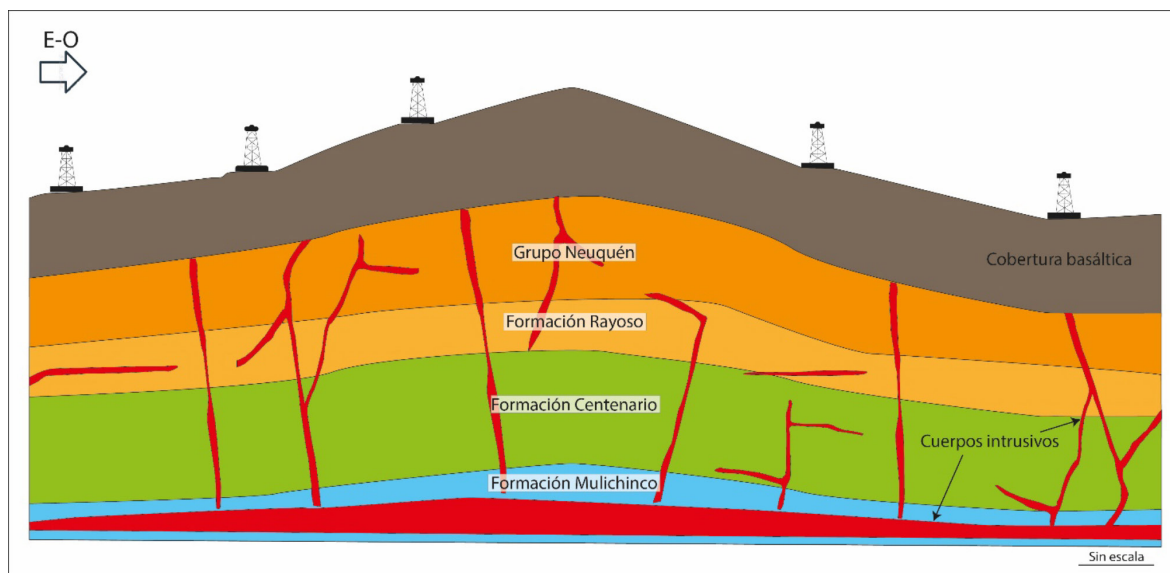


Figura 4. Esquema de corte transversal E-W representativo del yacimiento Volcán Auca Mahuida. En marrón oscuro la cobertura basáltica. En colores, las diferentes formaciones de la cuenca Neuquina alcanzadas por los pozos petroleros y en rojo una representación esquemática de los cuerpos intrusivos.

METODOLOGÍA

Para comprender la metodología utilizada cabe destacar la ausencia de adquisición sísmica debido a la complejidad topográfica, la capa basáltica y las limitaciones de trabajar sobre un área de reserva natural. La información 2D y 3D sólo abarca la zona norte del volcán y la calidad disminuye a medida que se acerca al cráter principal. En el corriente trabajo se usaron perfiles de pozo convencionales y tipo VSP *Walkaway* sólo en uno de ellos, además, procesamiento de imágenes y perfiles de imágenes. El foco de estudio se dio dentro de la Formación Mulichinco, de la cual se seleccionaron los intervalos azul, verde, rojo superior y amarillo. Se descartó el sub-intervalo rojo inferior y medio debido a que carecían de espesor por encontrarse un cuerpo intrusivo de gran volumen dentro de los mismos.

Sistema de información geográfica

En primera instancia se confeccionó un GIS donde se colocaron imágenes satelitales de Google Earth y una imagen ASTER, obtenida de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). Se ploteó, la recopilación bibliográfica, reportes internos

y los datos estructurales en los pozos. Finalmente mediante las combinaciones de banda RGB-631 en la imagen ASTER se determinaron posibles lineamientos superficiales (Fig. 5). Como información adicional, se conoce un pozo muy cercano al área de estudio, el cual, a lo largo de toda su longitud se conforma de roca ígnea. Por tal motivo, se lo ha definido como un dique vertical denominado: Intrusivo CB (Roth 2017).

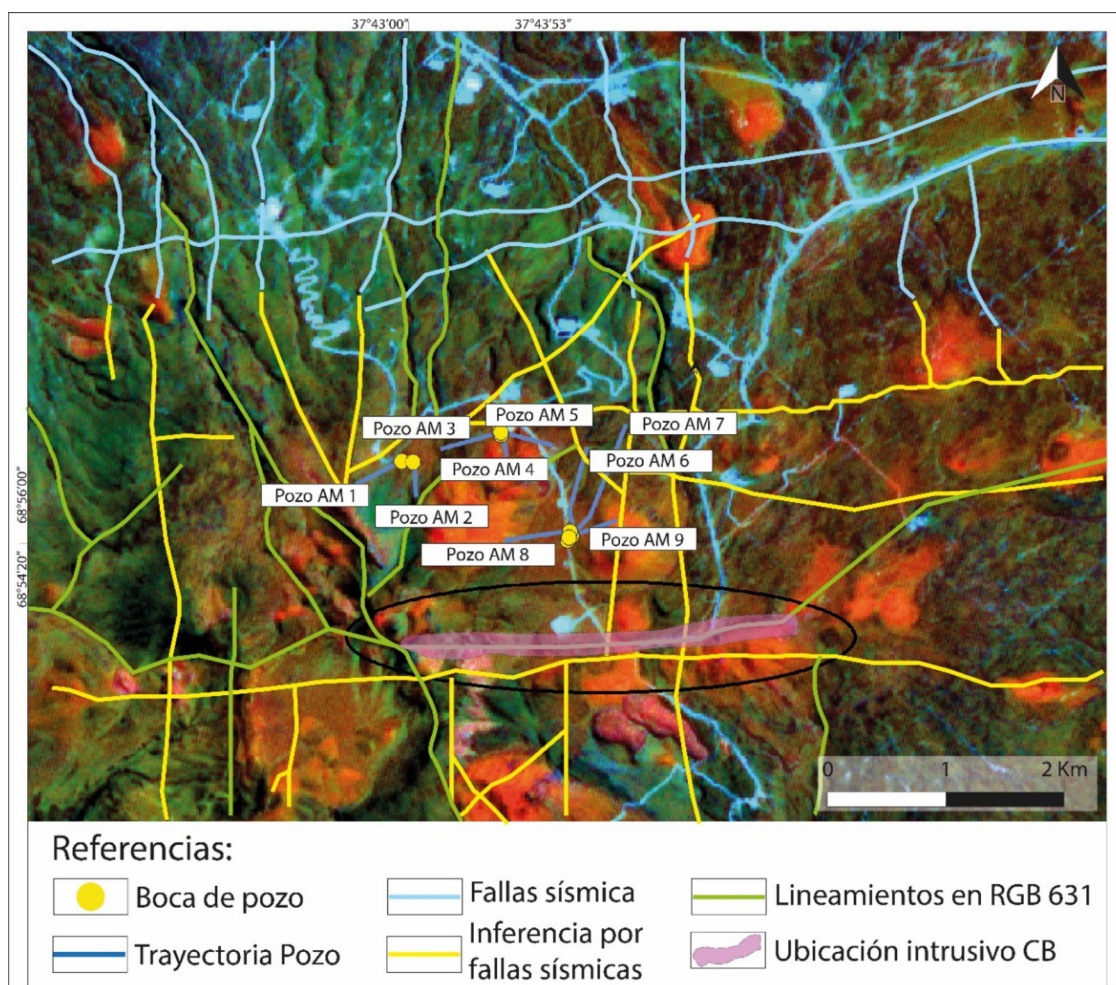


Figura 5. Lineamientos definidos utilizando la combinación RGB-631, sumada la información previa. Dentro del elipse negro lineamiento que se condice con la información de pozo del intrusivo CB.

Perfiles de pozo

Para el trabajo con perfiles se utilizó *software* adecuado y se trabajó con los pozos AM 1 a AM 9. Los perfiles eléctricos utilizados fueron: rayos gamma, resistividad, densidad y neutrón. Con esta información, registros de *cutting* e informes internos (Roth 2017) se identificaron los pases formacionales de las formaciones discutidas en el marco geológico y los cuerpos ígneos. Además,

los pozos AM 1 y AM 8 cuentan con perfiles de imágenes que facilitan la delimitación de cuerpos intrusivos junto con su inclinación real. Finalmente, se utilizó un VSP Walkaway realizado en el pozo AM 8 el cual registra una imagen sísmica sobre el plano de trayectoria del pozo para conocer posibles desvinculaciones de bloques (Fig. 6).

Ensayos y contactos de fluidos

Mediante los punzados que realizó la empresa a fin de conocer los fluidos en los reservorios, se identificaron los fluidos en cada pozo dentro de la Formación Mulichinco y se analizaron los contactos entre ellos. En capas sin datos de ensayos se interpolan los fluidos definidos en los pozos vecinos para esa misma cota estructural. Incorporando estos datos se pudieron definir discontinuidades hidráulicas.

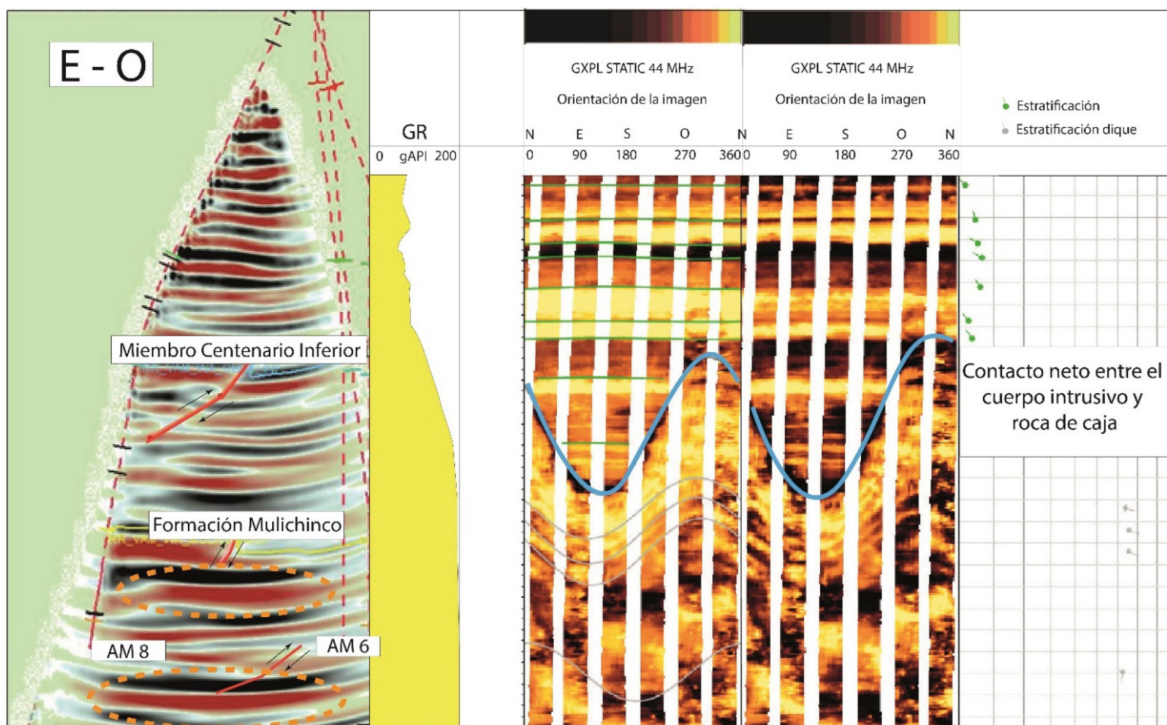


Figura 6. Izquierda: VSP Walkaway visto en dirección E-O donde se observan fallas indicadas con líneas rojas y en elipses de líneas punteadas naranjas cuerpos intrusivos de gran potencia. El intrusivo en Formación Mulichinco es el mismo encontrado a lo largo de todos los pozos. Por debajo un intrusivo no alcanzado por los pozos que podría dar indicios que en las formaciones Quintuco y Vaca Muerta también hay emplazamiento de estos cuerpos. Tomado y modificado de Roth (2017). Derecha: Fragmento de un perfil de imagen del pozo AM-8 mostrando como se observan los intrusivos con la posibilidad de determinar su inclinación.

Mapas

Para volcar de manera gráfica la información se confeccionaron diferentes tipos de mapas: isopáquicos, de porosidad efectiva, espesor útil, contacto de fluidos y estructurales (Fig. 7), siendo los últimos los de mayor interés ya que en estos se trabajó la información geográfica y los ensayos de fluidos.

Mediante datos calculados en el *software* sobre porosidad efectiva y saturación de agua y los ensayos de producción de pozo se corroboró que estos espesores sean potencialmente productores de hidrocarburos. Además, se consideraron los mapas de contacto de fluidos (para saber qué grado de desconexiones hidráulicas había). Con estos datos, se generó una vista en planta donde se proyectaron:

- Ubicación de las bocas de pozo y sus desviaciones.
- Fallas interpretadas a partir de información sísmica que están disponibles al norte del área de interés.
- Fallas inferidas por pozos cercanos que no se encuentran dentro de esta área de estudio.
- El intrusivo CB, el cual no pertenece a este trabajo, pero marca una desconexión de bloques al sur del área.
- Una falla N-S fue obtenida en el pozo AM-8(a) mediante el VSP Walkaway (Fig. 6).
- Desconexión hidráulica que ocurre entre los fluidos de los pozos.

El resultado fue la delimitación de cuatro bloques en el área de estudio (Fig. 2) denominados: Bloque Noroeste, Bloque Noreste, Bloque AM-8 y Bloque Este.

RESULTADOS

Intrusivos

Se identificaron diques y filones capa de espesores entre 0,4 m a 30 m (con excepción de un cuerpo alojado en Formación Mulichinco que triplica estos valores). Mediante estudios sobre el *cutting* (Ribas *et al.* 2018) e interpretación de perfiles de pozo (Delpino y Bermúdez 2009) se determinó que la composición varía entre rocas traquíticas, traquiandesíticas y algunas sieníticas. Los pozos AM 2 y AM 8 son los que albergan la mayor cantidad de intrusivos, fenómeno que podría explicarse debido a la proximidad con el cráter principal.

La mayoría de los cuerpos intrusivos se encuentran intruyendo areniscas aunque estudios previos indican que los mismos tienden a instruir secciones pelíticas, aprovechando planos preexistentes de debilidad que favorecen la intrusión (Longo 2017). Esto podría deberse a que los cuerpos ígneos canibalizaron las rocas pelíticas durante la intrusión. Estos diques parecen no tener preferencia de intrusión aunque la mayor cantidad se alojan en la Formación Rayoso y el Miembro Inferior de la Formación Centenario. En los pozos en los que se pudieron determinar

orientaciones, poseen rumbo NE-SO y E-O con una dirección de inclinación hacia el S y SO que varía entre 60° a 70° (Figs. 7 y 8). Estas orientaciones son coincidentes con lineamientos y fallas presentes en la superficie del volcán y con fracturas y micro fallas existentes en el subsuelo, por lo que podría asumirse que los cuerpos ígneos aprovecharon planos de debilidades previos.

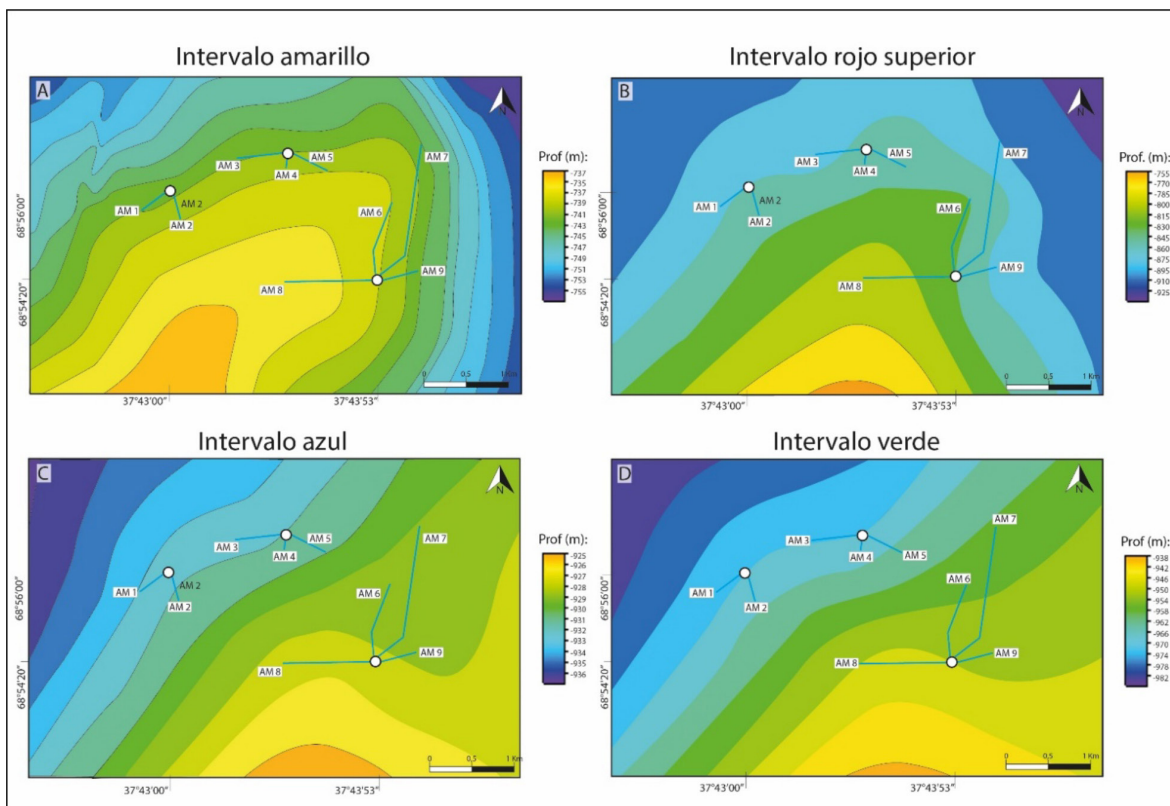


Figura 7. Mapas estructurales de los intervalos informales estudiados de la Formación Mulichinco.

Con un espesor de 50 m en los bordes a 100 en el centro, el intrusivo de mayor espesor se encuentra ubicado en la Formación Mulichinco (Figs. 8 y 9). El mismo tiene composición sienítica en base al análisis de *cutting* (Ribas *et al.* 2018) e interpretación de perfiles de imágenes (Delpino y Bermúdez 2009). Mediante la correlación regional de pozos se puede determinar que este intrusivo genera un cambio en la estructura local. En el Miembro Centenario Inferior y la Formación Mulichinco, la estructura imperante es de tipo anticlinal (Fig. 5) mientras que en la Formación Quintuco la estructura cambia a tipo monoclin. Para la Formación Mulichinco se observa los mismos cambios entre los intervalos por debajo y por encima del intrusivo. Esta peculiaridad junto a su espesor hacen considerarlo como un cuerpo de tipo lacolito.

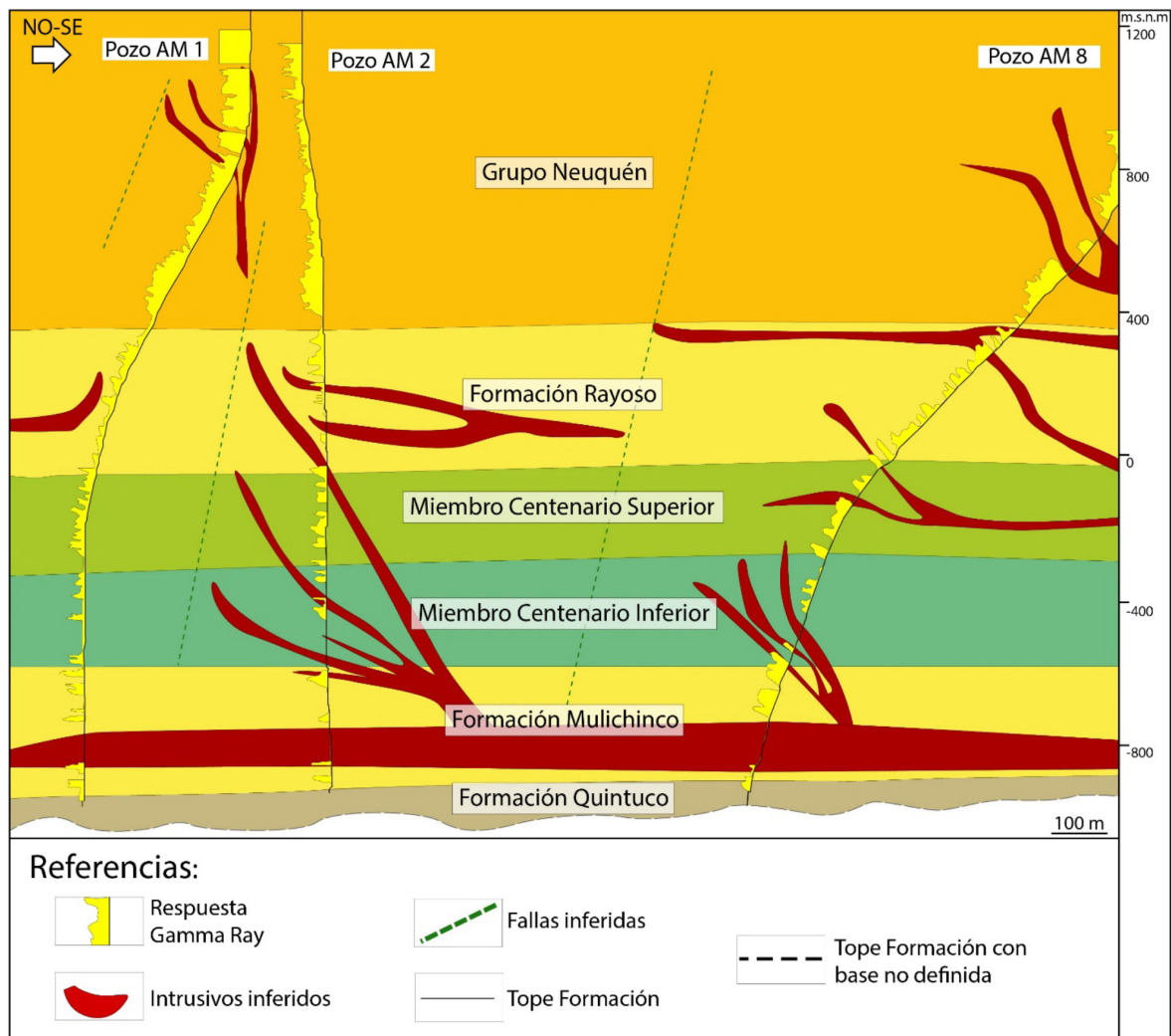


Figura 8. Transecta esquemática en dirección NO-SE realizada entre los pozos AM 1, AM 2 y AM 8 sobre los cuales se realizó una interpretación de la posible disposición de cuerpos intrusivos propagándose desde el intrusivo de la Formación Mulichinco en base a datos de perfiles de imágenes. En líneas discontinuas fallas inferidas de alto ángulo que explican desconexiones hidráulicas y desapariciones de las rocas ígneas de un lado a otro de los pozos.

En el extremo sur del área de trabajo se ubica el intrusivo CB (Figs. 2 y 8). De composición traquítica con rumbo E-O e inclinación vertical, el cual fue perforado por el pozo externo al área de trabajo (Fig. 4). Aunque los ejemplos de diques como alimentadores sean escasos, existen algunos ejemplos (Eide *et al.* 2016; Galland *et al.* 2018) por lo que se podría considerar a este cuerpo como el posible conducto alimentador (Fig. 10), ya que un poco más al sur del mismo el lacolito desaparece (Ribas *et al.* 2018). De todos modos, se requerirían estudios geoquímicos para sostener esta presunción y vincular ambos cuerpos.

Según trabajos de varios autores (Galland *et al.* 2018; Senger *et al.* 2017; Spacapan *et al.* 2016; Spacapan *et al.* 2018) cuando los cuerpos ígneos son emplazados en cuencas sedimentarias productivas, éstos pueden tener fuertes efectos en la exploración y producción de hidrocarburos.

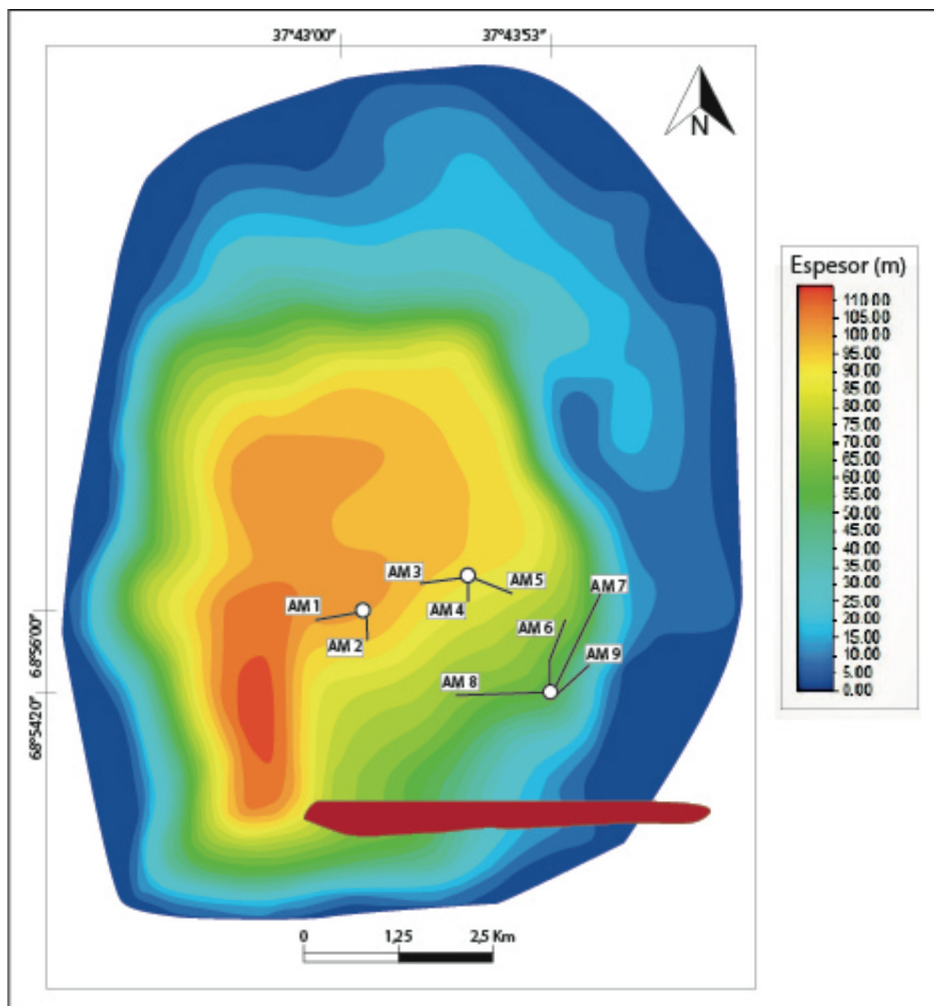


Figura 9. Mapa de espesor del lacolito de Formación Mulichinco. En bordó se muestra la interpretación del intrusivo CB. Tomado y modificado de Ribas *et al.* (2018).

Además, también se ha comprobado que, a pesar de que las rocas intrusivas sean poco permeables, la fracturación por diferentes procesos puede potenciar su condición como rocas reservorios (op. Cit.). En el caso del lacolito en la Formación Mulichinco y de los diques que atraviesan toda la columna sedimentaria estudiada, no se encuentran alojados en la roca madre de la cuenca productiva, sino en areniscas que son los reservorios de este sistema petrolero. Ensayos de terminación de pozos sobre el lacolito, al norte del área de estudio, han dado resultados negativos para obtención de hidrocarburos, por lo que, si estos intrusivos no se alojan en rocas ricas en materia orgánica, parecen no actuar como reservorios como han indicado Schiuma y Llambías (2014) para el sur de Mendoza.

Se ha podido observar, que en las areniscas circundantes al lacolito la permeabilidad no posee variaciones respecto a rocas más lejanas, por lo que la intrusión no habría afectado la petrofísica.

Por otra parte, sí se observa una alta saturación de agua que puede deberse al hidrotermalismo. Esto sugiere que los fluidos termales pudieron haber afectado negativamente los reservorios desplazando los hidrocarburos. Otro efecto, es que los intrusivos habrían generado compartimentalización de las rocas reservorios de este sistema petrolero, funcionando de sellos, ya que hay punzados bajo y sobre cuerpos intrusivos donde se observan cambios en los tipos de fluidos.

El VSP *Walkaway* arrojó evidencia de cuerpos de alta reflectancia a profundidades mayores de las alcanzadas por los pozos, posiblemente en las formaciones Quintuco o Vaca Muerta (Fig.6). Esta evidencia también se observa en el trabajo de Longo (2017), quien evidenció anomalías pertenecientes a dos *sills* alojados en Formación Quintuco y Formación Vaca Muerta.

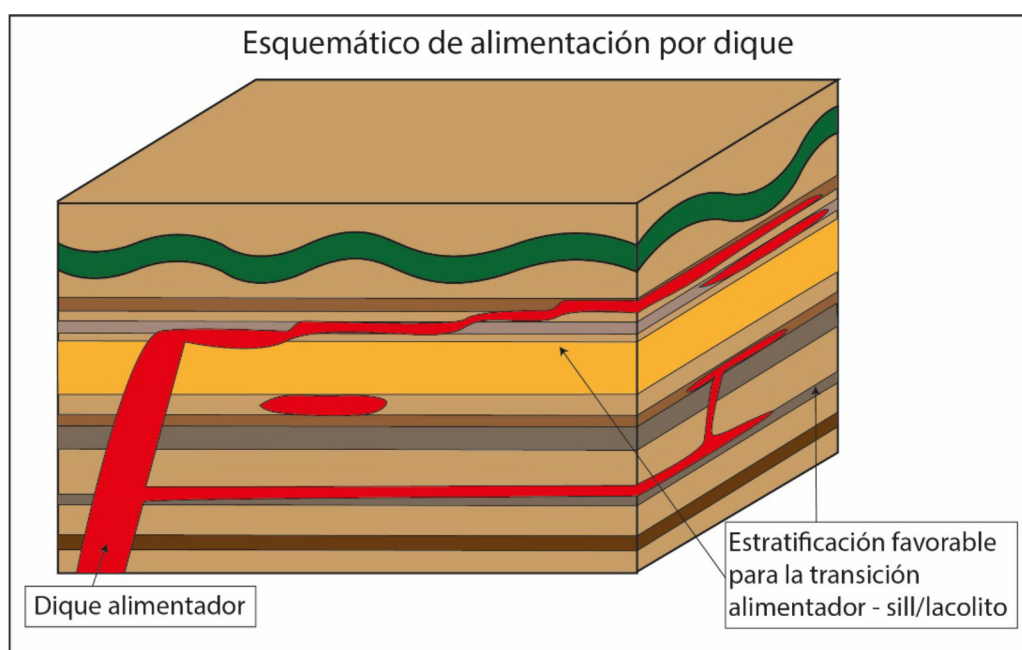


Figura 10. Esquemático que representa la alimentación de cuerpos intrusivos por medio de un dique. Este modelo podría ser similar a la situación discutida en el texto. En rojo se representan los cuerpos intrusivos mientras que en tonos marrones, grises, naranjas y verdes diferentes componentes de una columna sedimentaria. Ejemplo tomado y modificado de Galland *et al.* (2018).

Estructura

Sobre el volcán Auca Mahuida hay un área de más de 60 km² sin registro sísmico, en donde se encuentra el área de estudio de este trabajo. Mediante informes internos que interpretan la sísmica circundante (Roth 2017) se pudo hacer una extrapolación de la información con ayuda de lineamientos de superficie (Fig. 5). La sísmica junto con la interpretación del área y datos estructurales de pozo, muestran fallas que se corresponden con estructuras de carácter regional o local descritas por otros autores (Cristallini *et al.* 2014; Longo 2017; Ventura *et al.* 2013). Estas

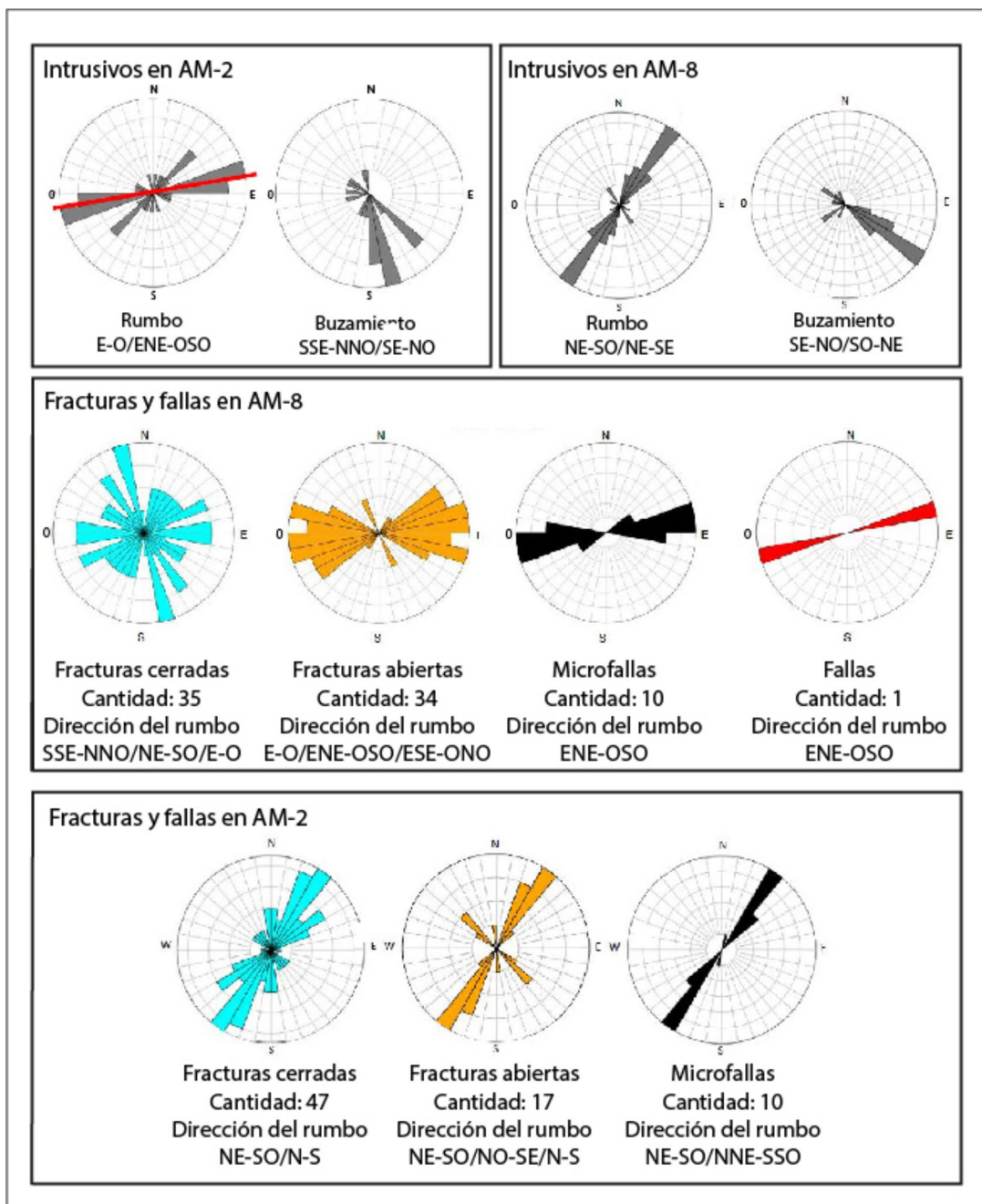


Figura 11. Diagrama de rosas con las orientaciones de los intrusivos, fracturas abiertas, cerradas, fallas y microfallas encontradas en perfiles de imágenes en los pozos AM 2 y AM 8.

son fallas E-O, N-S, NNO-SSE y en menor medida NE-SO y NO-SE.

Por medio de los perfiles de imágenes en el pozo AM 2, se interpretaron 64 fracturas a lo largo de toda la perforación, 47 cerradas y 17 abiertas. Las orientaciones principales son NE-SO con inclinación 70° , en promedio, hacia el SE. Subordinadamente se identificaron orientaciones NO-SE y N-S. La mayoría cuentan con inclinaciones de alto ángulo que superan los 60° , con

pocas excepciones con inclinaciones de 40°. En cuanto a las microfallas se distinguieron 10 en este pozo, con rumbos NE-SO (Fig. 11). En el pozo AM 8, se encontraron 69 fracturas a lo largo de toda la perforación, de las cuales 34 son abiertas y 35 cerradas. La tendencia principal del rumbo que predomina en este pozo es ENE-OSO. En mucha menor medida, y con mayor frecuencia en las fracturas cerradas, el rumbo es NO-SE. La mayoría de las fracturas cerradas poseen alto ángulo de inclinación, cercanos a 90° pero este ángulo disminuye para las fracturas abiertas (50° en promedio). En cuanto a las microfallas, también se encontraron 10 con orientaciones ENE-OSO y una falla de igual rumbo con inclinación de 70° hacia el SSE. El ángulo de inclinación de estas tiene un rango de desde 40° a 90° hacia el SSE (Fig. 11).

Fluidos del sistema petrolero

El estudio de la estructura del terreno y los fluidos encontrados en los ensayos de pozos permitió la delimitación de cuatro bloques hidráulicamente independientes (Fig. 2) que desvinculan a la Formación Mulichinco en todas sus capas.

Los pozos puestos en producción extraen petróleo, fluido que se encuentra en los estratos superiores tanto de Formación Mulichinco como de Formación Centenario. Mediante ensayos previos, se conoce que el pozo AM 8 posee volúmenes de gas considerables, actualmente en reserva. Aunque las calidades del gas del yacimiento Volcán Auca Mahuida no sean óptimas ya que posee demasiado CO₂ (com. pers Ribas 2019) la empresa podría utilizarlo para sus propias instalaciones y así, evitar la compra del mismo.

La porosidad efectiva es muy similar en los cuatro intervalos descriptos para la Formación Mulichinco. Posee un mínimo de porosidad de 10 – 11% en el centro de los mapas y un crecimiento hacia los laterales este y oeste. Las máximas porosidades se encuentran en el intervalo amarillo, con un máximo de 15%. Estas heterogeneidades vistas en mapas de porosidad realizados parecen corresponder a variaciones faciales propias de la formación donde la intervención del intrusivo no ha sido responsable de una alteración. Este escenario es comparable a la descripción de Smallwood y Harding (2009) de un *sill* que se encuentra en la cuenca de Faroe-Shetland en el Atlántico Norte. El proceso que parece ocurrir en estas sedimentitas tiene que ver con la liberación de fluidos que podrían haber desplazado los hidrocarburos de las areniscas.

La evidencia descripta de diques aprovechando planos de debilidad previos puede ser correlacionado con el trabajo de Magee *et al.* (2013) que propone que muchas zonas de fallas son aprovechadas para la propagación del magma. En cuanto a su efecto como sellos y compartimentarización de reservorios puede correlacionarse con el trabajo de Holford *et al.* (2013) y la compartimerización tipo *Box-Work* (Fig. 12). Como las fallas suelen generar trampas estructurales, esto tiene implicaciones directas tanto en la destrucción de tales trampas como en el posible desarrollo de zonas permeables. A su vez, las intrusiones pueden establecer nuevos

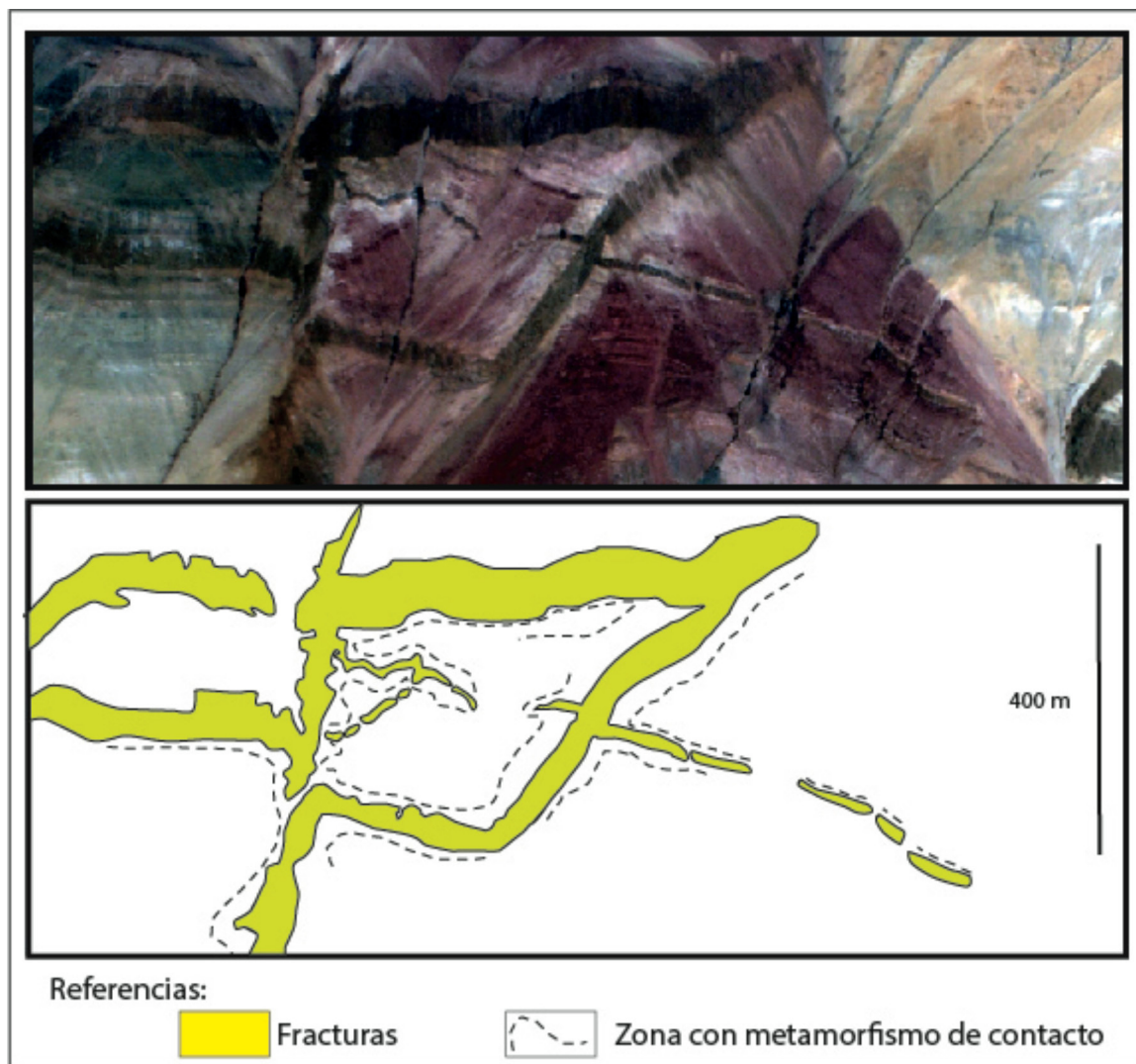


Figura 12. Ejemplo análogo de compartimentalización tipo *Box-Work* por diques y *sills* en un estrato sedimentario en el este de Groenlandia. Tomada y modificada de Holford *et al.* 2013.

caminos de migración si están fracturadas y son permeables o pueden actuar como barreras, como se observa en sellos generados por intrusivos dentro de los pozos con perfiles de imágenes. La Figura 13 resume los diferentes efectos posibles que crean las intrusiones en un sistema petrolero como el estudiado.

DISCUSIÓN Y PROPUESTAS

El hecho de trabajar sobre una zona sin registro sísmico restringe la información y dificulta una interpretación precisa. Por lo tanto, los pozos aportan información valiosa sobre la secuencia estratigráfica, sus características y geometría para conocer un poco más el impacto que sufrió el sistema petrolero a causa de las intrusiones y donde se modificaron destruyeron o generaron vías

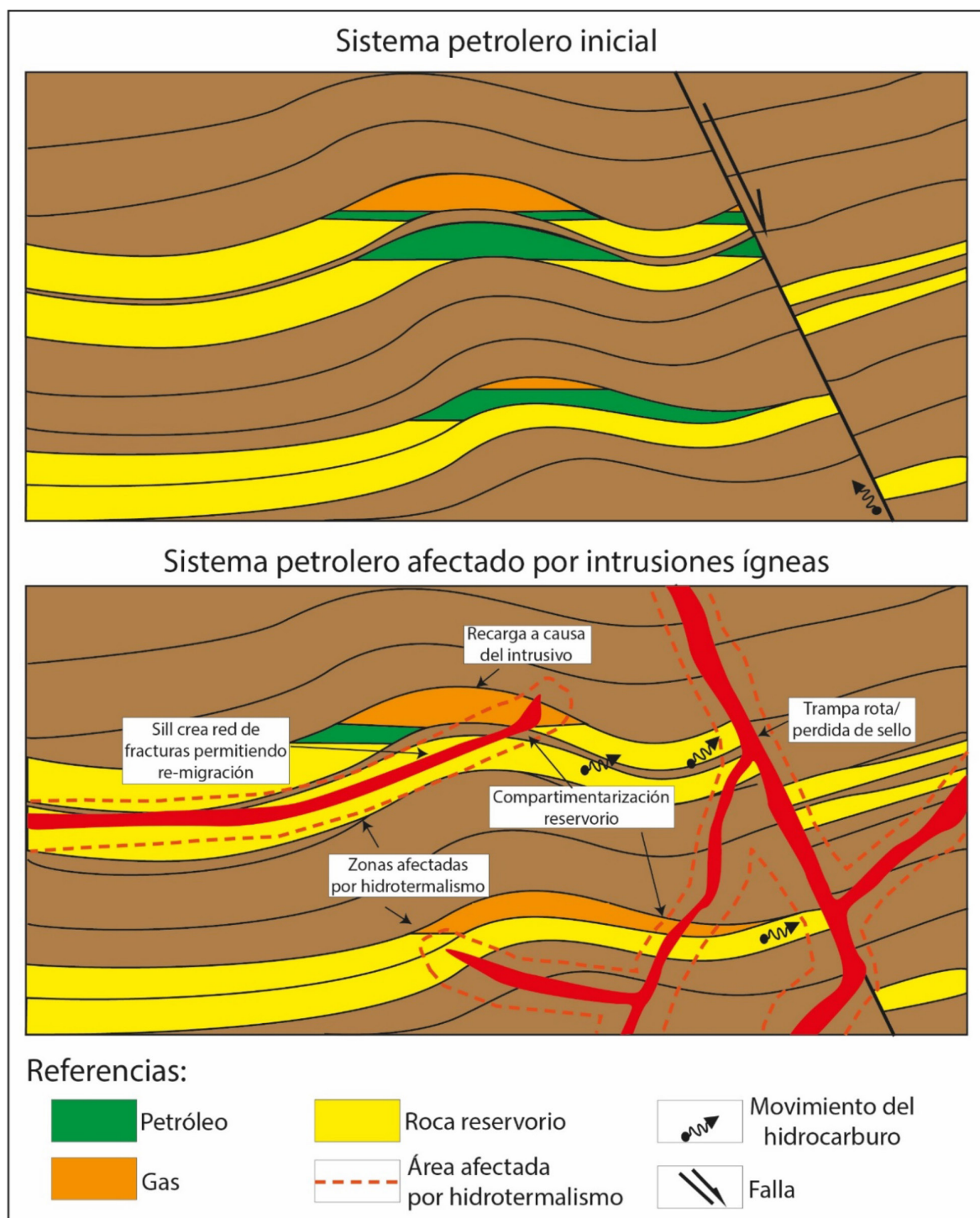


Figura 13. Arriba, funcionamiento del sistema petrolero previo al vulcanismo. Abajo, el mismo sistema en el cual la intrusión aprovechó una falla previa, pero a su vez generó nuevos planos de propagación. Se pueden observar las nuevas rutas migratorias, sellos y trampas. Tomado y modificado de Senger *et al.* (2017).

de migración, sellos y trampas.

La presencia comprobada de cuerpos intrusivos tipo *sills* dentro en Formación Vaca Muerta, supone la posibilidad de que los procesos de metamorfismo de contacto en aceleren o mejoren la maduración de hidrocarburos. Aarnes *et al.* (2010) determinó que el espesor de la aureola de contacto generada en estas rocas corresponde entre un 30% y un 250% del espesor del *sill* e incluso en rocas relativamente pobres en TOC (0,1%Wt) pueden generar cantidades significativas de gas. En el bloque sur del yacimiento Risco Alto – Las Manadas (Aguada San Roque, operado por la compañía Total Austral) existe producción de hidrocarburos de filones capas intruidos en la Formación Vaca Muerta (Ribas, com. pers. 2019). Por lo tanto, la evolución de los pozos a objetivos no convencionales podría ser un nuevo destino para el futuro del yacimiento.

La ausencia de ensayos en el lacolito alojado en la Formación Mulichinco sobre esta zona se traduce en una falta de conocimiento acerca de su comportamiento como roca reservorio. Chevallier *et al.* (2001) propone que las intersecciones entre diques y *sills* (podría ser la intersección entre el dique CB y el lacolito) están asociadas a un mayor fracturamiento y presentan zonas más permeables.

CONCLUSIONES

Los intrusivos identificados mediante el estudio de pozos, poseen las mismas orientaciones que las estructuras identificadas en perfiles de imágenes de pozo, imágenes satelitales y relevamientos sísmicos de zonas aledañas, coincidiendo a su vez con las estructuras descritas en los trabajos previos llevados a cabo en la región (Longo 2017; Pallares *et al.* 2013; Cristallini *et al.* 2014).

Producto del estudio de la estructura, se concluye que el área de interés se divide en cuatro bloques delimitados por barreras impermeables que desconectan los fluidos en los reservorios. Los intrusivos pudieron haber aprovechado las discontinuidades estructurales preexistentes como una vía favorable para su emplazamiento y propagación, resultando en una compartimentalización de las rocas reservorio de tipo *Box-Work*.

En general, el metamorfismo de contacto suele deteriorar las condiciones petrofísicas en los reservorios circundantes; situación que no se observa en las rocas sedimentarias estudiadas afectadas por el lacolito, ya que no se encuentra disminución en su permeabilidad. En su lugar, a partir de la presencia de agua en estos niveles, puede inferirse que la intrusión del cuerpo ígneo ha producido una remigración de los fluidos.

Finalmente, el fluido predominante, en la Formación Mulichinco, corresponde a gas con alto contenido en CO₂. Esto podría deberse al ingreso de la roca generadora a la ventana de gas a causa de la actividad magmática.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a YPF S.A. por proveer la información necesaria, el espacio y el *software* para realizar este trabajo ya que este tema de investigación fue desarrollado por la primera autora durante la ejecución de su Trabajo Final de Licenciatura en Geología.

REFERENCIAS CITADAS

- Aarnes, I., Svensen, H., Connolly, J.A.D. y Podladchikov, Y.Y., 2010. How contact metamorphism can trigger global climate changes: Modeling gas generation around igneous *sills* in sedimentary basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, p.7179–7195.
- Casadío, S. y Montagna, A. O., 2015. Estratigrafía de la Cuenca Neuquina. En Ponce, J. J., Montagna, A. O. y Carmona, N. (eds.), *Geología de la Cuenca Neuquina y sus sistemas petroleros*, 13, pp. 8-21.
- Chevallier, L., Goedhart, M. y Woodford, A.C., 2001. The influences of dolerite *sill* and ring complexes on the occurrence of groundwater in Karoo fractured aquifers: a morpho-tectonic approach. Report 937, Water Resource Commission, 165pp.
- Cristallini, E.O, Tomezzoli, R., Méndez, M.A., Santiago, E., Villar Benvenuto, M. y Ghiglione, F., 2014. Caracterización estructural y evolución tectónica de la región de los cerros Auca Mahuida y Bayo (Provincia del Neuquén). YPF. Informe interno.
- Delpino, D.H. y Bermúdez, A.M., 2009. Petroleum systems including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks (*sills* and laccoliths). *Leading Edge*, N° 28 (7), p. 804-811.
- Eide, C.H., Schofield, N., Jerram, D.A., Howell, J.A., 2016. Basin-scale architecture of deeply emplaced *sill* complexes: Jameson Land. East Greenland. *Journal of the Geological Society*, vol. 174, N° 1, p. 23-40
- Galland, O., Bertelsen, H.S., Eide, C.H., Guldstrand, F., Haug, Ø.T., Leanza, H.A., Mair, K., Palma, O., Planke, S., Rabbøl, O., Rogers, B., Schmiedel, T., Souche, A. y Spacapan, J.B., 2018. Storage and Transport of Magma in the Layered Crust–Formation of *Sills* and Related Flat-Lying Intrusions. En Burchardt, S. (ed), *Volcanic and Igneous Plumbing Systems*, 25 pp.113-138.
- Gianni, G.M., García, H., Lupari, M. Pesce, A. y Folguera, A., 2017. Plume overriding triggers shallow subduction and orogeny in the southern Central Andes. *Gondwana Research*, Vol. 49, p. 387-395.
- Gulisano, C.A., Gutiérrez Pleimling, A. y Digregorio, R.E., 1984. Análisis estratigráfico del intervalo Tithoniano - Valanginiano (Formaciones Vaca Muerta - Quintuco y Mulichinco) en el suroeste de la provincia del Neuquén. 9° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: p.221-235. Buenos Aires, Argentina.
- Holford, S., Schofield, N., Jackson, C., Magee, C., Green, P. y Duddy, I., 2013. Impacts of igneous intrusions on source and reservoir potential in prospective sedimentary basins along the western Australian continental margin. *West Australian Basins Symposium*, p.76-89, Perth, Australia.
- Longo, L. M., De Ritis, R., Ventura, G. & Chiappini, M., 2015, Analysis of the Aeromagnetic Anoma-

- lies of the Auca Mahuida Volcano, Patagonia, Argentina, Pure and Applied Geophysics, N°172, Vol 8, p. 2083-2332.
- Longo, L.M., 2017. Caracterización de la estructura del complejo volcánico Auca Mahuida mediante datos aeromagnéticos y gravimétricos. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas Universidad Nacional de La Plata.
- Magee, C., Jackson, C.A. y Schofield, N., 2013. The influence of normal fault geometry on igneous *sill* emplacement and morphology. *Geology*, N°41, vol 4, p. 407-410
- Malimachi, D., Ribas, S., Paris, M., Grisolia, J y Crespo, G., 2017. New Borehole Imaging for OBM Systems. Auca Mahuida Volcano and Las Manadas Fields, Neuquen, Argentina. Society of petroleum engineers.
- Pallares, C., Quidelleur, X., Gillot, P.Y., Kluska, J.M., Tchilinguirian, P. y Sarda, P., 2016. The temporal evolution of back-arc magmas from the Auca Mahuida shield volcano (Payenia Volcanic Province, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, N° 323, p. 19–37.
- Ramos V.A., 1999. Evolución tectónica de la Argentina. En Caminos, R. (ed.), *Geología Argentina*. Servicio Geológico Argentino, Anales 29, pp. 715-784.
- Ramos V.A. y Folguera, A., 2005. Tectonic evolution of the Andes of Neuquén: Constraints derived from the magmatic arc and foreland deformation En Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A. y Schwarz, E. (eds.), *The Neuquén Basin: A case study in sequence stratigraphy and basin dynamics*. The Geological Society, Special Publication 252, pp.15-35.
- Ramos, V.A. y Folguera, A., 2011. Payenia volcanic province in Southern Andes: an appraisal of an exceptional Quaternary tectonic setting. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* N° 201, p. 53-64.
- Ramos, V.A. y Kay, S.M., 2006. Overview of the tectonic evolution of southern Central Andes of Mendoza and Neuquén (35°-39°S lat). En Kay, S.M. y Ramos, V.A. (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, pp. 1-17.
- Ribas, S., Ghiglione, F., Roth, R., Carrizo, N., Villar, M. y Beatove, M., 2018. Informe modelo geológico Rayoso – Centenario Inferior – Mulichinco. Volcán Auca Mahuida/Las Manadas. YPF. Informe inédito.
- Rossello, E.A., Cobbold, P.R., Diraison, M. y Arnaud, N., 2002. Auca Mahuida (Neuquén basin, Argentina): a quaternary shield volcano on a hydrocarbon-producing substrate, 5th international symposium Andean Geodynam, Extended Abstracts, p.549-552, Toulouse, Francia.
- Roth, R., 2017 Adquisición ZVSP – Walkaway: Pozo AM 8. Baker Hughes. Informe inédito.
- Senger, K., Millett, J., Planke, S., Ogata, K., Eide, C.H., Festøy, M., Galland, O. y Jerram, D.A., 2017. Effects of igneous intrusions on the petroleum system: a review. *First Break*, N°35, p. 47–56.
- Schwarz, E., Veiga, G.D., Vela, R. y Canalis, R., 2008. Paleoambientes y estratigrafía de la Formación Mulichinco en el Yacimiento Volcán Auca Mahuida (Cuenca Neuquina, Argentina). Implicancias para la caracterización de sellos locales. En Schiuma, M. (ed), *VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, p. 1-17. Mar del Plata, Argentina.
- Schiuma, M. y Llambías, E., 2014. Importancia de los *sills* como reservorios en la Cuenca Neuquina del

- sur de Mendoza. IV° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Trabajos técnicos, p. 331-349, Mendoza, Argentina.
- Sigismondi, M.E., 2012. Estudio de la deformación litosférica de la cuenca Neuquina: estructura termal, datos de gravedad y sísmica de reflexión. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.
- Smallwood, J.R. y Harding, A., 2009. New seismic imaging methods, dating, intrusion style and effects of *sills*: a drilled example from the Faroe-Shetland Basin. En Varming, T. y Ziska, H (eds.), Faroe Islands Exploration Conference, II Conference, Annales Societatis Scientiarum Færoensis, 50, pp. 104-123.
- Spacapan, J.B., Galland, O., Leanza, H.A. y Planke, S., 2016. Igneous *sill* and finger emplacement mechanism in shaledominated formations: a field study at Cuesta del Chihuido, Neuquén Basin, Argentina. Journal of the Geological Society, N° 174, p. 422-434.
- Spacapan, J.B., Palma, O., Rocha, E., Leanza, L.A., D'odorico, A., Rojas Vera, E.A., Manceda, R., Galland, O., Medialdea, A. y Cattaneo, D., 2018. Maduración de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio ocasionado por el emplazamiento de un complejo intrusivo magmático en el sector surmendocino de la Cuenca Neuquina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, N°75, p.199-209.
- Ventura, G., De Ritis, R., Longo, M y Chiappini, M., 2013. Terrain characterization and structural control of the Auca Mahuida volcanism (Neuquén Basin, Argentina). International Journal of Geographical Information Science. Vol. 27, No. 7, p.1469-1480.
- Vottero, A.J. y González, J.M., 2002. Los reservorios de la Formación Mulichinco. En Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (eds.), Rocas Reservorio de las Cuencas productivas de la Argentina, V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 383 -400, Mar del Plata, Argentina.

