

EFFECTO TÉRMICO DE UN COMPLEJO INTRUSIVO Y SU INFLUENCIA EN LA MADURACIÓN DE LAS FORMACIONES VACA MUERTA Y AGRIO EN EL SUR DE LA FAJA PLEGADA Y CORRIDA DE MALARGÜE, CUENCA NEUQUINA SURMENDOCINA, ARGENTINA

Álvaro García Galluzzi y Yuliana Contreras

RESUMEN

La Faja Plegada y Corrida de Malargüe se caracteriza por presentar una gran cantidad de intrusivos ígneos emplazados en varias formaciones de la Cuenca Neuquina. Estos se emplazan preferentemente en las principales rocas madres de la cuenca, las formaciones Vaca Muerta y Agrio. El emplazamiento de *sills* en pelitas ricas en materia orgánica provoca la maduración de las mismas debido al efecto térmico ocasionado, con el consecuente cracking del kerógeno y generación de hidrocarburos. Además, los cuerpos ígneos son los reservorios por excelencia en este sector de la cuenca. Para evaluar el efecto de los intrusivos en las formaciones Vaca Muerta y Agrio en el sector sur de la FPCM se han utilizado datos un pozo en la ladera del Volcán Cochiquito, sur de Mendoza. Se utilizaron las descripciones de *cutting* y perfilaje de pozos para identificar los topes de las formaciones y los intrusivos. Los intrusivos generalmente presentan rastros de hidrocarburos, y los datos de cromatografía gaseosa de pozo muestran un incremento en la detección de gas cerca de los mismos. Además se realizaron modelos 1D para evaluar la maduración de las rocas madre debido al emplazamiento de las intrusiones, los cuales fueron calibrados en base a datos de pirolisis y reflectancia de vitrinita. En los modelos puede observarse un aumento de la maduración de las formaciones Vaca Muerta y Agrio en las zonas cercanas a los intrusivos. Se concluye que la maduración y consecuente generación de hidrocarburos en el sector sur de la Faja Plegada y Corrida de Malargüe se produce por el emplazamiento de intrusivos ígneos en las formaciones Vaca Muerta y Agrio.

INTRODUCCIÓN

El emplazamiento de intrusivos ígneos en rocas ricas en materia orgánica produce un impacto térmico que provoca la generación de hidrocarburos (Aarnes *et al.*, 2010; Spacapan *et al.*, 2018, 2017; Sydnes *et al.*, 2018). En la Cuenca Neuquina este efecto ha sido demostrado en el sur de la provincia de Mendoza, en el área del Valle del Río Grande (Spacapan *et al.*, 2017; Spacapan *et al.*, 2018) y en la Altiplanicie del Payún (Rodríguez Monreal *et al.*, 2009). A su vez, en estas áreas los cuerpos ígneos son los principales reservorios productores de hidrocarburos (Bermúdez and Delpino, 2008; Delpino *et al.*, 2014; Comeron *et al.*, 2012; Schiuma y Llambías 2014). Estos se emplazan preferentemente en rocas de baja competencia, como las pelitas ricas en materia orgánica de las formaciones Vaca Muerta y Agrio, las rocas evaporíticas de las formaciones

Auquileo y Huitrín, como así también en depósitos continentales del Gr. Neuquén. En este trabajo analizaremos el efecto de los intrusivos ígneos en la maduración de las principales rocas generadoras de la Cuenca Neuquina, las Fms. Vaca Murta y Agrio, en el sector sur de la Faja Plegada y Corrida de Malargüe. Para ellos se escogió el área del volcán Cochiquito, emplazado en las sedimentitas de la Cuenca Neuquina, y dónde se cuenta con una perforación para el análisis de las formaciones en el subsuelo.

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina se inició como una cuenca de rift durante el Cretácico tardío-Jurásico inferior, pasando a una etapa de *postrift* y subsidencia termal durante el Jurásico tardío al Cretácico temprano, y finalmente una etapa de cuenca de antepaís e inversión tectónica desde el Cretácico superior hasta el Neógeno (Howell *et al.*, 2005; Vergani *et al.*, 1995). Durante la etapa de *postrift* se depositaron las principales rocas generadoras de hidrocarburos de la cuenca, las formaciones Vaca Muerta y Agrio, las cuales son el objeto de estudio de este trabajo. Durante la etapa de antepaís se produjo la inversión de las fallas de rift que delimitaban la cuenca triásica, produciendo la generación de fajas plegadas y corridas, como la Faja Plegada y Corrida de Malargüe (Kozlowski *et al.*, 1995; Manceda and Figueroa, 1993). A su vez, se produjeron grandes erupciones volcánicas, representadas por los ciclos eruptivos Molle y Huincán (Combina and Nullo, 2011).

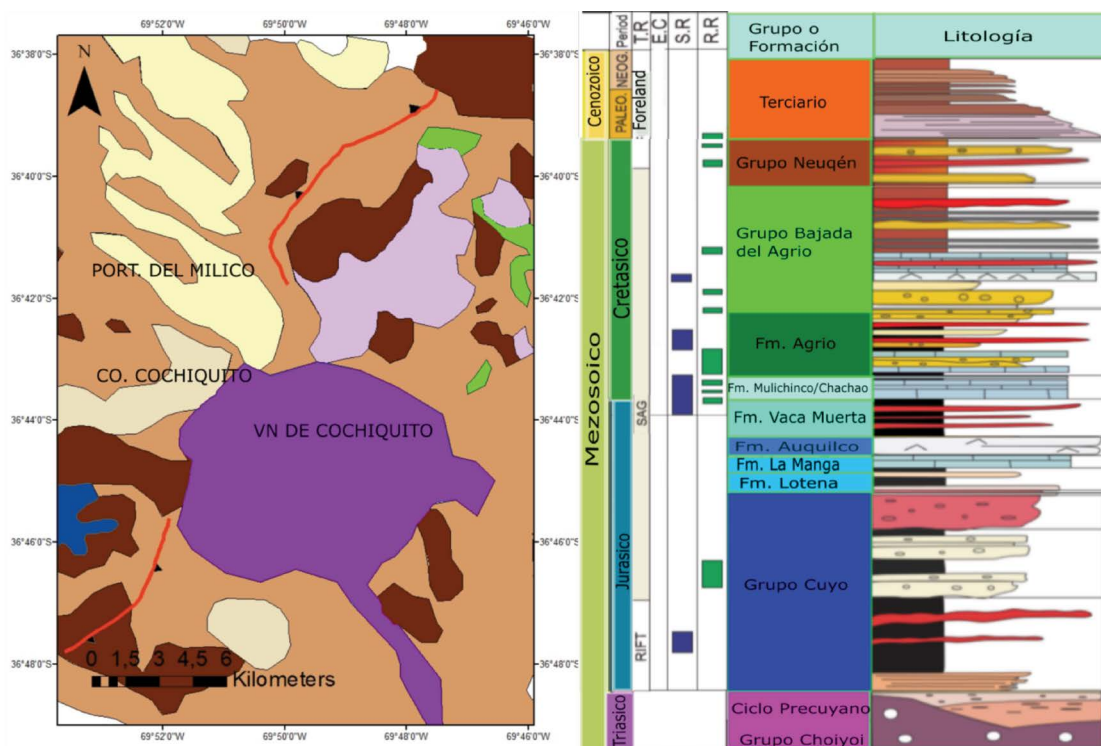


Figura 1. A. Mapa geológico del área de estudio.

El volcán Cochiquito se encuentra en el sur de la localidad de Ranquil del Norte, en el sector surmendocino de la Cuenca Neuquina (Fig. 1). Corresponde la zona sur de la Faja Plegada y Corrida de Malargüe. Este volcán es producto del vulcanismo cenozoico, asignándolo a la Fm. El Puente, del Pleistoceno (Narciso *et al.*, 2001). Alrededor del área de estudio también se encuentran afloramientos del vulcanismo del Gr. Molle, Gr. Huincán y Fm. Chapúa. 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 Palauco, dentro de la Formación Colipilli, definida por Llambías y Rapela (1989) en el norte de Neuquén para diferenciar las facies intrusivas del Mollelense o Ciclo Eruptivo Molle. En esta área las principales rocas reservorios son los intrusivos ígneos relacionados a estos eventos eruptivos.

DATOS Y METODOLOGÍA

Para evaluar el efecto térmico del emplazamiento de intrusivos ígneos en las formaciones Vaca Muerta y Agrio en el área del Volcán Cochiquito se han utilizado datos de un pozo localizado en las laderas del volcán. Los datos han sido obtenidos de informes internos de YPF. Se contó con la descripción de *cutting*, perfilajes de pozo, cromatografía de pozo y análisis de pirólisis. Los datos fueron ploteados en el software Petrel para su visualización e interpretación.

Los topes formacionales fueron obtenidos de los legajos del pozo, y posteriormente corregidos en base a la interpretación de los perfiles eléctricos. Se contó con los perfiles de Rayos Gamma (GR), resistividad (Rs) y sísmico (DT).

Una vez identificados los topes formacionales y de los intrusivos, se realizó un modelo 1D para evaluar el efecto de los intrusivos en las formaciones Vaca Muerta y Agrio. Las litologías utilizadas fueron determinadas a partir de la descripción de *cutting* para cada formación. Las edades de depositación fueron asignadas en base a reportes internos de YPF. Los elementos del sistema petrolero fueron determinados en base a Vergani *et al.* (2011). Los parámetros de Carbon Orgánico Total (COT) e Índice de Hidrógeno (IH) fueron obtenidos de Spacapan *et al.* (2018). Para el cálculo de la maduración se utilizó la ecuación Easy %Ro de Sweeney and Burnham (1990). Las condiciones de borde utilizadas fueron las default del software. La Temperatura de interface agua sedimento (Sediment Water Interface Temperature, SWIFT) fue estimada en base al modelo de Wygrala (1989). El flujo calórico fue estimado en base al modelo de la corteza de Jarvis & McKenzie (1980), delimitando los periodos de *synrift* y *postrift* en base a Vergani *et al.* (1995) y Howell *et al.* (2005).

La composición promedio de las intrusiones es andesítica, basado en el legajo de pozo. Los parámetros térmicos utilizados corresponden a este tipo de composiciones. La edad de emplazamiento fue estimada en base a los ciclos tectono-volcano-sedimentarios de Combina y Nullo (2011) y a la hoja geológica de la zona (Narciso *et al.*, 2001) debido a la falta de dataciones radiométricas.

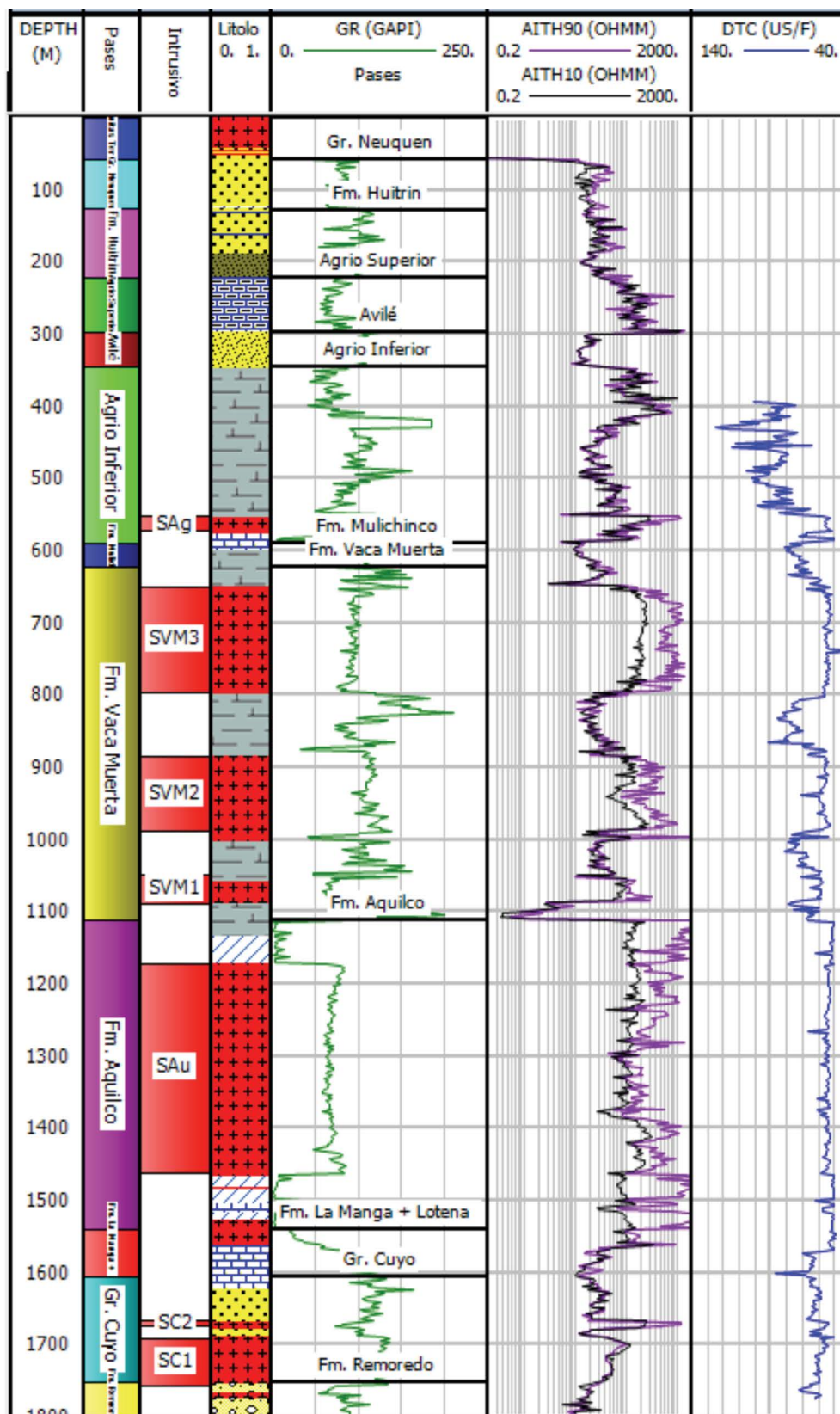


Figura 2. Perfilaje de pozo mostrando los logs de GR, Rs y DT. Nótese los valores bajos de GR y altos de Rs y DT en los intrusivos. Los topes formacionales fueron obtenidos de la descripción de *cutting*.

Luego se compararon los resultados del modelado 1d con los datos de pirólisis y reflectancia de vitrinita (%Ro) para calibrar el modelo. Cabe aclarar que los datos de %Ro no son confiables debido a la gran dispersión en las mediciones.

Adicionalmente se utilizó la cromatografía de pozo para determinar la cantidad de gas detectada en las zonas cercanas a los intrusivos.

RESULTADOS

En base al análisis de la descripción de *cutting* y los perfilajes de pozos se pudo determinar la presencia de 7 intrusivos en la columna sedimentaria (Fig. 2). Los intrusivos ígneos se caracterizan por tener valores bajos de GR y altos de Rs y DT, facilitando su interpretación en los perfiles. Los primeros dos intrusivos se encuentran emplazados en el Gr. Cuyo, con 65 m de espesor (SC1) el inferior y 8 m el superior (SC2). El tercer intrusivo (SAu), de 290 m de espesor, se encuentra emplazado en la Fm. Auquilco. En la Fm. Vaca Muerta se detectaron tres intrusivos, con 38 m de espesor el inferior (SVM1), 104 m el del medio (SVM2) y 146 m el superior (SVM3). Finalmente se identificó un *sill* de 20 m en la Fm. Agrio (SAg). Los intrusivos de más de 100 m fueron clasificados como lacolitos, mientras que los de menos espesor fueron clasificados como *sills*. A los intrusivos del Gr. Cuyo se les asignó edad Cretácico Tardío, correspondiente a la Fm. Pelán. Al intrusivo de la Fm. Auquilco se le asignó edad Eoceno tardío, equivalente a la Fm. Colipilli. A los intrusivos de Vaca Muerta se les asignó edad Oligoceno tardío-Mioceno temprano, correspondiente al Ciclo Eruptivo Molle. Finalmente al intrusivo en Agrio se le asignó edad Mioceno superior, correspondiente al Ciclo Eruptivo Huincán (Fig. 3).

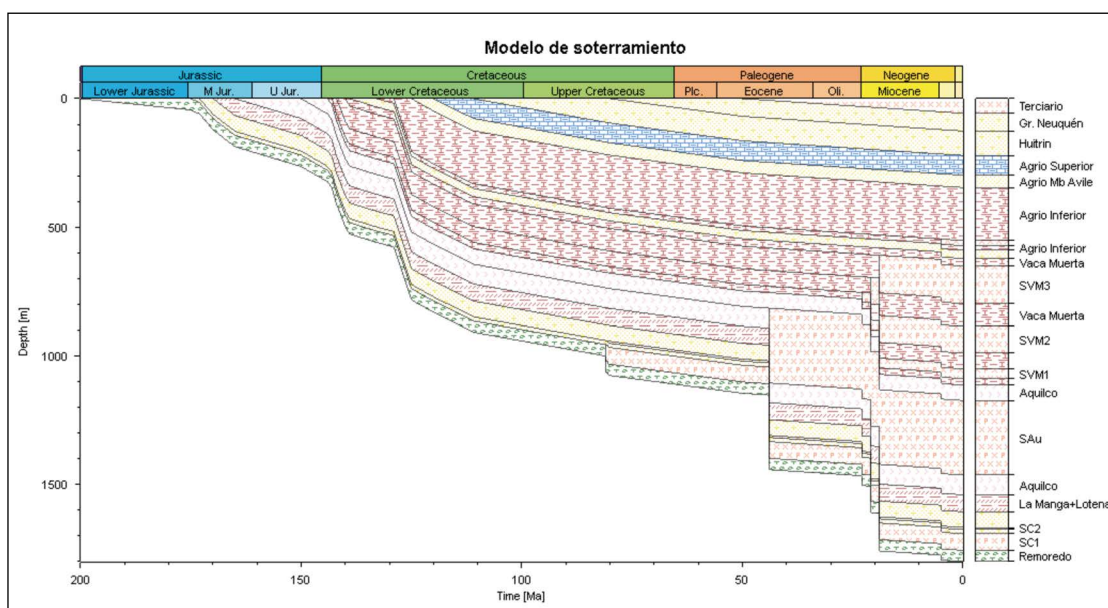


Figura 3. Modelo de soterramiento. Nótese que las Fms. Vaca Muerta y Agrio se encuentran a menos de 1000m de profundidad, seguramente debido al levantamiento producido durante la formación de la Faja Plegada y Corrida de Malargüe.

Los resultados del modelado 1D muestran que a los 25 Ma, antes del emplazamiento de las intrusiones en la Fm. Vaca Muerta, ésta se encontraba inmadura, con un %Ro de 0.35 (Fig. 4). Luego del emplazamiento de los *sills* en la Fm. Vaca Muerta se puede observar un aumento en la maduración de las mismas, alcanzando la sobremaduración. Además, el índice de transformación de kerógeno (TR) muestra que para todo el espesor de Vaca Muerta y la base de Agrio, el 100% de la materia orgánica fue transformada a kerógeno (Fig. 5).

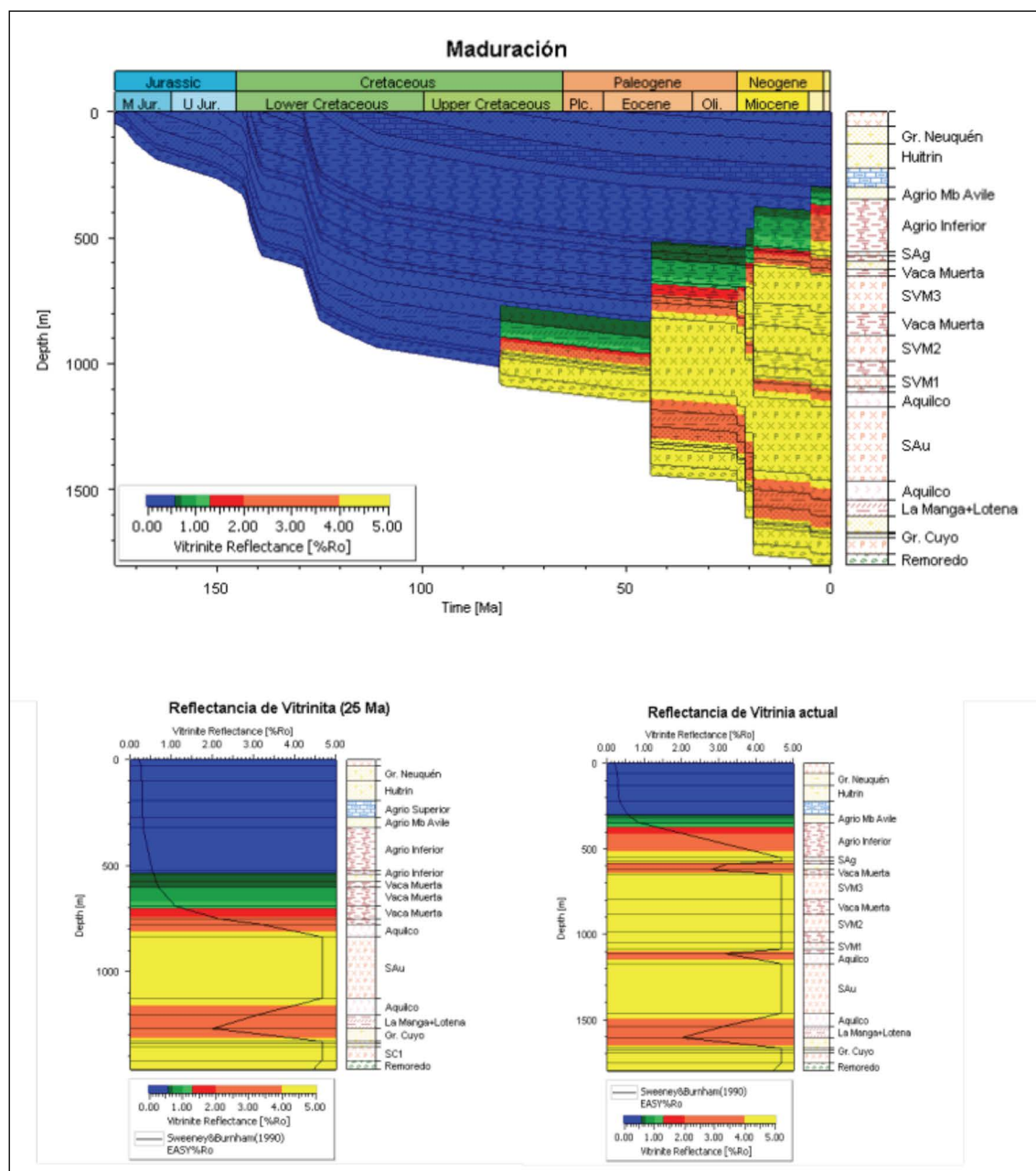


Figura 4. Modelo 1D de maduración. A los 25 Ma, antes del emplazamiento de los intrusivos, las formaciones Vaca Muerta y Agrio se encontraban inmaduras. En la actualidad, ambas formaciones se encuentran sobremaduras debido el efecto térmico producido por los intrusivos. Únicamente Agrio superior se encuentra en ventana de Petróleo.

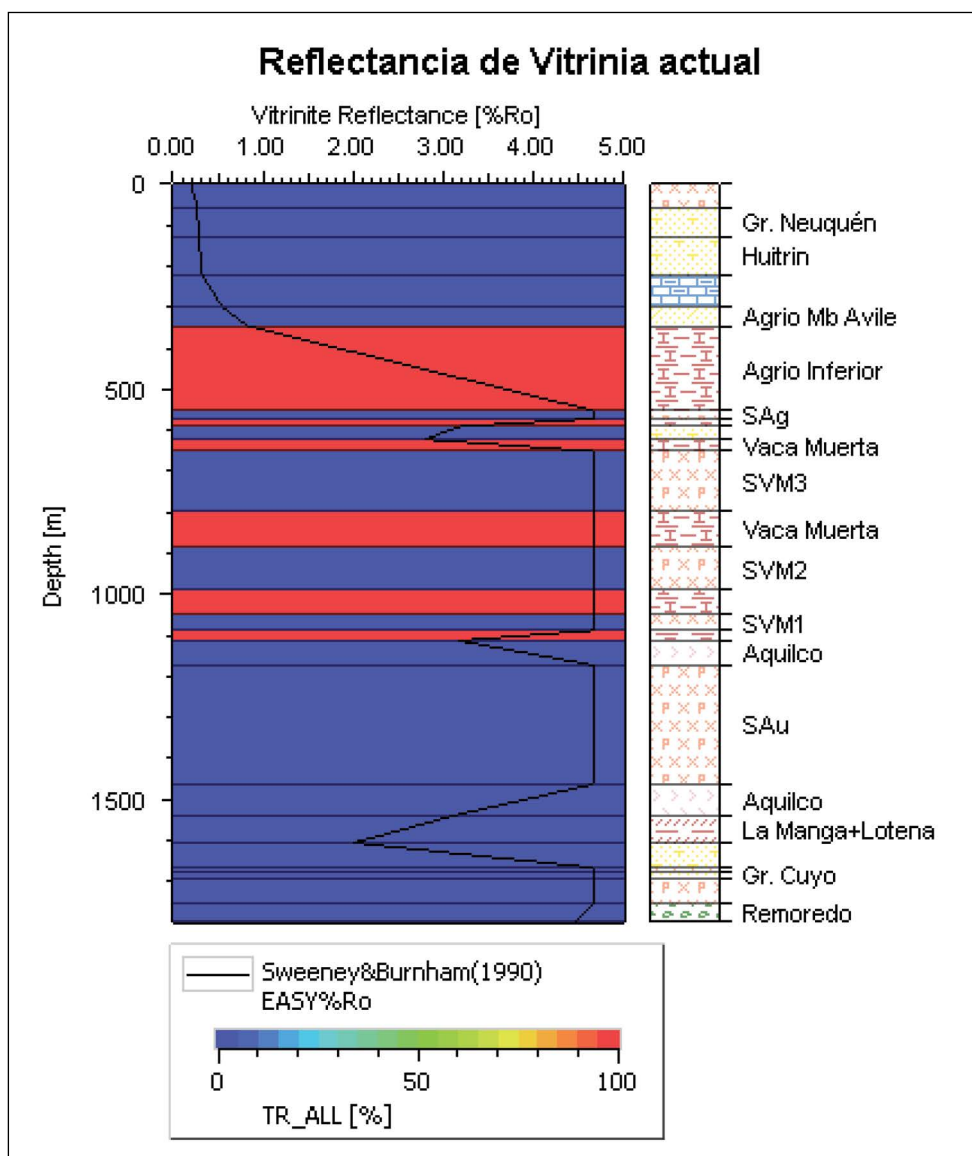


Figura 5. Modelo de Transformación del Kerógeno (TR). En la actualidad el 100% del kerógeno ha sido transformado debido al efecto de los intrusivos.

Los datos de pirólisis muestran una disminución del COT hacia los intrusivos ubicados en la Fm. Vaca Muerta. El IH muestra un comportamiento similar, con valores mínimos de hasta 27mgH/gCOT. Los datos de Tmax permanecen más o menos constantes, con valor promedio de 409 °C (Fig. 6).

El contenido mínimo de S1 es de 0.45 mg de Hcs./g de roca y el máximo 2.25.mg de Hcs./g de roca en el contacto con los intrusivos en Vaca Muerta. Los valores de S2 oscilan entre 0.17 y 2.13 mg de Hcs./g de roca, con los valores máximos en zonas cercanas a los intrusivos.

La cromatografía de pozo muestra un incremento de Gas Total en la Fm. Vaca Muerta en el contacto con los intrusivos, con valores de 14000 ppm a los 1026m (entres SVM1 y SVM2),

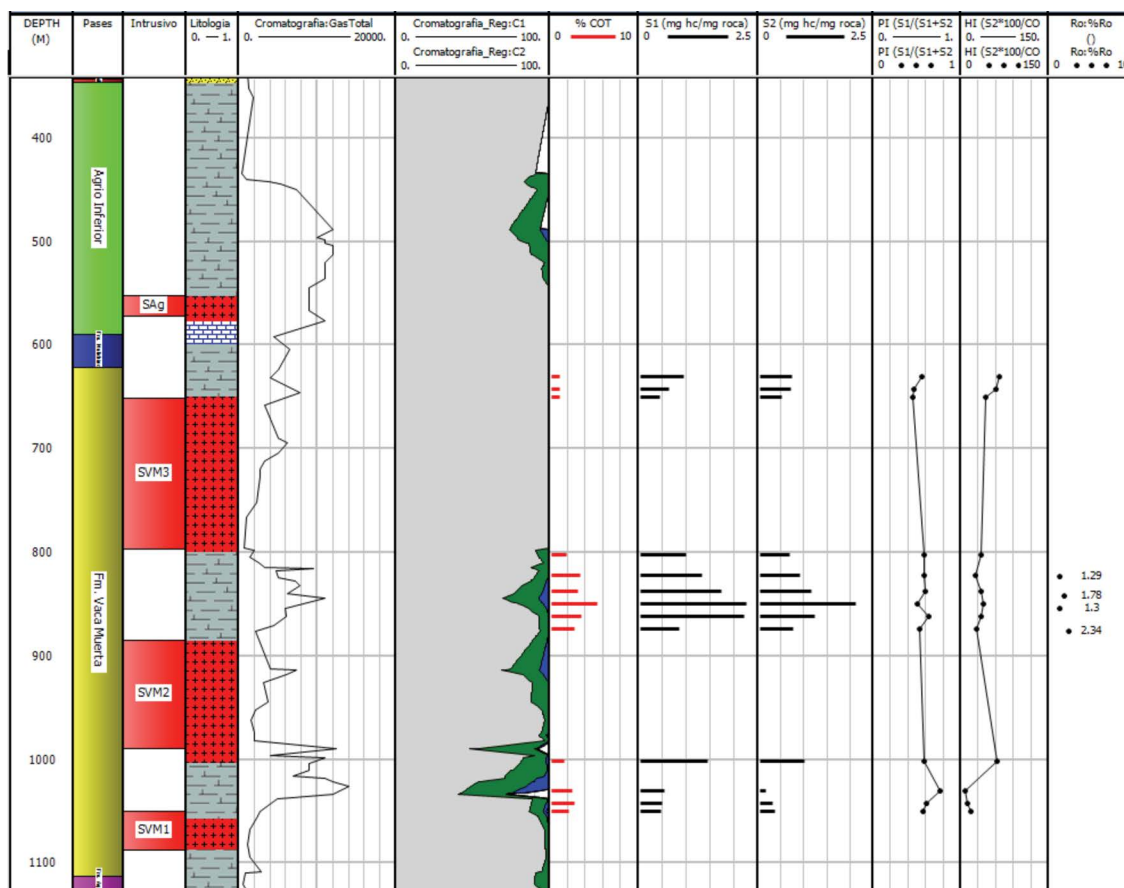


Figura 6. Cromatografía gaseosa de pozo in situ y datos del análisis de pirólisis. La curva de Gas Total aumenta cerca de los intrusivos, concordantemente con una disminución del COT e IH y un aumento del pico S2. Todo estos parámetros indican mayor maduración, hasta sobremaduración cerca de los intrusivos. En el último log se ven los datos de reflectancia de vitrinita, que indican ventana de gas a sobremaduración.

11000 a los 844m (entre SVM2 y SVM3). El valor máximo de Gas Total, 23000 ppm, se detectó a los 1316 m, en el intrusivo emplazado en la Fm. Aquilco. En concordancia con los valores más altos de Gas Total cerca de los intrusivos, también aumenta la cantidad de C2 y C3. A su vez se detectaron rastros de hidrocarburos en los intrusivos, indicando generación de hidrocarburos.

Por último se generó un modelo de sistema petrolero teniendo en cuenta los resultados del modelo (Fig. 7). El momento crítico se produce durante el Oligoceno-Mioceno, debido al emplazamiento de los intrusivos en Vaca Muerta y Agrio. Además los intrusivos fueron considerados reservorios fracturados. La generación de la trampa se estima a partir del Eoceno concomitante con la generación de la Faja Plegada y Corrida de Malargüe. Cabe destacar que los intrusivos ígneos presentaban rastros de hidrocarburos, por lo que fueron ensayados. Todos los ensayos resultaron en aporte de agua únicamente.

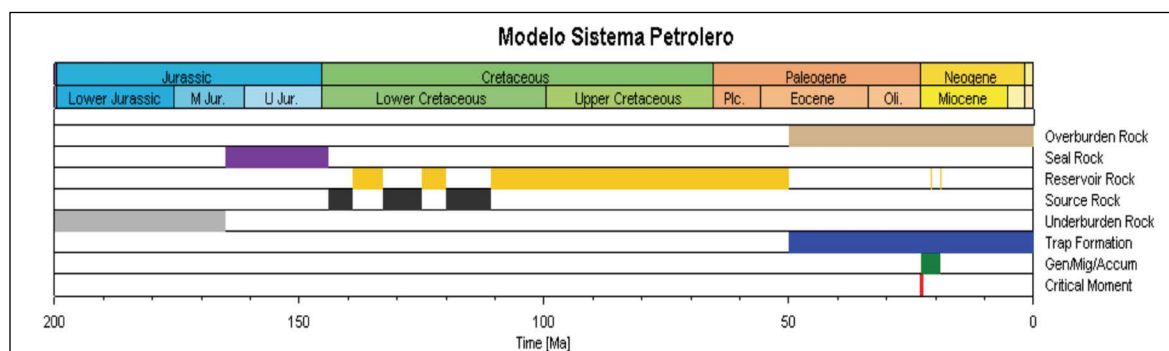


Figura 7. Modelo de sistema petrolero. El momento crítico se produce en el Mioceno debido al emplazamiento de los intrusivos en las formaciones Vaca Muerta y Agrio. La falta de sello pudo haber sido el motivo por el cual ninguno de los intrusivos haya sido productor de hidrocarburos.

INTERPRETACIÓN Y DISCUSIONES

En base a los resultados obtenidos del modelado 1D, se puede observar que la mayor maduración de las formaciones Vaca Muerta y Agrio se produce luego del emplazamiento de los cuerpos ígneos (SAu, VM1, SVM2, SVM3, SAg). Se interpreta que esto es producto del efecto térmico de los intrusivos, produciendo la maduración de la materia orgánica y consecuente generación de hidrocarburos. Los resultados de los modelos son coherentes con los datos de Vitritina y de pirólisis. La disminución del COT y el HI hacia el contacto con los intrusivos evidencia un aumento en el grado de maduración. A su vez, el pico S2 aumenta hacia las cercanías de los *sills*. Los datos de cromatografía muestran un incremento del Gas Total, indicando una mayor generación de hidrocarburos. Cabe destacar que el pozo en estudio se encuentra en una zona plegada y fallada, como es el sur de la FPyC de Malargüe. En este ámbito el pozo se encuentra en la charnela de un anticlinal, levantado por una falla de despegue. Esto tiene fuertes implicancias en el modelado 1D, ya que las profundidades detectadas por el sondeo no son las máximas alcanzadas por las formaciones, subestimando el modelo su maduración por soterramiento. Sin embargo, los resultados del modelo muestran que el efecto de los intrusivos produce que toda la materia orgánica se transforme a kerógeno (TR de 100%, Fig.), encontrándose las formaciones Vaca Muerta y Agrio sobremaduras.

Un factor determinante en los modelos es la edad de los intrusivos. Al carecer de dataciones radiométricas se le asignaron edades en relación a los ciclos eruptivos de Combina y Nullo (2011). Al variar la edad de los intrusivos sólo varía la edad en la que se produce la sobremaduración de Vaca Muerta y Agrio, pero el resultado siempre es el mismo. Independientemente del tiempo de emplazamiento, la maduración alcanzada será siempre la misma. Ya que una vez alcanzado un grado de maduración este es irreversible, por lo que el próximo intrusivo a emplazarse aumentará este grado. Es importante determinar el tiempo de emplazamiento para determinar el tiempo de generación de los hidrocarburos.

Otro punto importante es ausencia de hidrocarburos en los reservorios ígneos y en reservorios convencionales (e.g. Fm. Huitrín, Mb Avilé). Esto puede deberse a que los intrusivos ígneos han sobremadurado las rocas madres. Otra posibilidad es que debido a la falta de un sello (ausencia del yeso en la Fm. Huitrín) los hidrocarburos generados no hayan podido acumularse.

CONCLUSIONES

Las conclusiones principales de este trabajo son enumeradas a continuación:

- La maduración de las formaciones Vaca Muerta y Agrio en el área de estudio se debe principalmente al efecto térmico ocasionado por el emplazamiento de intrusivos ígneos.
- Las formaciones Vaca muerta y Agrio se encuentran sobremaduras, a excepción del Agrio Superior que se encuentra en ventana de petróleo.
- Agrio superior podría ser un objetivo como reservorio no convencional.
- Los reservorios ígneos han resultado en producción de agua debido a la sobremaduración de las rocas madres.
- Los reservorios de la Fm. Huitrín no han podido ser cargados debido a la falta de sello.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a YPF y a Y-TEC por la obtención de los datos y el acceso a los softwares utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS

- Aarnes, I., Svensen, H., Connolly, J.A.D., Podladchikov, Y.Y., 2010. How contact metamorphism can trigger global climate changes : Modeling gas generation around igneous *sills* in sedimentary basins. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 7179–7195. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.09.011>
- Combina, A.M., Nullo, F., 2011. Ciclos tectónicos, volcánicos y sedimentarios del Cenozoico del sur de Mendoza-Argentina (35°-37°S y 69°30'W). *Andean Geol.* 38, 198–218.
- Howell, J.A., Schwarz, E., Spalletti, L.A., Veiga, G.D., 2005. The Neuquén Basin: an overview, in: Veiga, G.D., Spalletti, L.A., Howell, J.A., Schwarz, E. (Eds.), *The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamic*. Geological Society, London, Special Publication, pp. 1–14.
- Kozłowski, S.E., Manceda, R., Ramos, V.A., 1995. Estructura, in: Ramos, V.A. (Ed.), *Geología y Recursos Naturales de Mendoza*, XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Mendoza. Relatorio I. pp. 235–256.
- Manceda, R., Figueroa, D., 1993. La inversión del rift mesozoico en la Faja Fallada y Plegada de Margüe, provincia de Mendoza. *Proceedings*, 12th

- Congr. Geológico Argentino Mendoza 7, 219–232.
- Narciso, V., Santamaría, G., Zanettini, J.C., 2001. Hoja Geológica 3769-I. Barrancas, Provincas de Mendoza y Neuquén. Serv. Geológico Min. Argentina. Inst. Geol. y Recur. Miner. Boletín N°, 49 p.
- Rodriguez Monreal, F., Villar, H.J., Baudino, R., Delpino, D., Zencich, S., 2009. Modeling an atypical petroleum system: A case study of hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous intrusions in the Neuquen Basin, Argentina. *Mar. Pet. Geol.* 26, 590–605. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.01.005>
- Spacapan, J.B., Palma, J.O., Galland, O., Manceda, R., Rocha, E., D’Odorico, A., Leanza, H.A., 2018. Thermal impact of igneous *sill*-complexes on organic-rich formations and implications for petroleum systems: A case study in the northern Neuquén Basin, Argentina. *Mar. Pet. Geol.* 91, 519–531. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.01.018>
- Spacapan, J.B., Palma, J.O., Manceda, R., Rocha, E., Galland, O., Leanza, H.A., Ruiz, R., Labayén, I., 2017. Modelados 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. XX Congr. Geológico Argentino. Simp. 5. Geol. la Form. Vaca Muerta 155–162.
- Sydnes, M., Fjeldskaar, W., Fjeldskaar, I., Grunnal-eite, I., Cardozo, N., 2018. The importance of *sill* thickness and timing of *sill* emplacement on hydrocarbon maturation. *Mar. Pet. Geol.* 89, 500–514. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.10.017>
- Vergani, G.D., Tankard, A.J., Belotti, H.J., Welsink, H.J., 1995. Tectonic Evolution and Paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina, in: Tankard, A.J., Suárez S., R., Welsink, H.J. (Eds.), *Petroleum Basins of South America*. AAPG Memoir 62, pp. 383–402. <https://doi.org/10.1306/7834F6E1-1721-11D7-8645000102C1865D>