

Maduración de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio ocasionado por el emplazamiento de un complejo intrusivo magmático en el sector sur mendocino de la Cuenca Neuquina

Juan B. SPACAPAN^{1,2}, J. Octavio PALMA^{1,3}, Emilio ROCHA², Héctor A. LEANZA^{1,4}, Alejandro D´Odorico², Emilio A. ROJAS VERA², René MANCEDA³, Olivier GALLAND⁵, Adrián MEDIALDEA² y Diego M. CATTANEO²

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas. (CONICET)

² YPF. Emails: juanbspacapan@set.ypf.com, emilio.rocha@ypf.com, alejandro.dodorico@ypf.com, emilio.a.vera@ypf.com, adrian.medialdea@ypf.com, diego.m.cattaneo@ypf.com

³ YPF-Tecnología (Y-TEC). Emails: octavio.palma@ypftecnologia.com, rene.e.manceda@set.ypf.com

⁴ Museo Argentino de Ciencias Naturales (MACN – CONICET). Email: hleanza@macn.gov.ar

⁵ PGP - Universidad de Oslo, Noruega, Email: olivier.galland@geo.uio.no

RESUMEN

La existencia de complejos intrusivos en cuencas sedimentarias ha sido documentada en varias cuencas en distintas partes del mundo. Generalmente se emplazan en rocas ricas en materia orgánica, produciendo la maduración de la misma. Además, el emplazamiento puede generar vías de migración de fluidos, estructuras que pueden ser posibles trampas de hidrocarburos, y pueden ser reservorios fracturados. Este trabajo se focalizará en el impacto térmico y la consecuente generación de hidrocarburos producidos por el emplazamiento de un complejo intrusivo. Para ello se escogió el sector surmendocino de la Cuenca Neuquina, dónde existen gran cantidad de intrusiones ígneas emplazadas en las rocas generadoras del Grupo Mendoza (Formaciones Vaca Muerta y Agrio) y en sedimentitas continentales del Grupo Neuquén. Se realizó la identificación de intrusivos mediante datos de sísmica y pozos. Se confeccionó una sección estructural de la zona de estudio, para luego realizar los modelos termales. Los resultados de las modelizaciones muestran que el emplazamiento de intrusivos genera la maduración de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio, especialmente donde se produce una clusterización de los intrusivos. Éste efecto está regulado por la temperatura de la roca de caja al tiempo del emplazamiento, la edad del emplazamiento y el solapamiento de las intrusiones. Se concluye que en la región surmendocina de la Cuenca Neuquina, las Formaciones Vaca Muerta y Agrio se encuentran maduras por el impacto térmico de un complejo intrusivo, pudiendo llegar a generar cantidades considerables de hidrocarburos.

Palabras clave: *filones capa, hidrocarburos, sistema petrolero, modelamiento termal, Grupo Mendoza.*

ABSTRACT

Maturation of the Vaca Muerta and Agrio Formations due to the emplacement of magmatic intrusive complexes in the southern Mendoza region of the Neuquén Basin.

The existence of intrusive-complexes in sedimentary basins has been documented in many basins all around the world. Generally, they are emplaced in organic rich rocks, producing their maturation. Also, the emplacement can generate fluid's migration conduits, structures that can be hydrocarbon traps, and fractured reservoirs. This paper will focus on the thermal impact and the consequent hydrocarbon generation produced by the emplacement of an intrusive-complex. For that aim, we have chosen the southern Mendoza area of the Neuquén Basin, where a great quantity of igneous intrusions are emplaced in the source rocks of the Mendoza Group (Vaca Muerta and Agrio Formations), and in continental sedimentites of the Neuquén Group. The identification of the intrusives was made based on seismic and borehole data. We produced a structural section of the study area, which was used afterwards to make the thermal models. The results of our modellings show that the emplacement of intrusives generates the maturation of the Vaca Muerta and Agrio Formations, especially where a clustering of the intrusions is produced. This effect is regulated by the temperature

of the host rock at the time of emplacement, the age of the emplacement, and the clustering of intrusions. We conclude that in the southern Mendoza region of the Neuquén Basin, the Vaca Muerta and Agrio Formations were matured because of the thermal impact of an intrusive complex, being able to generate considerable amount of hydrocarbons.

Keywords: *sills, hydrocarbons, petroleum system, thermal modeling, Mendoza Group*

INTRODUCCIÓN

La existencia de complejos intrusivos en cuencas sedimentarias ha sido documentada en varias cuencas del mundo (Magee *et al.* 2016). Estos complejos intrusivos tienen varios efectos en los sistemas petroleros (Delpino y Bermúdez 2009, Farooqui *et al.* 2009, Schutter 2003, Senger *et al.* 2017). Cuando un intrusivo se emplaza en una roca rica en materia orgánica, el impacto térmico producido genera la maduración de la misma (Aarnes *et al.* 2010 y referencias allí incluidas; Spacapan *et al.* 2017, 2018, Svensen *et al.* 2017, Sydnes *et al.* 2018). Además, la concentración de esfuerzos y la sobrepresión de fluidos generada durante el emplazamiento producen el fracturamiento de la roca de caja, permitiendo la migración de fluidos (Cartwright *et al.* 2007, Delpino *et al.* 2014, Rateau *et al.* 2013), pudiendo llegar a liberar grandes cantidades de gases a la atmósfera, afectando al clima global (Aarnes *et al.* 2015, Svensen *et al.* 2004). También, el emplazamiento de intrusivos tipo filones capas (sills) o lacolitos produce el domamiento de la roca de caja generando estructuras que pueden ser posibles trampas de hidrocarburos (Orchuela *et al.* 2003, Jackson *et al.* 2013). Por último, los intrusivos pueden sufrir fracturamiento debido a procesos primarios de enfriamiento (Bermúdez y Delpino 2008) y a efectos tectónicos secundarios (Schiuma y Llambías 2014), brindándoles buenas condiciones como reservorios (Rodríguez Monreal *et al.* 2009, Witte *et al.* 2012). Magoon y Dow (1994) han denominado a estos sistemas petroleros como atípicos, mientras que Delpino y Bermúdez (2009) han realizado una clasificación de los mismos, denominándolos sistemas petroleros ígneos. Para el presente trabajo se escogió el sector surmendocino de la Cuenca Neuquina, donde existen gran cantidad de intrusiones ígneas emplazadas en las rocas generadoras del Grupo Mendoza (Formaciones Vaca Muerta y Agrio) y en sedimen-

titas continentales del Grupo Neuquén.

La maduración de rocas generadoras de hidrocarburos debido al emplazamiento de intrusivos ha sido descrita por varios autores en distintas cuencas del mundo (Aarnes *et al.* 2010 y referencias allí incluidas). La mayoría de los trabajos han estudiado el impacto térmico de un solo intrusivo y la consecuente maduración de la roca hospedante, generalmente pelitas ricas en materia orgánica. Sin embargo, el efecto térmico producido por un complejo intrusivo debe ser mayor, como ha sido demostrado por Fjeldskaar *et al.* (2008), Aarnes *et al.* (2015), Sydnes *et al.* (2018) y Spacapan *et al.* (2017, 2018), ocasionando un mayor grado de maduración de las rocas madre. Este impacto no se encuentra aún evaluado ni cuantificado en varios yacimientos de la Cuenca Neuquina (ej.: Valle del Río Grande, El Trapial, Aguada San Roque, Auca Mahuida), donde se ha producido un importante emplazamiento de cuerpos ígneos relacionados a los eventos eruptivos del Paleógeno y Neógeno (Combina y Nullo 2011, Narciso *et al.* 2001, Nullo *et al.* 2002). Varios autores han identificado estos intrusivos como rocas reservorios en esta cuenca (Delpino *et al.* 2014, Comeron *et al.* 2002, Orchard *et al.* 1989, Schiuma 1994, Schiuma y Llambías 2014, Witte *et al.* 2012), pero su efecto en la maduración de las rocas madres no ha sido evaluado, a excepción de los trabajos de Rodríguez Monreal *et al.* (2009) y Spacapan *et al.* (2017, 2018). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto del emplazamiento de un complejo intrusivo en la maduración de las rocas madres presentes en las Formaciones Vaca Muerta y Agrio, en el sur de Mendoza.

MARCO GEOLÓGICO

Para evaluar el impacto térmico y la consecuente maduración que genera el emplazamiento de un complejo intrusivo en

las Formaciones Vaca Muerta y Agrio, se ha escogido el área del valle del río Grande, ubicada en el partido de Malargüe, en el sur de la provincia de Mendoza (Fig. 1a). Ésta zona pertenece al sector norte de la Cuenca Neuquina, encontrándose las formaciones que la componen en facies más proximales al borde de cuenca, e intrusadas por varios cuerpos ígneos (Fig. 1b).

El valle del río Grande es una depresión morfológica de orientación meridiana ubicada entre la sierra Azul y las estribaciones occidentales de las sierras de Palauco, Cara Cura y Reyes, pertenecientes al sector externo de la faja plegada y corrida de Malargüe (Kozłowski *et al.* 1993). A lo largo del valle se encuentran varias estructuras anticlinales producidas por la inversión tectónica de las fallas que limitaban los *riffs* triásicos (Maceda y Figueroa 1995). Su levantamiento comenzó posiblemente a partir del Cretácico Tardío (Tunik *et al.* 2010, Fennel *et al.* 2015, Folguera *et al.* 2015) y continuó durante el Paleógeno y Neógeno, con varios eventos compresivos (Álvarez Cerimedo *et al.* 2013, Silvestro y Atencio 2009). Asociados a estos eventos compresivos se encuentran ciclos eruptivos, definidos como ciclo eruptivo Molle (Oligoceno-Mioceno) y ciclo eruptivo Huincán (Mioceno Medio tardío) por Nullo *et al.* (2002). Combina y Nullo (2011) agruparon a estos eventos en ciclos tectovolcano-sedimentarios, identificando un primer ciclo en el Cretácico Tardío - Oligoceno Tardío, un segundo en el Oligoceno Tardío al Mioceno Tardío, y un tercer ciclo que comprende desde el Mioceno Tardío al Plioceno. Cabe consignar que a este conjunto de diferentes eventos eruptivos que se manifiestan en el área de estudios se los considera en este trabajo como integrantes un complejo intrusivo magmático.

En el valle del río Grande las principales rocas reservorios son los intrusivos ígneos relacionados a estos eventos eruptivos. En cuanto a su composición litológica,

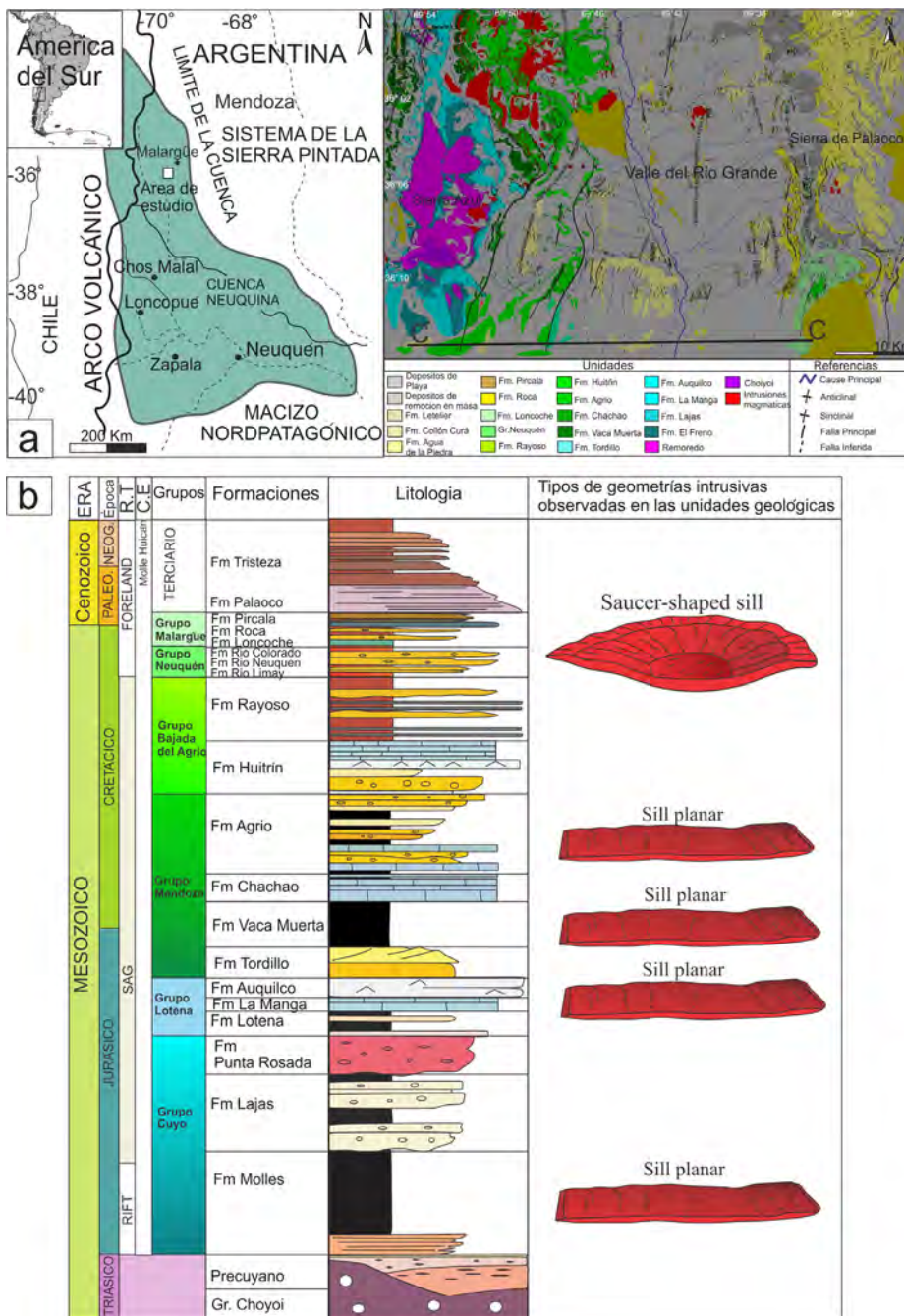


Figura 1. a) Área de estudio con las principales estructuras del valle del río Grande. b) Columna estratigráfica de la zona de estudio mostrando las principales formas geométricas intrusivas en relación con su posición en la columna sedimentaria. Se incluyen los ciclos eruptivos de Nullo *et al.* (2002).

Schiama (1994) los ha clasificado como andesitas y basaltos polimáficos con escasa variación composicional, lo que sugiere un origen magmático común. Éste mismo autor concluye que se han emplazado en distintos pulsos, posiblemente relacionados a los ciclos descritos por Nullo *et al.* (2002). Narciso *et al.* (2001) agruparon a los intrusivos que afloran en las áreas de El Zampal, cerro Bayo de la Esperanza, Puntilla de Huincán, sierra Azul y sierra de

Palaoca, dentro de la Formación Colipilli, definida por Llambías y Rapela (1987, 1989) en el norte de Neuquén para diferenciar las facies intrusivas del Mollitelense o ciclo eruptivo Molle. Constituyen cuerpos subvolcánicos de gran tamaño, en su mayoría filones capa y lacolitos (Narciso *et al.* 2001) que se alojan preferentemente en el Grupo Mendoza y en el Grupo Neuquén respectivamente (Kozłowski *et al.* 1987). En el área considerada, Schiama y Llam-

bías (2014) han estimado que el 95 % de los pozos perforados han manifestado evidencias de intrusivos ígneos en forma de sills en el Grupo Mendoza. Éstos poseen un espesor promedio total de 60 metros. Los mismos sufren un gran fracturamiento debido a procesos primarios de enfriamiento (Bermúdez y Delpino 2008) y a efectos tectónicos secundarios (Schiama y Llambías 2014), generando buenas condiciones como reservorios (Rodríguez Monreal *et al.* 2009, Witte *et al.* 2012). Además, el impacto térmico producido por el emplazamiento del magma genera la maduración de las rocas madres del Grupo Mendoza (Rodríguez Monreal *et al.* 2009, Spacapan *et al.* 2017, 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

Para estudiar el impacto térmico del emplazamiento de un complejo intrusivo en el Grupo Mendoza se utilizó información de pozos y sísmica cedidos por YPF S.A. Se contó con una sísmica 3D y con los legajos y perfiles de cuatro pozos, denominados A, B, C y D (Fig. 2). Se contó también con datos geoquímicos de pirólisis Rock-Eval del pozo B y un pozo E (que no se encuentra en la transecta de estudio). Los datos obtenidos de la pirólisis fueron el carbono orgánico total (COT), el ratio de transformación de materia orgánica (TR), la cantidad de hidrocarburos (HC) producidos por *cracking* del kerógeno (pico S2, expresado como mg HC/g de roca) y el índice de hidrógeno (HI), que es la relación entre los hidrocarburos generados en el pico S2 y el COT (expresado en mg HC/g COT). Estos parámetros fueron utilizados para la calibración de los modelos y para comparar la maduración en una zona con intrusivos (pozo B) de otra sin intrusivos (pozo E). Además, se utilizaron datos de descripciones petrográficas de testigos laterales, y datos petrofísicos de porosidad y permeabilidad. Los intrusivos se caracterizan por presentar una alta reflectividad en la sísmica, aunque a veces no pueden ser distinguidos porque su espesor es menor a la resolución vertical de la misma (Fig. 2a). En los perfiles de pozos muestran valores bajos de *gamma ray* (Gr) y muy altos de resistividad (Rt), que se acentúan por el con-

traste con la roca de caja, generalmente pelitas de las unidades estratigráficas generadoras del Grupo Mendoza (Spacapan *et al.* 2018). Cabe aclarar que valores altos de Rt y bajos de Gr pueden observarse en formaciones evaporíticas o en calizas, por lo que al análisis de las descripciones de *cuttings* fueron muy importantes para diferenciar estas litologías con respecto a los intrusivos ígneos. Con el análisis de los pozos y la interpretación de la sísmica se procedió a efectuar la correlación de las formaciones e identificación de intrusivos utilizando el software Petrel (Fig. 2). Luego, en base a estos datos, se generó un modelo estructural en el software MOVE 2D (Fig. 3 a), el cuál fue luego reconstruido palinpásticamente (Fig. 3 b).

Posteriormente, se procedió a realizar el modelado termal del impacto de los intrusivos. Para ello se usó el módulo PetroMod 2D[®]. Éste permite calcular la evolución termal por la difusión del calor aportado por el enfriamiento de las intrusiones. Se asumió que el flujo convectivo de calor en rocas de baja permeabilidad, como las pelitas de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio, es despreciable, como ya ha sido observado por otros autores (Iyer *et al.* 2017). Se utilizó la ecuación de EasyRo% desarrollada por Sweeney y Burnham (1990) para modelar el impacto térmico en base a la reflectancia de la vitrinita (VR). Ésta fórmula relaciona exponencialmente el valor de VR con el rango de transformación del kerógeno (TR) en el intervalo 0.20 % - 4.66 % (Hantschel y Kauerauf 2009). El límite 4.66 % no es un límite natural, pudiendo existir valores de VR más altos. Debido a que éste límite se encuentra por encima del límite de generación de gas seco no es problema para los cálculos de maduración en los sistemas petroleros, como ya ha sido discutido por Fjeldskaar *et al.* (2008). Se realizaron tres simulaciones, cada una de ellas contempla el conjunto de intrusivos emplazados en las distintas unidades estratigráficas (Formaciones Vaca Muerta, Agrio y Grupo Neuquén). Para los intrusivos del Grupo Mendoza se asignó una edad de emplazamiento de $34,3 \pm 3$ Ma basado en dataciones de Escribano *et al.* (1984), asignándoles 34,33 Ma a las intrusiones en la Formación Vaca Muerta, y 34,30 Ma a las presentes en la Formación Agrio. Debido a la falta de datos ra-

dimétricos, a las intrusiones en el Grupo Neuquén se les asignó una edad Miocena superior, relacionándolas con el ciclo eruptivo Huincán de Nullo *et al.* (2002). Además, ésta edad fue la que mejor explicaba la distribución de madurez en los modelos calibrados en base a los datos geoquímicos de pirólisis del pozo B. Se determinó mediante cortes petrográfi-

cos una composición andesítica promedio para los tres grupos de intrusivos, asignándoles una temperatura de intrusión de 1100° C y una temperatura de solidus de 910° C. Los valores utilizados en los parámetros del magma fueron una densidad de 2,1 Kg/m³, conductividad térmica de 2,6 W/m/K, capacidad calorífica de 0,28 Kcal/Kg/K y calor de cristalización de 700 MJ/

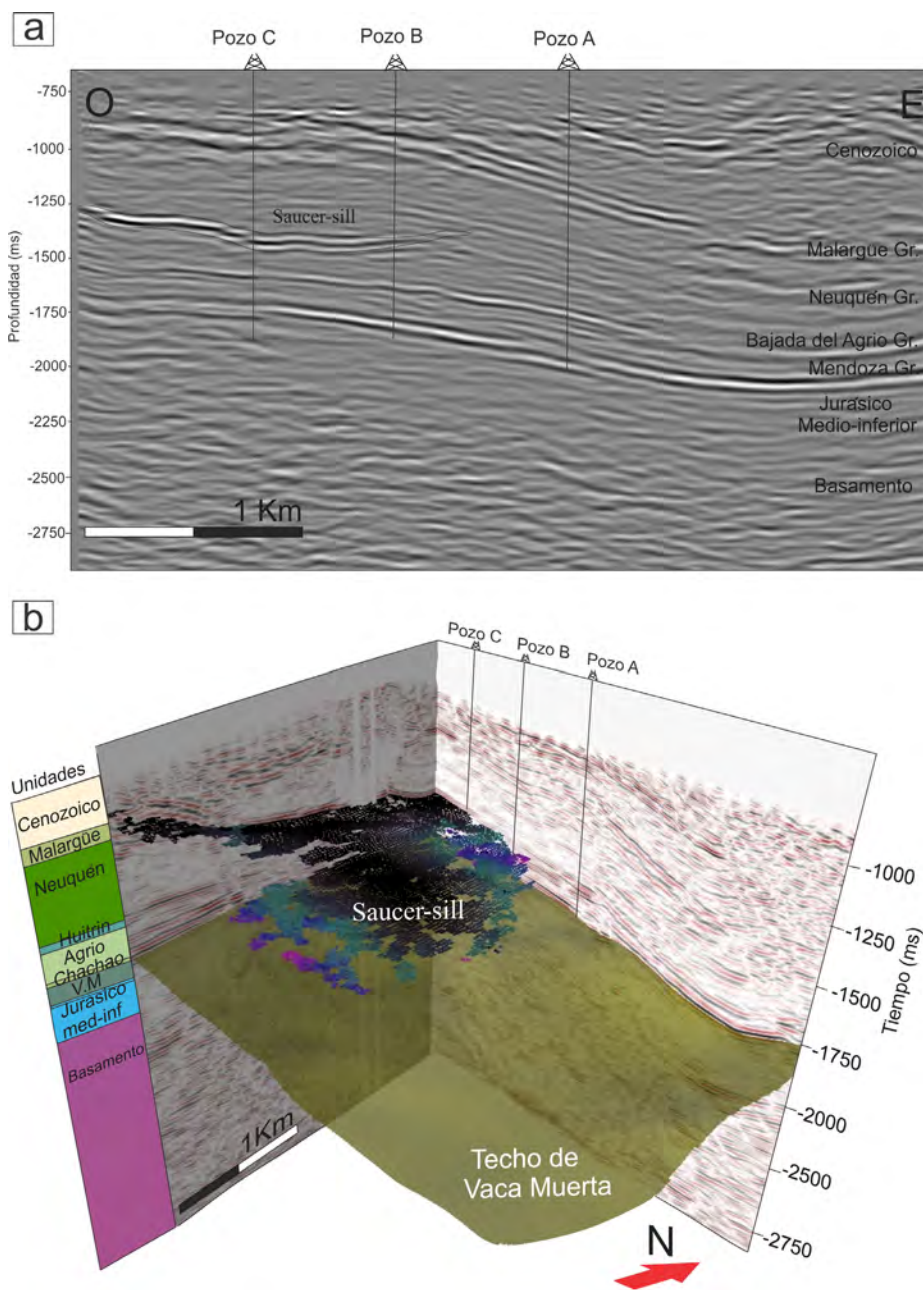


Figura 2. a) Línea sísmica E-O del área de estudio. Nótese que el *saucer-shaped -sill*, de un espesor promedio de 56 m, presenta alta reflectividad con respecto al Grupo Neuquén, lo que permite identificar fácilmente esta geometría intrusiva. Contrariamente, los intrusivos emplazados en el Grupo Mendoza, presentan bajos espesores y son perfectamente concordantes con la roca de caja lo que dificulta su interpretación. Sin embargo, los bajos valores de gamma ray, altos valores de resistividad y densidad en los perfiles permitieron realizar la identificación de los cuerpos magmáticos en estos niveles; b) Cubo sísmico 3D del área de estudio mostrando la superficie del *saucer-shaped sill* y el techo de la Formación Vaca Muerta.

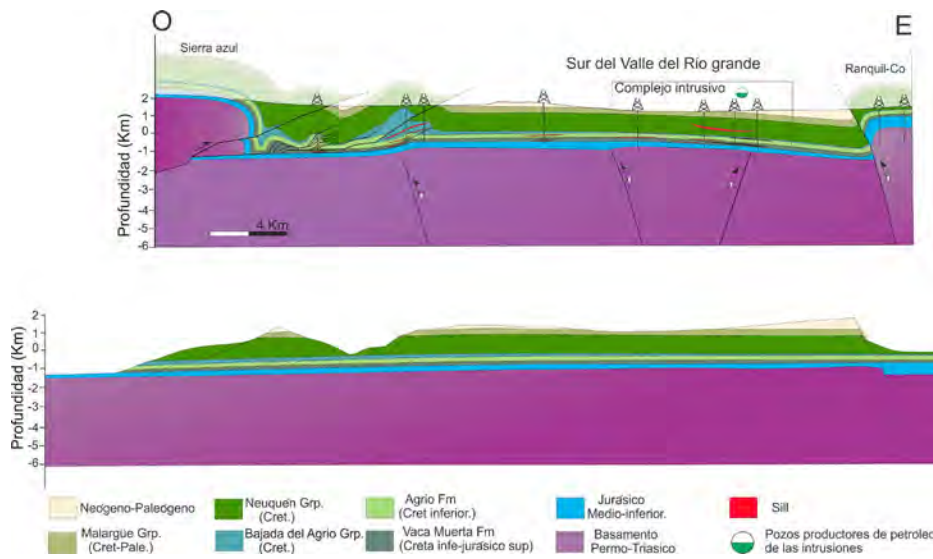


Figura 3. a) Sección estructural, mostrando en el rectángulo el área de estudio de este trabajo. Nótese la existencia de un complejo intrusivo y producción de hidrocarburos de los sills que lo componen; b) Reconstrucción palinóstica de la sección estructural.

m³. También se asignaron valores de porosidad y permeabilidad que varían entre 3 a 11,5 v/v y 0,5 a 4 mD, respectivamente. La variación de estos valores se debe a que las muestras y ensayos pueden haber sido efectuados en distintas zonas de los intrusivos, con mayor o menor fracturamiento. Por último, los modelos fueron calibrados en base a datos de pirólisis Rock-Eval de muestras de *cuttings* del pozo B.

RESULTADOS

A partir de la interpretación sísmica y el análisis de las descripciones de *cuttings* y perfiles de pozos, se ha identificado un complejo intrusivo compuesto por tres conjuntos de intrusivos, emplazados en las Formaciones Vaca Muerta y Agrio y el Grupo Neuquén (Fig. 4). Generalmente, las intrusiones son mayormente concordantes con la estratificación y presentan forma tabular plana, por lo que fueron definidas como filones capa o *sills*. El intrusivo del Grupo Neuquén presenta forma de palangana por lo que es clasificado como lopolito o *saucer-shaped sill* (Fig. 2b). El primer conjunto de intrusivos se encuentra en la Formación Vaca Muerta, y está compuesto por dos *sills*, ambos emplazados a los 34,4 Ma (Escribano *et al.* 1984). El segundo conjunto, formado por 4 intrusiones, se concentra en la Formación

Agrio, identificándose dos *sills* en el contacto Chachao - Agrio, otro en el medio de la Formación Agrio (intersectado sólo por el pozo A), y un último intrusivo emplazado en el tramo superior de la Formación Agrio. El último conjunto está compuesto sólo por un intrusivo emplazado en el Grupo Neuquén, el cuál fue clasificado como lopolito o *saucer-shaped sill*, al que se le asignó una edad de emplazamiento para el Mioceno superior. El emplazamiento de estos cuerpos magmáticos ha tenido un fuerte impacto en la temperatura de la roca de caja, como puede observarse en los modelos termales de la figura 5. Se han realizado tres modelizaciones, una para cada evento intrusivo (Fig. 5 a-c). Cabe aclarar que en los modelos más recientes no se ha

tenido en cuenta el impacto del emplazamiento de los intrusivos anteriores, ya que el intervalo de tiempo entre los pulsos de emplazamiento es suficiente para que los intrusivos se enfríen totalmente y la roca de caja vuelva al equilibrio térmico. En los modelos puede observarse que la temperatura de la roca de caja aumenta en los alrededores de los intrusivos, generando una aureola térmica, definida entre 100-300 °C. Ésta aureola tiene un espesor de aproximadamente 1,5 veces el espesor del intrusivo, pudiendo ser mayor donde existe agrupamiento de intrusiones, que en adelante denominaremos como clustrización. Resultados similares fueron obtenidos por Aarnes *et al.* (2010) y Spacapan *et al.* (2017, 2018). Éste impacto térmico en la roca de caja ocasiona la maduración de la materia orgánica (Fig. 6). En la figura 6 a puede observarse la maduración generada por el emplazamiento del primer conjunto de intrusivos emplazados en la Formación Vaca Muerta. Se aclara que, al tiempo del emplazamiento, la roca madre ya se encontraba en principio de generación de petróleo, por lo que el aumento de la maduración pudo ser posible. Si la roca hubiera estado madura se hubiera generado la sobremaduración, como ha sido discutido por Delpino y Bermúdez (2009) en su clasificación de los sistemas petroleros ígneos. El espesor madurado es semejante al de la aureola térmica de la figura 5 a, por lo que el área madurada equivale aproximadamente 1,5 veces el espesor del intrusivo. Cabe destacar que en las áreas más cercanas al intrusivo se genera gas, mientras que en las zonas un poco más alejadas se genera petróleo. En la figura 6b se modela la maduración generada por el

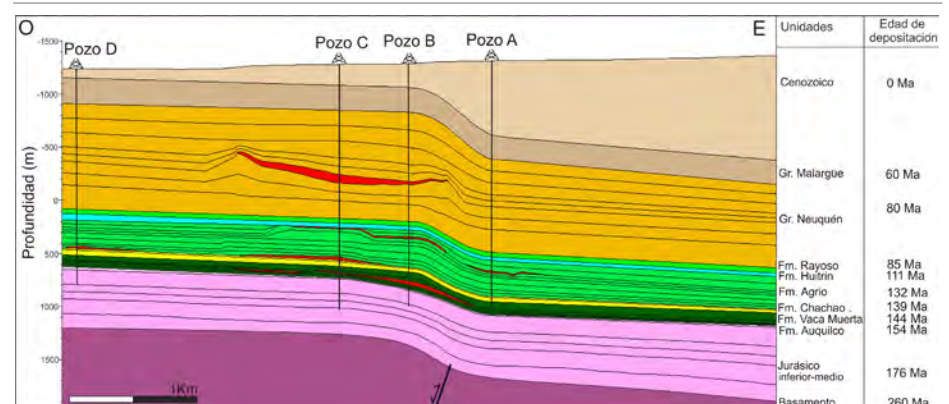


Figura 4. Sección estructural detallada del área de estudio utilizada en modelado de sistema petrolero. Se pueden observar los *sills* identificados con la sísmica y los datos de pozos.

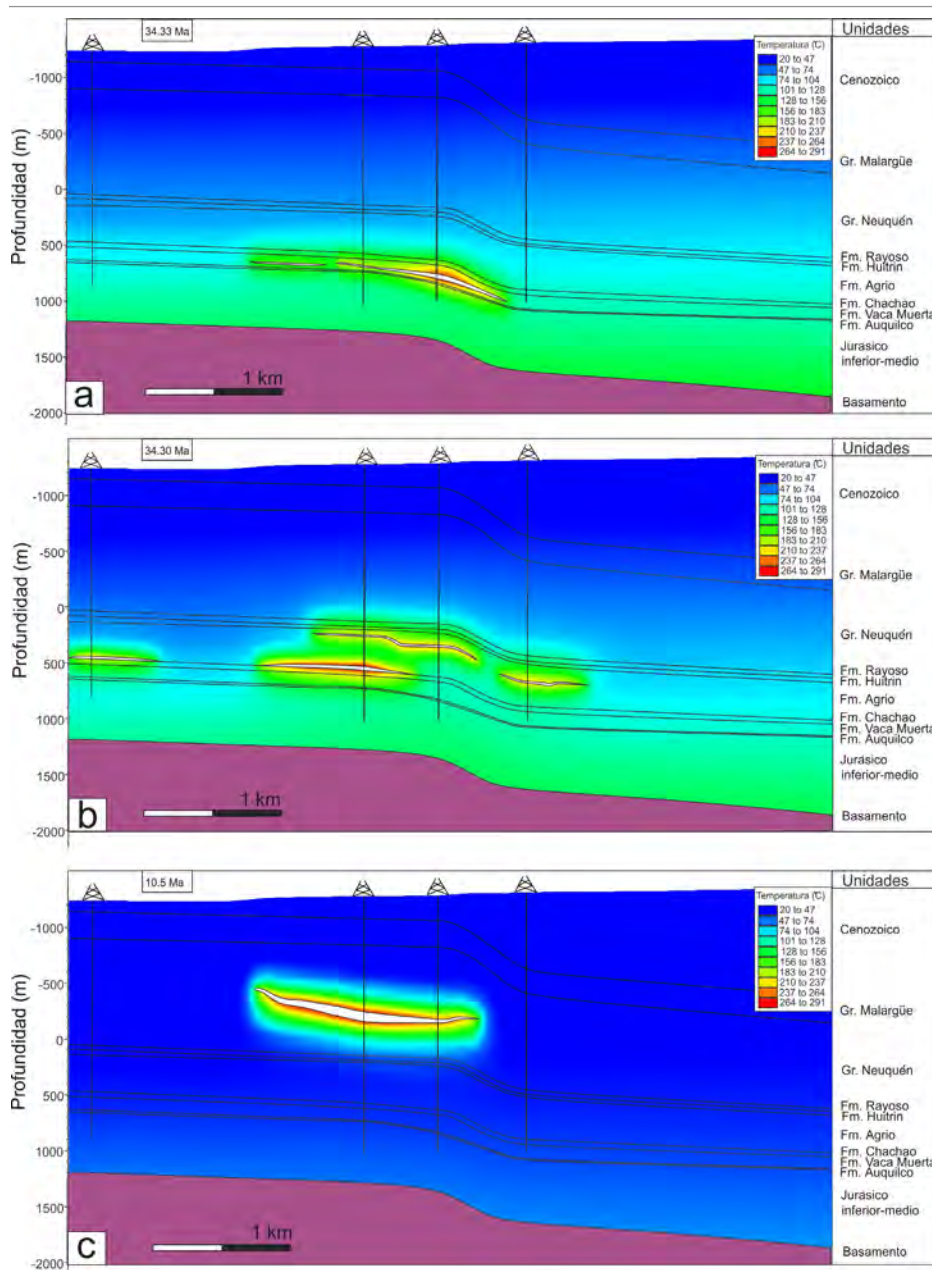


Figura 5. Modelos termales. a) Emplazamiento del primer conjunto de intrusivos en la Formación Vaca Muerta a los 34,3 Ma; b) Emplazamiento del segundo conjunto de intrusivos en la Formación Agrio a los 34,0 Ma; c) Emplazamiento de un intrusivo tipo *saucer-shaped sill* en el Grupo Neuquén para el Mioceno superior

segundo emplazamiento de intrusivos en la Formación Agrio. Aquí, a diferencia de los modelos termales, sí se tiene en cuenta el efecto producido por los intrusivos anteriores (emplazados en Vaca Muerta), ya que la maduración es irreversible. Nótese también que en las áreas donde hay clusterización de intrusiones, la aureola de maduración es mucho mayor, superando el rango de 1,5 veces el espesor del intrusivo, generándose un solapamiento de las aureolas. Esto también puede observarse comparando la aureola de maduración en

la Formación Agrio de los pozos B y C, en comparación con el pozo E, donde hay sólo una intrusión (Fig. 6b). Resultados similares fueron obtenidos por Aarnes *et al.* (2015), Fjeldskaar *et al.* (2008), Spacapan *et al.* (2017, 2018) y Sydnes *et al.* (2018), donde la clusterización de intrusiones genera una mayor aureola de maduración de la roca hospedante. Posteriormente, se modeló la maduración generada por el emplazamiento del tercer evento intrusivo en el Grupo Neuquén durante el Mioceno superior. Ésta intrusión

produce un aumento de la maduración del Miembro superior de la Formación Agrio. Cabe aclarar que, si bien las formaciones del Grupo Neuquén no son rocas generadoras de hidrocarburos, tienen una mínima cantidad de materia orgánica, lo que le permite al software calcular su maduración. Como ya se mencionó anteriormente, la intrusión emplazada en el Grupo Neuquén carece de datos radiométricos y no se cuenta con testigos de coronas de la misma. En nuestro modelo consideramos una edad miocena superior para este *saucer-shaped sill* emplazado en el Grupo Neuquén, relacionándolo con el ciclo eruptivo Huincán (Nullo *et al.* 2002). Cabe destacar que la edad correcta de emplazamiento de este cuerpo ígneo podría modificar los resultados finales de la modelización obtenida. No obstante, los resultados de la tasa de transformación (TR) obtenidos por el modelado se asemejan a los datos que resultan del análisis de Rock-Eval (Fig. 7b), lo que ha permitido aproximar la calibración del modelado. En base a estos patrones de maduración obtenidos, la intrusión emplazada en el Grupo Neuquén podría quedar acotada a un evento de emplazamiento ocurrido durante el Mioceno superior. Recientes modelados preformados en el valle del río Grande (Spacapan *et al.* 2018) y en el Mar del Norte (Sydnes *et al.* 2018) han demostrado que el tiempo de emplazamiento de las intrusiones que conforman un complejo ígneo pueden tener un impacto relevante en el grado y la extensión de las zonas maduras. Ambos modelados han demostrado que intrusiones emplazadas al mismo tiempo generan grandes zonas sobre maduras. Contrariamente, los modelados muestran que el efecto térmico ejercido por un conjunto de intrusiones es notablemente menor cuando hay eventos de emplazamiento múltiples separados con intervalos de mil años. Por lo tanto, el correcto conocimiento de los eventos magmáticos en el área de estudio permitiría tener una mejor aproximación de la estimación de la maduración realizada en los modelados. Esto se debe a que intrusiones modeladas en un solo evento magmático con intervalos de emplazamiento de cien años, tienden a sobrestimar el efecto térmico generado por el complejo magmático, mientras que intervalos de emplaza-

miento mayores a mil años podrían suavizar el impacto térmico desarrollado por el complejo intrusivo.

Finalmente, se modeló la maduración de las formaciones en la actualidad (Fig. 7a), que es muy similar al modelo del Mioceno superior, debido a que no ha habido mayor soterramiento ni emplazamiento de nuevos intrusivos para aumentar el grado de maduración. En la figura 7 b también puede observarse que la mayoría del kerógeno de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio ha sido casi totalmente craqueado cerca de los intrusivos, con valores de TR mayores al 90 %.

El aumento de la temperatura y consecuente maduración de las rocas ricas en materia orgánica debida al emplazamiento de intrusivos ocasiona la generación de hidrocarburos. En la figura 8 a puede observarse que, en el momento del emplazamiento del primer conjunto de intrusivos en la Formación Vaca Muerta, la generación de petróleo aumenta considerablemente, alcanzando valores de hasta 100.000 toneladas. Además, los valores modelados de VR y TR son coherentes con los valores modelados de cantidad de hidrocarburos generados (Fig. 8b), produciéndose la mayor generación de hidrocarburos en las zonas cercanas a los intrusivos. Nótese que la intrusión en el Grupo Neuquén no genera hidrocarburos ya que, como se mencionó anteriormente, el contenido de materia orgánica es muy bajo o nulo para considerarlo roca generadora.

Los resultados modelados son coherentes con los análisis geoquímicos efectuados en el pozo B (Fig. 9). Aquí puede observarse que tanto en la Formación Agrio (Fig. 9a) como en la Formación Vaca Muerta (Fig. 9 b), los valores de COT y HI disminuyen hacia la zona de intrusivos, mientras que los valores de TR y S2 aumentan hacia estas zonas. En el pozo E de la figura 10, la Formación Vaca Muerta no está afectada por intrusivos, y tiene un HI promedio de 650 mgHC/gTOC. En cambio, en el pozo B, donde hay un sill de aproximadamente 40 m emplazado en la Formación Vaca Muerta, el HI decrece hacia el intrusivo, con valores de 100 a 30 mgHC/gTOC. A medida que el HI disminuye, se manifiesta un mayor craqueo de la materia orgánica para formar hidrocarburos (Tissot y Welte 1984). A su vez, el TR de

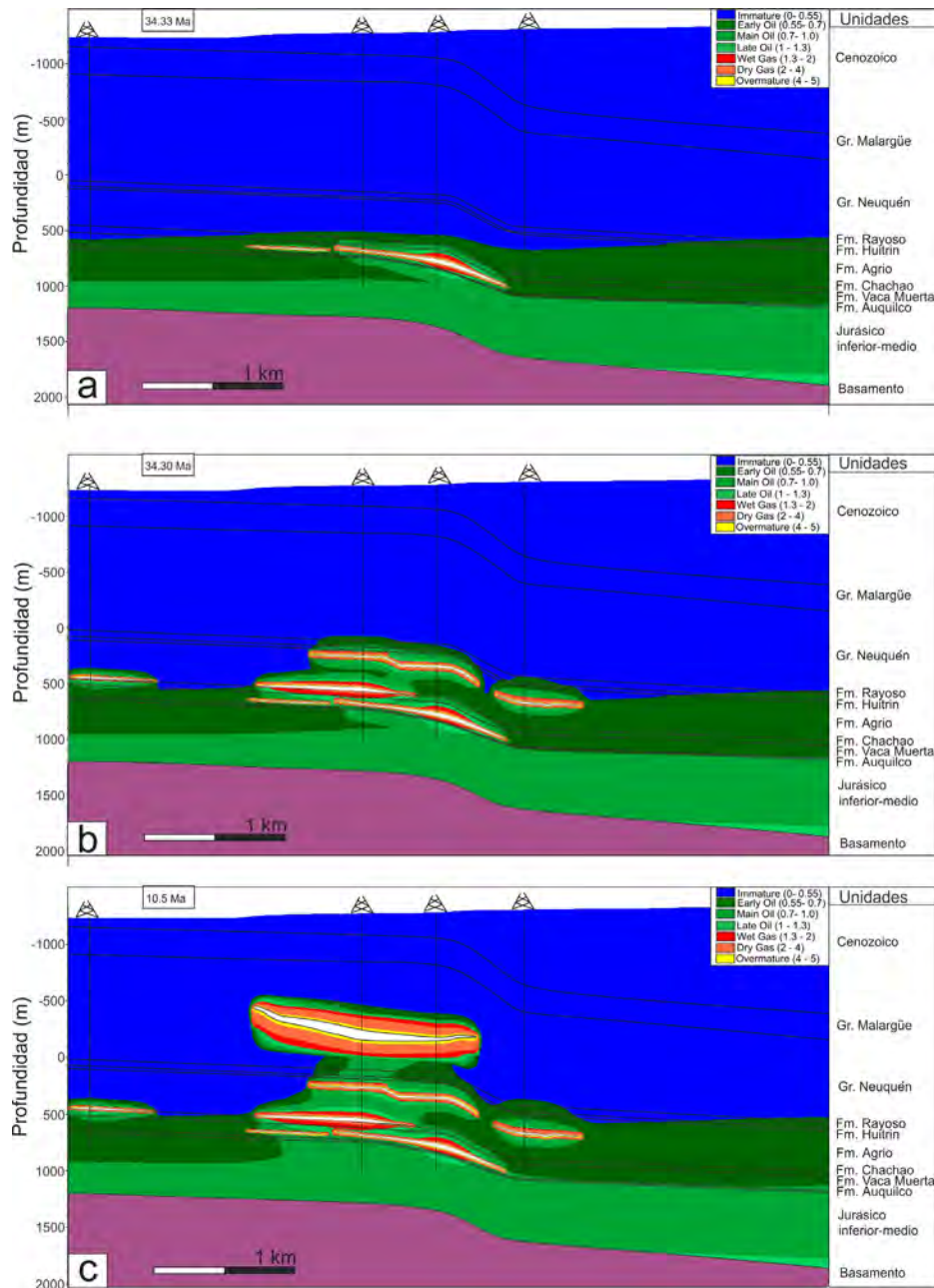


Figura 6. Modelo de maduración en base a la reflectancia de la vitrinita. a) Maduración ocasionada por el emplazamiento del primer conjunto de intrusivos a los 34,33 Ma en la Formación Vaca Muerta; b) Maduración generada por el emplazamiento del segundo conjunto de intrusivos en la Formación Agrio a los 34,30 Ma. Nótese que el efecto ocasionado por este conjunto de intrusivos es mayor al del primero debido a que la roca de caja ya se encontraba más madura por el efecto del primer conjunto de intrusivos. Además, donde hay clusterización de intrusiones la maduración es mayor; c) Maduración generada por el emplazamiento de un intrusivo en el Grupo Neuquén. Al ser este intrusivo más espeso, genera una aureola mayor, generando sobremaduración.

las Formaciones Vaca Muerta y Agrio aumenta hasta valores de 80 al 100 % cerca de los intrusivos, como puede observarse en el modelo de maduración de la figura 7 b, y en los datos geoquímicos del pozo B (Fig. 9), evidenciando que casi la totalidad de la materia orgánica se ha craqueado a hidrocarburos. Esto nos indica claramente que los intrusivos generan una mayor ma-

duración de las rocas madres. El espesor madurado por los intrusivos es aproximadamente 1,5 veces el espesor del intrusivo, pudiendo ser mayor en zonas con clusterización de intrusivos (Fig. 7a). Por último, se realizó la comparación entre los datos de geoquímica de un pozo sin intrusiones, pozo E (el cuál no está en la transecta) y el pozo B (Fig. 10). Puede

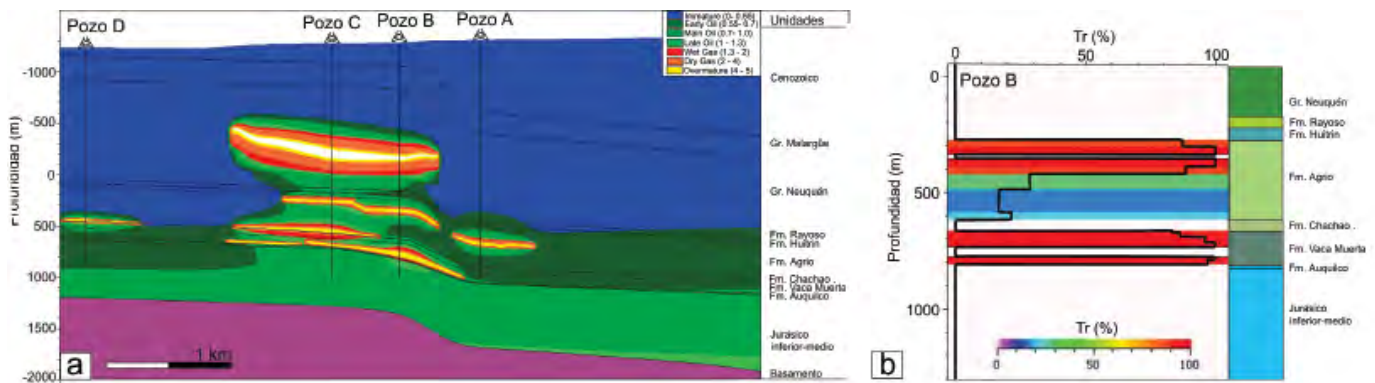


Figura 7. a) Modelo de maduración en la actualidad. Nótese la mayor maduración en zona dónde hay mayor clusterización de intrusiones; b) Modelo 1D del índice de transformación del kerógeno (Tr) en base a datos de pirólisis Rock-Eval del pozo B. Puede observarse que más de un 90 % del kerógeno ha sido transformado en las Formaciones Vaca muerta y Agrio en zonas cercanas a los intrusivos.

observarse en el diagrama Van Krevelen de la figura 10 A, que los datos del pozo B muestran un mayor grado de maduración respecto a los del pozo E (sin intrusiones). En el pozo B las muestras presentan valores bajos de IH, lo que sugiere que en un gran porcentaje se han craqueado generando hidrocarburos y actualmente son estériles. Contrariamente, las muestras del pozo E conservan prácticamente los niveles iniciales de IH lo que sugiere un porcentaje bajo de craqueo de la materia orgánica a hidrocarburos (Fig. 10b).

CONCLUSIONES

Del presente trabajo se puede concluir que los intrusivos emplazados en las rocas generadoras del Grupo Mendoza (Formaciones Vaca Muerta y Agrio), producen la maduración de las mismas, con la consecuente generación de hidrocarburos. Este efecto es mucho más pronunciado en zonas donde existe solapamiento o clusterización de intrusiones. En estas zonas se produce el solapamiento de las aureolas de maduración, pudiendo llegar a ser más grandes que dos veces el espesor de los intrusivos.

Se puede concluir también que los principales parámetros que regulan la maduración de las rocas madre son la temperatura de la roca de caja al tiempo del emplazamiento, la temperatura de emplazamiento y la distancia vertical entre dos intrusiones, ya que ésta controla el solapamiento de los campos térmicos entre los cuerpos magmáticos. En adición, los intervalos de tiempo utilizados para el emplazamiento de las

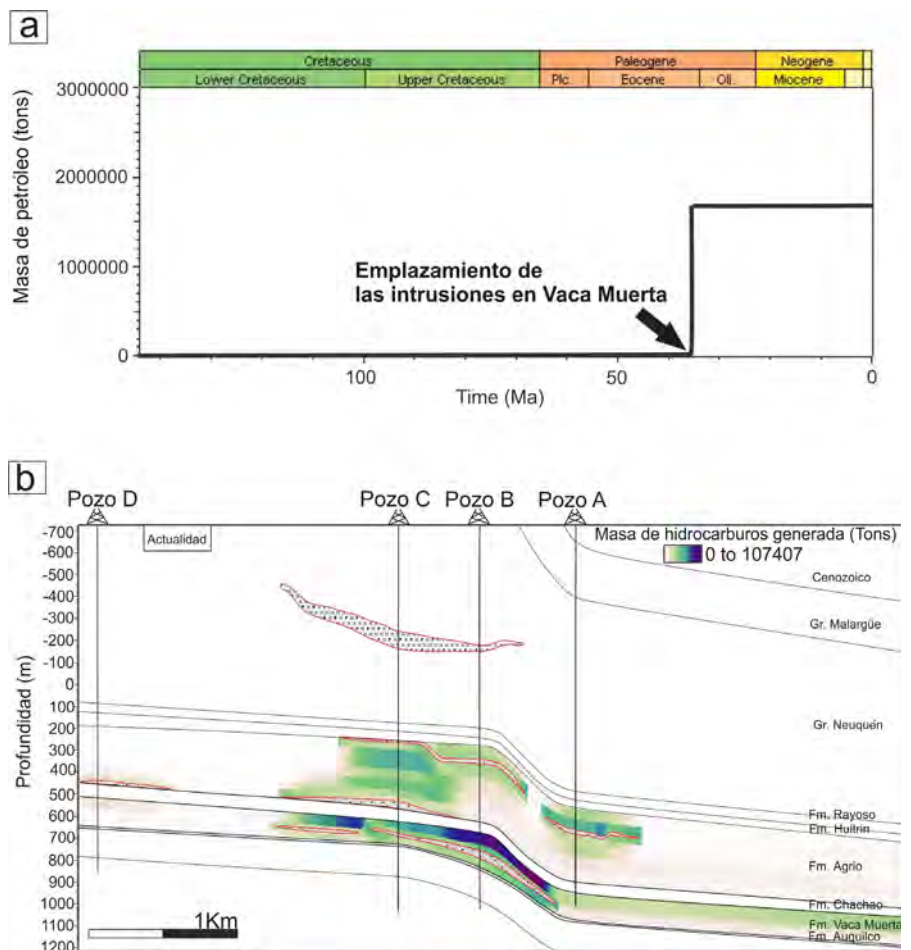


Figura 8. a) Masa de petróleo generado en la Formación Vaca Muerta. Al tiempo del emplazamiento de las intrusiones la masa de petróleo generada aumenta a 170000 toneladas; b) Modelo de generación de petróleo. Puede observarse que en el pozo D, donde hay solo una intrusión en la Formación Agrio, la masa generada de hidrocarburos es mucho menor comparada por la producida por una intrusión similar, emplazada en el mismo nivel, en el pozo C. Esto se debe a que en el pozo C hay una clusterización de los intrusivos que produce un aumento del área madurada, con una consecuente mayor generación de hidrocarburos. El impacto en la maduración de un clúster de intrusivos es mucho mayor a la de un solo intrusivo.

intrusiones muestran tasas de transformación simuladas similares a los datos de laboratorio obtenidos mediante el análisis de pirólisis. Sin embargo, el tiempo de emplazamiento, como así también los intervalos de tiempo entre los cuales se emplazan

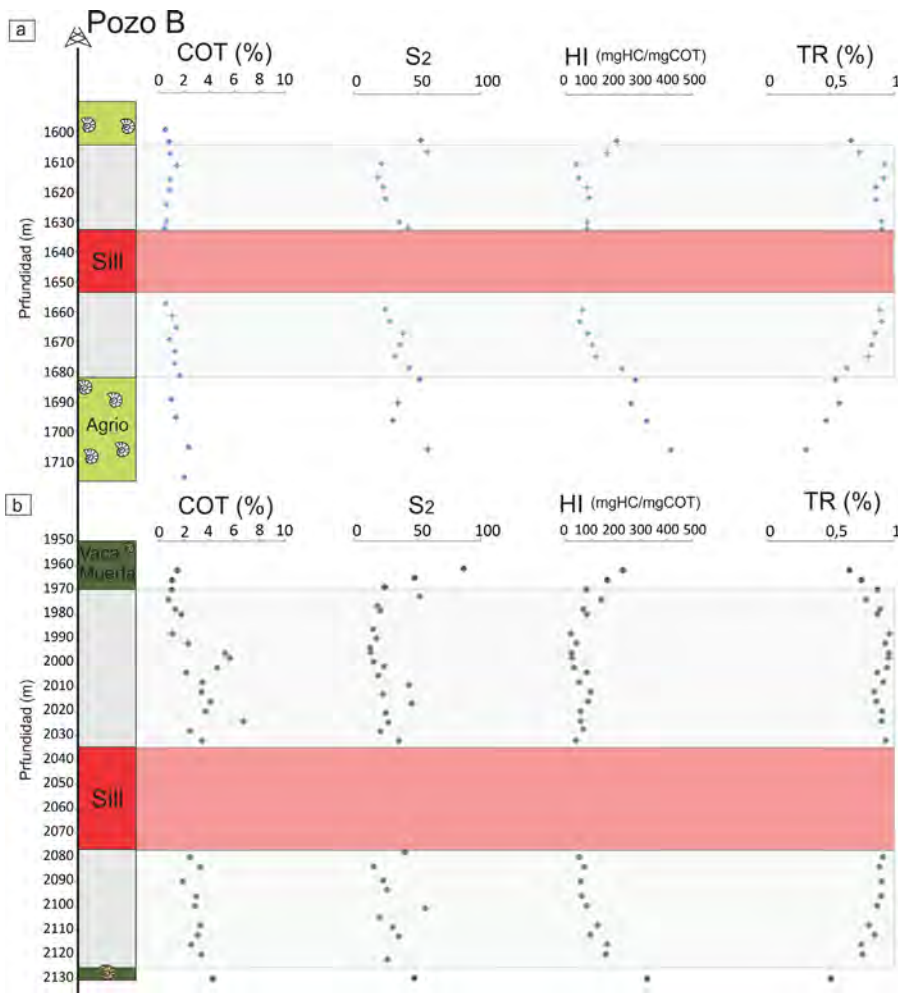


Figura 9. Datos geoquímicos de pirólisis Rock-Eval en el pozo B en las Formaciones Vaca Muerta y Agrio. Puede observarse una disminución del COT e índice de hidrógeno (HI), y un aumento de los valores de S2 y TR hacia las cercanías de los intrusivos, debido a un mayor grado de maduración. En gris se identifica la aureola térmica producida por los intrusivos. Nótese que el espesor de la aureola es aproximadamente 1,5 veces el espesor del sill.

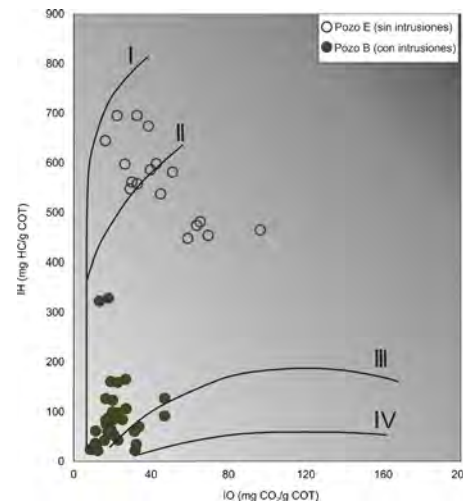


Figura 10. Diagrama Van Krevelen modificado de la Formación Vaca Muerta, comparando un pozo E sin intrusiones, y otro pozo B con intrusiones. Nótese que la mayor parte de las muestras pertenecientes al pozo B se han craqueado a hidrocarburos, mientras que en las muestras del pozo E el craqueo ha sido bajo a incipiente.

las intrusiones, tiene un efecto notable en el grado y la extensión de las áreas maduradas. El conocimiento de los eventos magmáticos en relación con su posición en las unidades estratigráficas podría ser de gran relevancia en futuros proyectos de exploración en cuencas volcánicas. Finalmente, el espesor de las intrusiones tiene impacto en el volumen vertical de hidrocarburos generados. Sumado a esto, la longitud de las intrusiones es un parámetro relevante ya que controla la extensión areal de las masas de hidrocarburos generadas. Por último, se concluye que en el área estudiada la generación de hidrocarburos a partir de las Formaciones Vaca Muerta y Agrio se debe al emplazamiento de un complejo intrusivo que produjo la maduración de las mismas.

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto ha podido realizar-

se gracias a la financiación de las becas doctorales por parte de Fundación YPF, Y-TEC y CONICET. También se agradecer a YPF el otorgamiento de los datos para realizar los modelos. Nos es grato asimismo efectuar un reconocimiento especial a los árbitros Felipe Rodríguez Monreal y Diego Winocur que contribuyeron a la mejora del manuscrito original.

REFERENCIAS

Aarnes, I., Svensen, H., Connolly, J.A. 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* 74: 7179-7195.
 Aarnes, I., Planke, S., Trulsvik, M. y Svensen, H. 2015. Contact metamorphism and thermogenic gas generation in the Vøring and Møre Basins, offshore Norway, during the Paleocene–Eocene Thermal Maximum.

Journal of the Geological Society 172: 588-598.
 Álvarez Cerimedo, J., Orts, D., Rojas Vera, E., Folguera, A., Bottesi, G. y Ramos, V.A. 2013. Mecanismos y fases de construcción orogénicas del frente oriental andino (36°S, Argentina). *Andean Geology* 40: 504-520.
 Bermúdez, A. y Delpino, D.H. 2008. Concentric and radial joint systems within basic sills and their associated porosity enhancement, Neuquén Basin, Argentina. En: Thompson, K. y Petford, N. (eds.) *Structure and emplacement of high-level magmatic systems*. Geological Society of London Special Publications 302: 185-198, London.
 Brissón, I. y Veiga, R. 1998. La estratigrafía y estructura de la Cuenca Neuquina. Gira de campo 707. Repsol YPF, informe inédito, Buenos Aires.
 Cartwright, J., Huuse, M. y Aplin, A. 2007. Seal bypass systems. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 91: 1141-1166.

- Combina, A. y Nullo, F. 2011. Ciclos tectónicos, volcánicos y sedimentarios del Cenozoico del sur de Mendoza-Argentina (35°-37° S y 69° 30' W). *Andean Geology* 38: 198-218.
- Comeron, R., González, J. M. y Schiuma, M. 2002. Los reservorios de las rocas ígneas intrusivas. 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina, Actas: 559-582, Mar del Plata.
- Delpino, D.H. y Bermúdez, A.M. 2009. Petroleum systems including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks (sills and laccoliths). *The Leading Edge* 28: 804-811.
- Delpino, D.H., Bermúdez, A.M., Vitulli, N. y Loscerbo, C. 2014. Sistema de petróleo no convencional relacionado con lacolitos eocenos de intraplaca. Área Altiplanicie del Payún, Cuenca Neuquina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajo Técnicos, Actas 1: 223-242, Mendoza.
- Escribano, D., Labayén, I., Rosso, M., Tozzi, A., Sanchez, M. C., Angelozzi, G. y Spalletti, L. A. 1984. Estudio petrográfico, radimétrico, geoquímico y micropaleontológico de la secuencia sedimentaria infrayacente a la Formación Huitrín e intrusivos asociados presentes en la Cuenca Neuquina surmendocina. Informe Inédito YPF.
- Farooqui, M.Y., Hou, H., Li, G., Machin, N., Neville, T., Pal, A., Shrivastva, C., Wang, Y., Yang, F., Ying, C., Zhao, J. y Yang, X. 2009. Evaluación de yacimientos volcánicos. *Oilfield Review* 21: 36-47.
- Fennell, L.M., Folguera, A., Naipauer, M., Gianni, G., Rojas Vera, E.A., Bottesi, G. y Ramos, V.A. 2015. Cretaceous deformation of the southern Central Andes: synorogenic growth strata in the Neuquén Group (35° 30'–37° S). *Basin Research*: 1-22.
- Fjeldskaar, W., Helset, H.M., Johansen, H., Grunnaleiten I. y Horstad I. 2008. Thermal modelling of magmatic intrusions in the Gjallar Ridge, Norwegian Sea: implications for vitrinite reflectance and hydrocarbon maturation. *Basin Research* 20: 143-159.
- Folguera, A., Bottesi, G., Duddy, I., Martín-González, F., Orts, D., Sagripanti, L., Rojas Vera, E.A. y Ramos, V.A. 2015. Exhumation of the Neuquén Basin in the southern Central Andes (Malargüe fold and thrust belt) from field data and low-temperature thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences* 64: 381-398.
- Hantschel, T. y Kauerauf, A.I. 2009. Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. Springer, 476 p., New York.
- Iyer, K., Schmid, D.W., Planke, S. y Millett, J. 2017. Modelling hydrothermal venting in volcanic sedimentary basins: Impact on hydrocarbon maturation and paleoclimate. *Earth and Planetary Science Letters* 467: 30-42.
- Jackson, C.A., Magee, C., Schofield, N. y Golenkov, B. 2013. Seismic Expression and Petroleum System Implications of Igneous Intrusions in Sedimentary Basins: Examples from Offshore Australia. *Search and Discovery Article* 10483.
- Kozłowski, E., Cruz, C. y Rebay, G. 1987. El terciario volcánico de la zona Puntilla de Huincán. Mendoza. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 229-232, San Miguel de Tucumán.
- Kozłowski, E., Manceda, R. y Ramos, V.A. 1993. Estructura. En Ramos V. (ed.) *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*. 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso Nacional de Exploración de Hidrocarburos, Relatorio: 235-256, Mendoza.
- Llambías, E.J. y Rapela, C.W. 1987. Las volcánicas de Colpilli y sus relaciones con las provincias volcánicas del Terciario inferior de Neuquén, Mendoza y Patagonia. Simposio Internacional sobre Vulcanismo Andino. 10° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 249-251, San Miguel de Tucumán.
- Llambías, E.J. y Rapela, C.W. 1989. Las volcánicas Colpilli, Neuquén (37°) y su relación con otras unidades paleógenas de la cordillera. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 34: 224-236.
- Magee, C., Muirhead, J.D., Karvelas, A., Holford, S. P., Jackson, C. A., Bastow, I. D., Schofield, N., Stevenson, C.T., McLean, C. y McCarthy, W. 2016. Lateral magma flow in mafic sill complexes. *Geosphere* 12: 809-841.
- Magoon, L.B. y Dow, W.G. 1994. The petroleum system. En: Magoon, L.B. y Dow, W.G. (eds.) *The Petroleum System from Source to Trap*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 60: 3-24.
- Manceda, R. y Figueroa, D. 1995. Inversion of the Mesozoic Neuquén rift in the Malargüe fold and thrust belt, Mendoza, Argentina. En: Tankard, A.J., Suárez Soruco, R. y Welink H.J. (eds.), *Petroleum basins of South America*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 62: 369-382.
- Narciso, V., Santamaría, G. y Zanettini, J.C. 2001. Hoja Geológica 3769-I, Barrancas, Provincia de Mendoza Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina a escala 1:250.000. *Boletín del SEGEMAR* 253, Buenos Aires.
- Nullo, F.E., Stephens, G.C., Otamendi, J. y Baldauf, P.E. 2002. El volcanismo del Terciario superior del sur de Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 57: 119-132.
- Orchuela, I., Lara, M.E., Suárez, M., 2003. Productive Large Scale Folding Associated with Igneous Intrusions: El Trapial Field, Neuquén Basin, Argentina. 2003. AAPG International Conference & Exhibition Technical Program, Barcelona.
- Orchuela, I., Arteaga, M. y Palade, S. 1989. Reservorios en Rocas Ígneas de yacimientos gasíferos en Cuenca Neuquina. BIP 6: 114-124.
- Rateau, R., Schofield, N. y Smith, M. 2013. The potential role of igneous intrusions on hydrocarbon migration, West of Shetland. *Petroleum Geoscience* 19: 259-272.
- Rodríguez Monreal, F., Villar, H., Baudino, Delpino, D. y Zencich, S. 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: 590-605.
- 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* 35: 47-56.
- 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 (inédita), 118 p., La Plata.
- Schiuma, M. y Llambías, E. 2014. Importancia de los sills como reservorios en la Cuenca Neuquina del sur de Mendoza. 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos técnicos 1: 331-349, Mendoza.
- Schutter, S.R. 2003. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. En: Petford, N. y McCaffrey, K.J.W. (eds.), *Hydrocarbons in Crystalline Rocks*. Geological Society of London, Special Publications 214: 7-33.
- Silvestro, J. y Atencio, M. 2009. La cuenca cenozoica del río Grande y Palauco: edad, evolución y control estructural, faja plegada

- de Malargüe. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 154-169.
- Spacapan, J.B., Palma, O., Manceda, R., Rocha, E., Galland, O., Leanza, H.A., Ruiz, R. y Labayén, I. 2017. Modelado de sistemas petroleros asociados a intrusiones ígneas en pelitas ricas en materia orgánica: el caso de las formaciones Vaca Muerta y Agrio en el sur de Mendoza, Argentina. 20° Congreso Geológico Argentino, Simposio 5: 155-162, San Miguel de Tucumán.
- Spacapan, J.B., Palma, O., Galland, O., Manceda, R., Rocha, E., D'Odorico, A. y Leanza, H.A. 2018. Thermal impact of igneous sill complexes on organic-rich formations and implications for petroleum system: a case study in the northern Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 91: 519-531.
- Svensen, H., Planke, S., Malthes-Sørensen, A., Jamtveit, B., Myklebust, R., Eidem, T.R. y Rey, S.S. 2004. Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming. *Nature* 429: 542-545.
- Svensen, H., Iyer, K., Schmid, D.W. y Mazzini, A. 2017. Modelling of gas generation following emplacement of an igneous sill below Lusi, East Java, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*. DOI 10.1016/j.marpetgeo.2017.07.007
- Sydnnes, M., Fjeldskaar, W., Løtveit, I. F., Grunaleite, I., Cardozo, N. 2018. The importance of sill thickness and timing of sill emplacement on hydrocarbon maturation. *Marine and Petroleum Geology* 89, 500-514.
- Sweeney J. y Burnham A.K. 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 74: 1559-1570.
- Tissot, B.P. y Welte, D.H. 1984. *Petroleum formation and occurrence*. Springer, New York.
- Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M. y Ramos, V.A. 2010. Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén Basin: constraints on the Andean uplift from U–Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics* 489: 258-273.
- Witte, J., Bonora, M., Carbone, C. y Oncken, O. 2012. Fracture evolution in oil producing sills of the Rio Grande Valley, northern Neuquén Basin, Argentina. *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* 96: 1253-1277.

Recibido: 1 de diciembre, 2017

Aceptado: 27 de abril, 2018