

YACIMIENTO SAN MARTÍN: RESERVORIO DE HIDROCARBUROS EN ROCAS VOLCÁNICAS NATURALMENTE FRACTURADAS DE LA SERIE TOBÍFERA, CUENCA AUSTRAL, TIERRA DEL FUEGO, ARGENTINA

Enrique Feinstein¹, Hernán de la Cal¹, Adriana Villarreal¹, Oscar Berdini¹

1: Roch S.A. efeinstein@roch.com.ar, hdelacal@roch.com.ar, avillarreal@roch.com.ar, oberdini@roch.com.ar

Palabras clave: Hidrofracturas, Ignimbritas, Jurásico, Petróleo

ABSTRACT

As a result of a pyroclastic flow occurred during the final rift stage at the Austral Basin, an ignimbrite with a minimum estimated volume of 40 km³ was deposited in the northern zone of Tierra del Fuego. This deposit extends in both Argentine and Chile territory, covering an area of at least 400 km² and thickness between 100 m to 200 m, showing large-scale tabular geometry. Textural and structural features indicate rhyodacitic, eutaxitic, lapilli-tuff facies with evidence of high degree of welding and devitrification processes related to a simple cooling unit. Fracture network is characterized by hydrofractures (fluid-assisted-fractures), extensional (Mode I) and to a lesser extent, shear (Mode II) fractures. Geometry, type and structural features of infill and genesis of fracture sets, as well as of crosscut relationships, suggest that hydrofractures and extensional fractures are related to thermal contraction/hydraulic processes occurred during the cooling stage of the ignimbrite unit, whereas the shear fractures are related to post-cooling stages, probably associated with tectonic deformation. Fracture population constitutes a natural fractured reservoir with excellent hydraulic conditions, demonstrated by the high production rates of the wells drilled in the field, reaching up to 400 m³/d of oil. In this contribution, the main characteristics of the petroleum system at the San Martín field are described.

INTRODUCCIÓN

Si bien los principales reservorios de gas y petróleo desarrollados hasta el presente en la Cuenca Austral se relacionan con la Fm. Springhill, tanto en las provincias de Santa Cruz y Tierra del Fuego, como en el sector chileno de la cuenca se han descubierto y desarrollado acumulaciones de hidrocarburos vinculadas a las rocas volcánicas y volcanoclásticas de la Serie Tobífera. Antecedentes de acumulaciones en esta sucesión volcánica de *sin-rift* Jurásica han sido documentados por Bravo y Herrero (1997) (Isla Tierra del Fuego y Continente, Chile), Hinterwimmer (2002) (provincia de Santa Cruz, Argentina), Sruoga *et al.* (2004) (provincia de Santa Cruz, Argentina) y Azpiroz *et al.* (2018) (provincia de Tierra del Fuego, Argentina y Chile).

Sin embargo, en el sector más austral de la cuenca en el territorio argentino, los aislados antecedentes de acumulaciones de petróleo y gas han conducido en la mayoría de los casos, a considerar a la Serie Tobífera como el basamento económico en la provincia de Tierra del Fuego.

La registración de nueva sísmica 3D en el año 2015 y la perforación de un nuevo pozo exploratorio en el año 2017, cuyo objetivo era la evaluación de la Serie Tobífera, permitieron el descubrimiento del yacimiento San Martín, comprobando la capacidad de reservorio y producción de este intervalo en dicho sector de la cuenca.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La Cuenca Austral (Fig. 1) conforma una gran depresión orientada noroeste a sudeste y limitada al oeste y sur por la Cordillera de los Andes, al este por el alto de Río Chico y al noreste por el Macizo del Deseado; su superficie cubre más de 230.000 km². La historia geológica de la cuenca ha sido descripta en numerosas publicaciones (Biddle *et al.* 1986; Robbiano *et al.* 1996; Peroni *et al.* 2002) comprendiendo una etapa inicial, de rift, relacionada a la ruptura de Gondwana, durante la cual para el sector de Tierra del Fuego se generaron numerosos grábenes y hemigrábenes rellenos por depósitos epiclásticos, volcánicos y volcanoclásticos (Rodríguez y Miller 2005) los que se agrupan en la denominada Serie Tobífera (Thomas 1949). En este marco evolutivo, la Serie Tobífera forma parte de la Provincia Magmática Chon Aike (“V2” de Pankhurst *et al.* 2000), desarrollada en la Patagonia entre el Jurásico Inferior y el Jurásico Superior. En el subsuelo de Tierra del Fuego se ha reportado una edad de 178 Ma por Pankhurst *op.cit.* en una corona recuperada en el Yacimiento Gaviota Norte (Chile). Con posterioridad (desde fines del Jurásico a principios del Cretácico), se inicia una etapa de subsidencia térmica (etapa de sag) dominada por la depositación de importantes espesores de rocas principalmente fluviales-litorales y marinas (Fms. Springhill-principal Reservorio- y Pampa Rincón-principal Roca Madre). A partir del Cretácico Tardío se produce hacia el Oeste de la cuenca, el levantamiento de la cordillera de los Andes, a raíz de lo cual se genera una flexura que da origen a una cuenca de antepaís, y la inversión tectónica de algunas estructuras previas. Este proceso da como resultado la sobrecarga sedimentaria y el basculamiento de la cuenca hacia el SO, donde el espesor sedimentario alcanza hasta 8000 m, mientras que en el Este apenas supera los 1000 m (Fig. 2).

ÁREA ANGOSTURA – YACIMIENTO SAN MARTÍN

Este sector de la cuenca está caracterizado por el desarrollo de hemigrábenes de orientación NNO-SSE, donde la columna jurásica puede superar los 1000m de espesor. En el caso de la

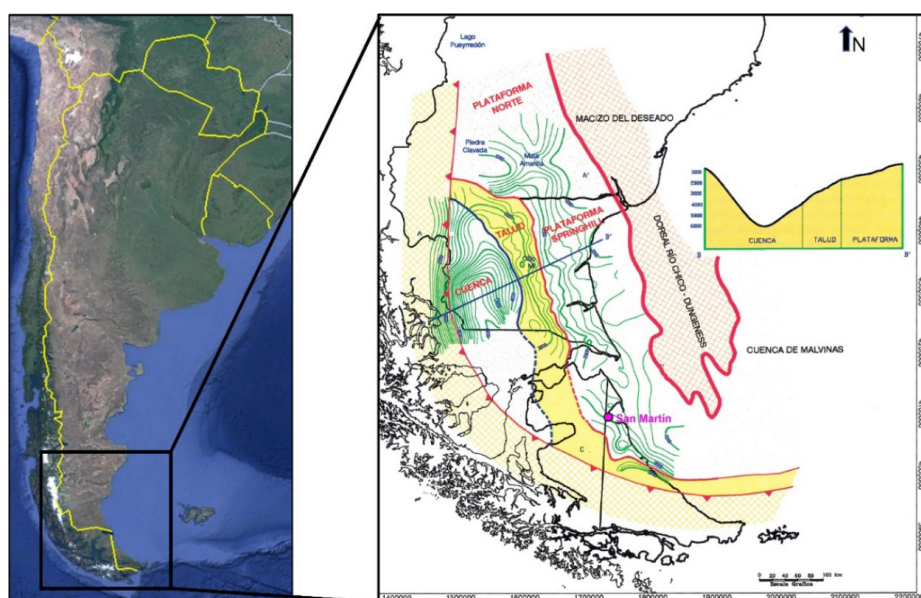


Figura 1. Desarrollo y extensión de la Cuenca Austral indicando las Regiones Morfoestructurales, y la posición del Yacimiento San Martín. Modificado de Peroni *et al.* (2002).

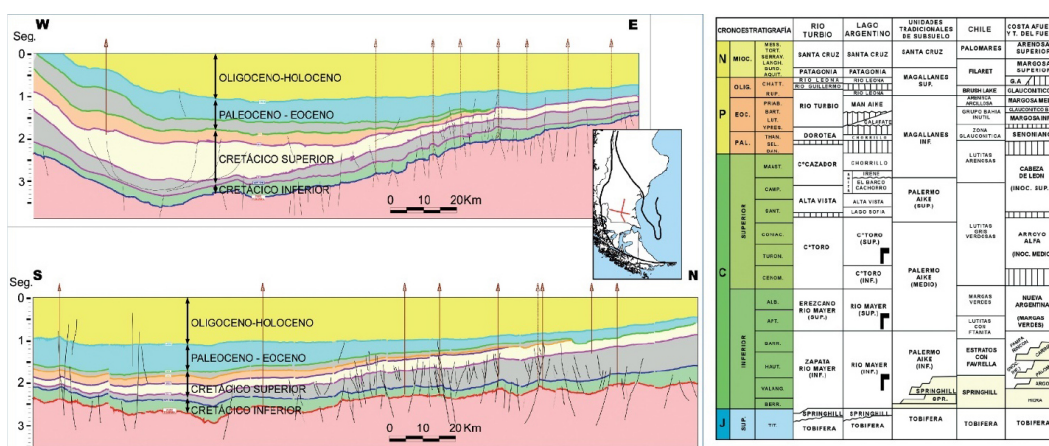


Figura 2. Cortes regionales de la Cuenca Austral, donde se observa el relleno del rifting inicial asociado a grábenes y hemigrábenes, la unificación de los depocentros aislados y el relleno regional durante la etapa de subsidencia termal, y además el cambio de polaridad asociado al relleno de la etapa de antepaís. Tomado de Rodríguez *et al.* (2008). Columna estratigráfica tipo del área de estudio.

estructura San Martín, se ubica en el hombro de un hemigraben (denominado aquí como Hemigraben Angostura) limitado al Oeste por un sistema de fallas normales que inclinan al oeste, de expresión semiregional y rechazo importante, que lo separa del depocentro Gaviota ubicado en el sector chileno. Este rasgo, denominado Falla Lagunas (Bravo y Herrero 1997) se extiende a lo largo de más de 25 km con rechazos superiores a 100 m (Fig. 3).

A partir de un análisis sismoestratigráfico, Erlicher y Trinchero (1989) reconocieron en la Serie Tobífera (Fm. Lemaire) dentro del Hemigraben Angostura, el desarrollo de 4 megasecuencias a las que denominaron de base a techo: S1-S2-S3-S4 (Fig. 4). La presencia de estas unidades fue corroborada a partir de dos sondeos perforados a principios de la década de 1990 (Fig. 5), uno de los cuales atravesó completamente el intervalo correspondiente a la Serie Tobífera (YPF.TF.ESM.es-1, Estancia San Martín), hasta finalizar en niveles atribuidos al Complejo Ígneo-Metamórfico de Tierra del Fuego (Hervé *et al.* 2010) o basamento paleozoico de la cuenca (Fig. 4).

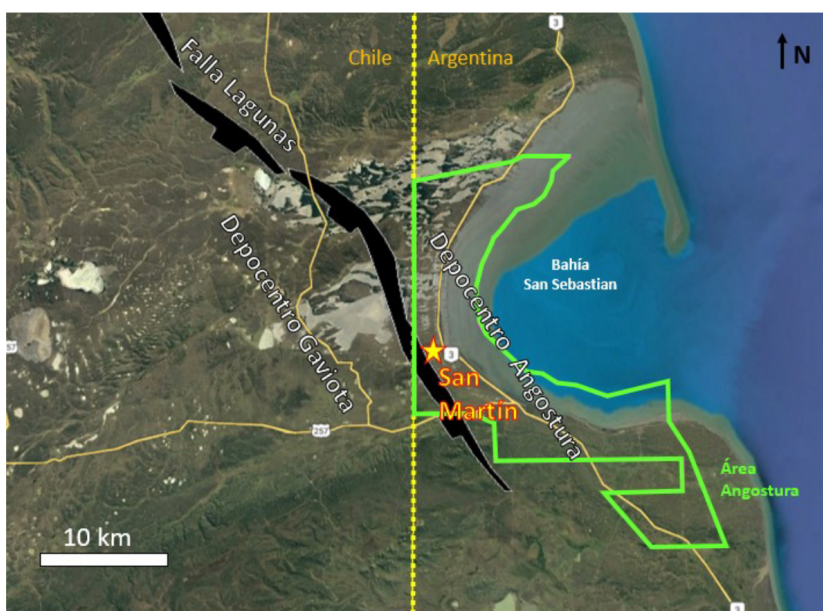


Figura 3. Desarrollo de la Falla Lagunas en subsuelo, sobre imagen satelital donde se indica la ubicación del área Angostura, el Yacimiento San Martín y hemigrábenes Gaviota y Angostura.

El estudio de *cutting* y coronas recuperadas en el pozo ESM.es-1, permitió caracterizar las secuencias mencionadas, donde se concluye que el material piroclástico es el elemento predominante. La secuencia basal S1 (~400 m), que yace directamente sobre el basamento paleozoico, está compuesta por depósitos clásticos en parte bituminosos y volcániclasticos. En discordancia sobre la anterior se encuentra la secuencia S2 (~350 m) que, según las descripciones originales, se compone de clásticos gruesos y depósitos tobáceos, los cuales han sido recientemente asignados a una sucesión de ignimbritas con distinto grado de soldamiento (LCV 2018). La secuencia S3 (~120m), inmediatamente sobre la S2, es una ignimbrita con alto grado de soldamiento producto de un flujo piroclástico. Finalmente, la secuencia S4 (~130 m) suprayace en discordancia angular a la secuencia S3, acuñándose hacia un paleo-alto, y se compone principalmente de areniscas tobáceas, arcilitas tobáceas, en parte bituminosas y piroclastitas.

Posteriormente, en el año 1992 la empresa OEA perforó el pozo OEA.TF.A.xp-5 (Angostura), donde se atravesaron ~870 m. de espesor de la Serie Tobífera corroborando la continuidad de

las 4 megasecuencias ya descriptas, reconociéndose niveles con capacidad oleogénica dentro de la secuencia S1 (Cagnolatti *et al.* 1996).

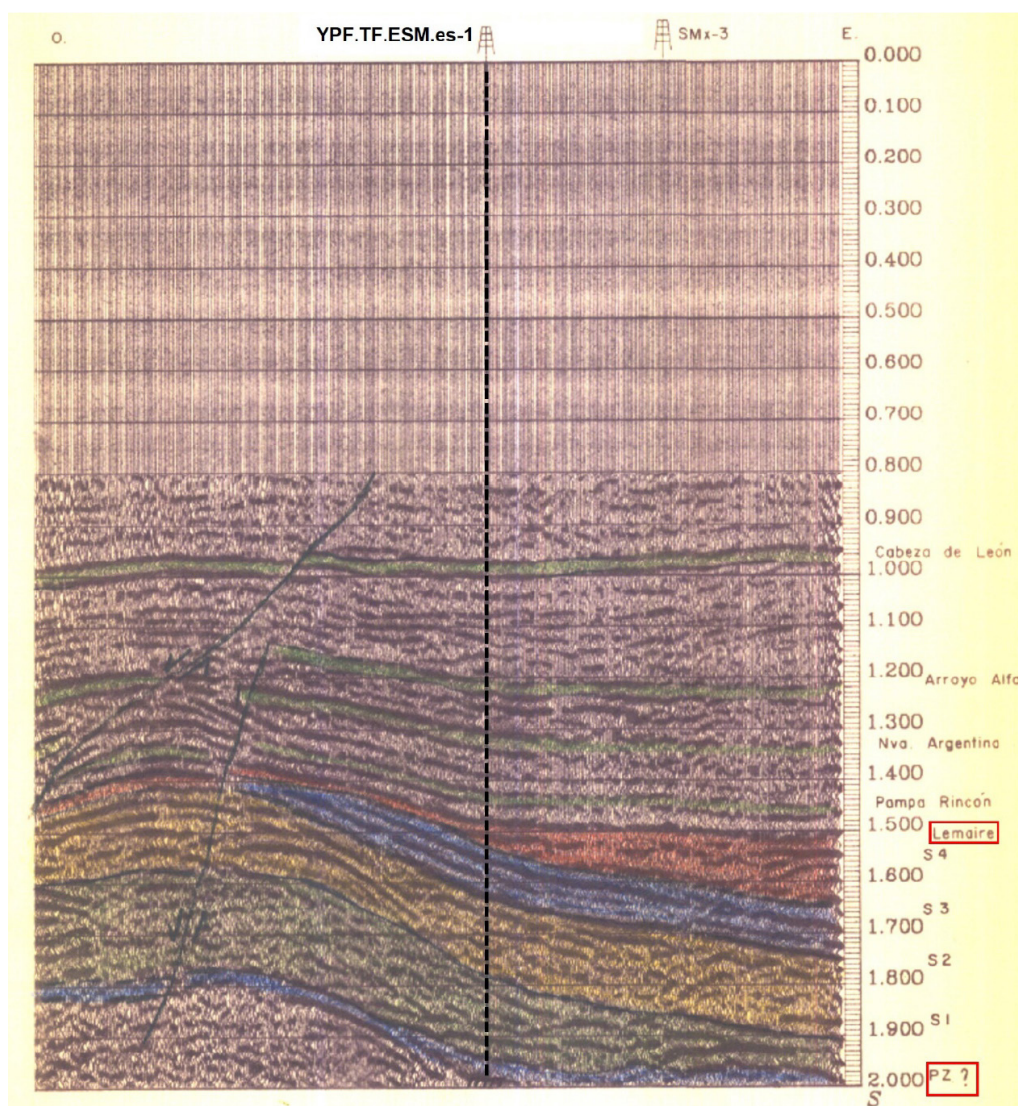


Figura 4. Sección sísmica tomada de la propuesta del pozo ESM.es-1 perforado en el año 1990 con la indicación de las 4 secuencias de la Serie Tobífera y el basamento paleozoico.

Al Oeste de San Martín y en territorio chileno, la descripción de la estratigrafía en los hemigrábenes Gaviota y Calafate presenta ciertas analogías con lo observado en el sector argentino de la cuenca (Bravo y Herrero 1997), pudiendo correlacionarse la secuencia S3, con sísmica y perfiles de pozos, en una extensa área que cubre al menos una superficie de ~400 km². No se conoce la extensión en superficie total alcanzada por este flujo piroclástico más allá de la información disponible (Fig. 5).

En el año 2015, se adquirieron nuevos datos de sísmica 3D que fueron reprocesados en el año 2019, como parte de un estudio de caracterización de reservorio. Entre 2017 y 2018 la UTE Río

Cullen-Las Violetas, operada por ROCH S.A., perfora (a unos 2 kilómetros al oeste del pozo ESM.es-1) el pozo exploratorio de SM.x-1001, descubridor de petróleo, y los pozos de avanzada SM.a-1002 y SM.a-1003 que atravesaron los 250 metros superiores de la Serie Tobífera y que resultaron asimismo productores de hidrocarburos de la Secuencia S3. En el primero de ellos (SM.a-1002) se obtuvieron 72 m de testigos coronas (56 m correspondientes a la Serie Tobífera).

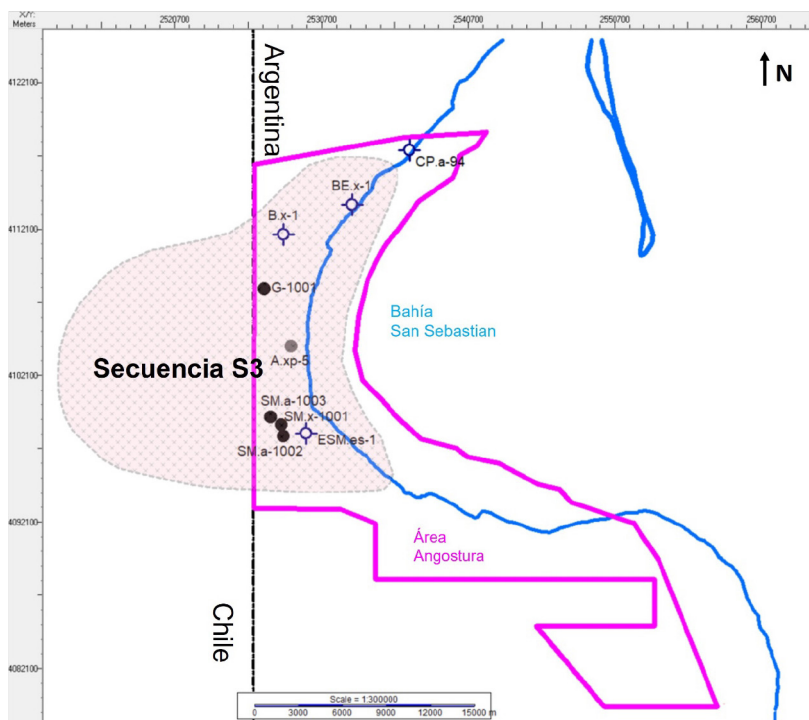


Figura 5. Extensión de la secuencia S3 reconocida en pozos y sísmica en el sector argentino e información publicada de pozos del sector chileno. Coordenadas Gauss-Krüger.

Sistema Petrolero del Yacimiento San Martín

La evaluación de biomarcadores del petróleo remite a una generación en rocas madre marinas del tipo Pampa Rincón / Nueva Argentina, con madurez térmica compatible con etapas medias de la ventana de petróleo. Sin embargo, habría una contribución menor de tipo lacustre (de la Cal *et al.* 2022, en prensa). De acuerdo con los mapas regionales de madurez de las rocas madre del Cretácico temprano (Fig. 6), se asume que la generación de hidrocarburos se ubica hacia el oeste del yacimiento San Martín, en zonas más profundas de la cuenca en territorio chileno. Desde la cocina ubicada en este sector, es muy probable que la migración se haya producido a través de carriers como las areniscas de la Fm. Springhil. Localmente (límite occidental del Yacimiento San Martín) el carrier queda enfrentado, por el rechazo de la Falla Lagunas, con los reservorios descriptos de la Serie Tobífera.

El principal reservorio en producción del yacimiento San Martín lo constituyen las rocas

piroclásticas correspondiente a la S3, las cuales conforman el principal foco de estudio de este trabajo. Se trata de depósitos piroclásticos de composiciones ácidas de gran continuidad regional.

La gravedad específica del petróleo es $\sim 33^\circ$ API, con bajo contenido de azufre, rico en hidrocarburos saturados y limitada participación de componentes NSO (compuestos que contienen Nitrógeno, Azufre y Oxígeno) y asfaltenos.

Al igual que en los yacimientos cercanos se considera a las rocas pelíticas de la formación Pampa Rincón como el sello regional de la trampa. En la zona del yacimiento San Martín, estas pelitas alcanzan una potencia de ~ 100 metros, estando caracterizadas por una sucesión de sedimentos clásticos finos de origen marino. Parcialmente, este intervalo fue estudiado a partir de testigos coronas en el pozo SM.a-1002, quedando definido como edad probable el intervalo Berriasiano hasta Hauteriviano Tardío para los testigos recuperados (Y-TEC, 2019).

La trampa, de importante componente estructural, queda definida como un anticlinal con cierre contra una falla de carácter semi-regional de rumbo NNO-SSE (Falla Lagunas) generada por sucesivas reactivaciones tectónicas, evidenciadas en la sísmica 3D por discordancias y consecuentes variaciones de espesor de la columna estratigráfica (Fig. 7). Una vez perforado el

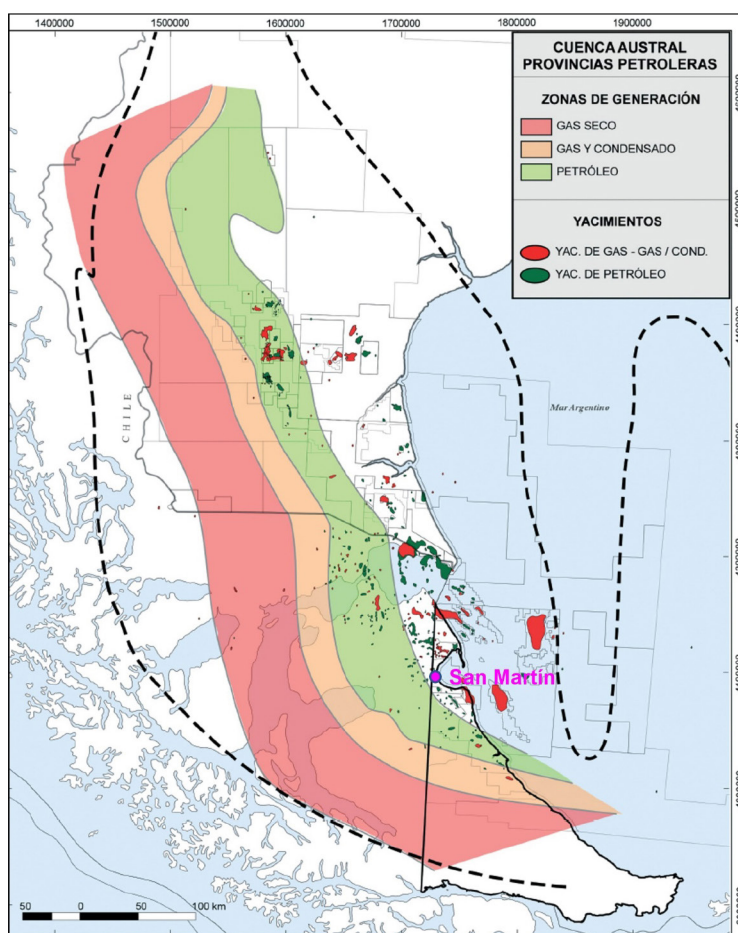


Figura 6. Zonas actuales de generación para las rocas madre del Cretácico Temprano (Rodríguez *et al.* 2008). Se indica la posición del Yacimiento San Martín.

pozo SM.x-1001 se comprobó la presencia de un delgado espesor de la Fm. Springhill en la parte alta de la estructura, lo que se suma a las evidencias de las sucesivas reactivaciones tectónicas.

La superficie del cierre en el tope de la Serie Tobífera es de 8 km². El rumbo de la estructura es paralelo al rumbo de la falla Lagunas (NNO-SSE). El modelo sísmico ha sido confirmado con los datos de los pozos perforados en el área. En el mapa estructural (Fig. 8) se observa claramente que los pozos perforados originariamente en el bloque se encontraban ubicados sobre el flanco oriental de la estructura. Más allá de la línea de costa se carece de información de subsuelo que permita extender la interpretación.

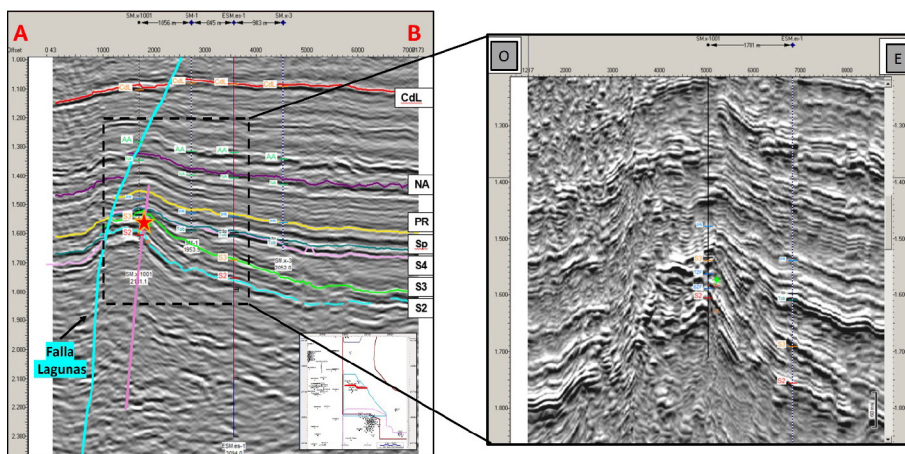


Figura 7. Sección sísmica Oeste-Este (ver traza en Figura 8), y detalle con realce de amplitudes. Se observa la disminución de espesores hacia el alto de la estructura para los niveles S4 y sucesivos. Se indica nivel productivo.

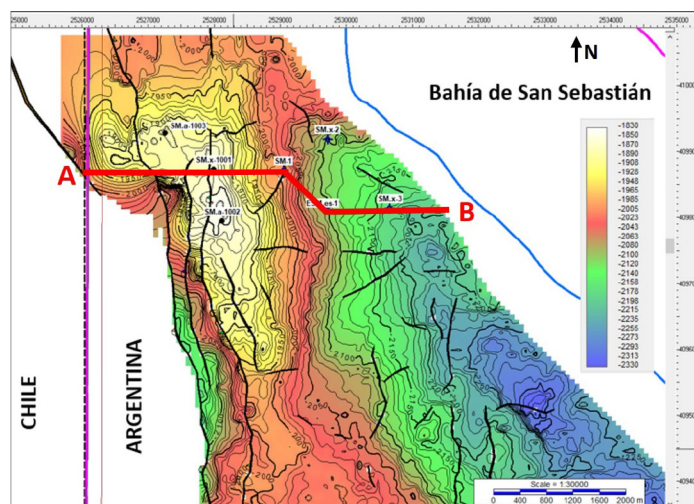


Figura 8. Mapa estructural al Tope de la secuencia S3 (m.b.n.m). Línea de costa en azul. Coordenadas Gauss-Krüger. La línea roja señala la traza del corte de la Figura 7.

Ignimbrita San Martín

Los términos superiores de la Serie Tobífera en la zona de estudio se vinculan a un proceso volcánico de carácter explosivo caracterizado en su base por depósitos de bajo grado de soldamiento de origen hidromagmático (tope secuencia S2). Una vez consumida el agua disponible en superficie, la secuencia evoluciona a un flujo piroclástico de alta temperatura que origina depósitos de alto grado de soldamiento (secuencia S3). Ambos eventos están relacionados genéticamente, siendo, desde el punto de vista geológico, cuasi sincrónicos.

Por sus características, el depósito superior de la S2 puede ser interpretado como un surge, con un espesor mínimo de 5 m en los máximos preexistentes, el que puede llegar a 40 metros en los paleobajos topográficos presentando un espesor promedio en la zona de San Martín de 10 m. El mismo se extiende al menos 10-12 km respecto de un posible centro emisor ubicado al oeste, en territorio chileno, en la zona del pozo GN-6 (Bravo y Herrero 1997).

El evento superior ha sido asignado a una ignimbrita de alto grado de soldamiento analizada a partir de *cutting* de los pozos SM.x-1001, SM.a-1002, SM.a-1003 y A.xp-5 (descrito en este último como una Toba cristalina por LCV 1992), además de muestras de coronas del pozo SM.a-1002 (Y-TEC 2019; D'Elia *et al.* 2019) (Fig. 9).

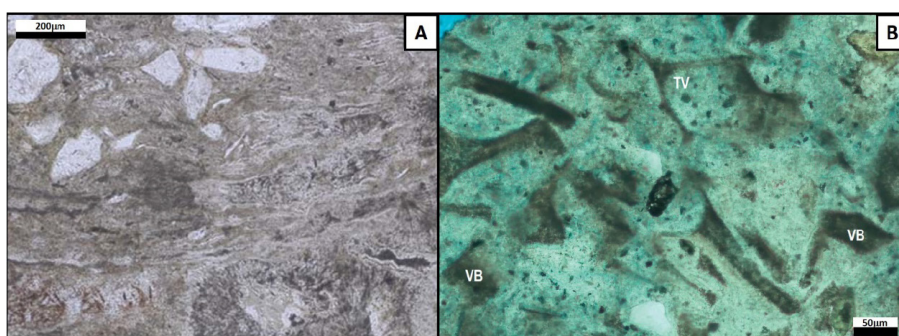


Figura 9. A) Corte delgado sobre Secuencia S3 donde se observa la presencia de fiammes (tomado de Y-TEC 2019) y B) corte delgado sobre secuencia S2 donde se destaca la presencia de trizas vítreas (TV) y pseudomorfos de vitroclastos blocosos (tomado de D'Elia 2021).

Esta secuencia está compuesta por una sola facies depositacional (toba lapillítica), correspondiente a una unidad de flujo que se configuró como una única unidad de enfriamiento, texturalmente cristaloclástica a vítrea. Bajo el microscopio presenta textura eutaxítica (desarrollo de *fiammes*) a parataxítica (pómez deformados describiendo bandas en la roca) (D'Elia *et al.* 2019).

El alto grado de soldamiento (grados V-VI en la escala Quane y Russell 2005) (Fig. 10) es el responsable de las extremadamente bajas permeabilidades medidas en la matriz de la roca (Fig. 11), por lo que se concluye que la elevada capacidad de producción y almacenamiento está gobernada por la presencia de un sistema de fracturas naturales interconectadas. La determinación de la presión umbral en muestras de pleno diámetro de la corona del pozo SM.a-1002, confirman la ausencia de hidrocarburos en la matriz.

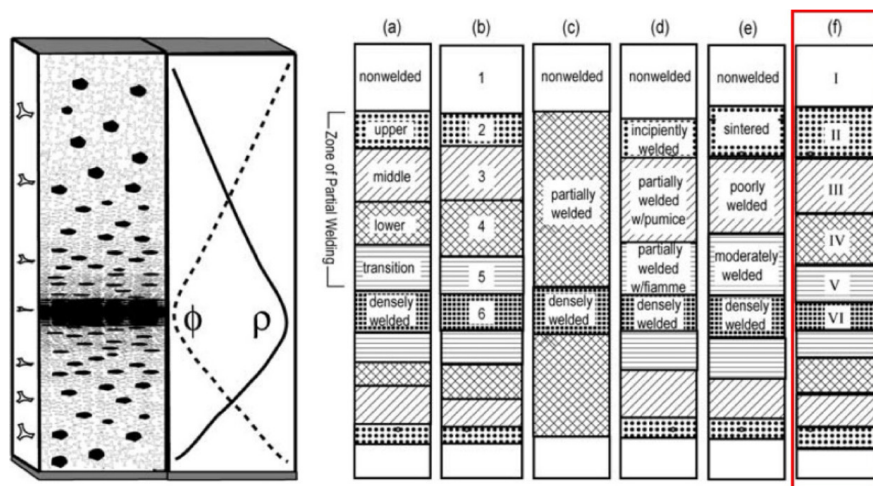


Figura 10. Diferentes terminologías utilizadas para definir grados de soldamiento en Ignimbritas. El esquema "P" es el que se hace mención en este trabajo. Tomado de Quane y Russell 2005.

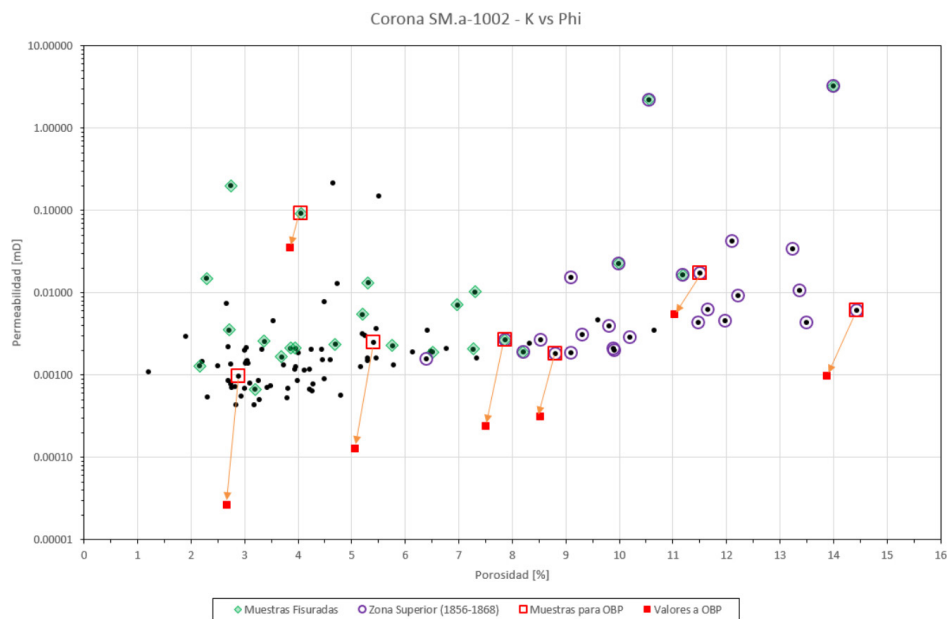


Figura 11. Crossplot Porosidad vs. Permeabilidad.

Las fracturas fueron estudiadas a través de perfiles de pozos, testigos corona y ensayos de pozo, habiéndose reconocido, en base a su origen, los siguientes tipos de fracturas:

- Fracturas Hidráulicas (hidrofracturas).
- Fracturas Tensionales por contracción térmica.
- Fracturas Tectónicas.
- Fracturas Hidrotermales.

El origen de las Fracturas Hidráulicas (Phillips 1972) se relaciona con el escape de fluidos presente en el sistema a través del depósito ignimbrítico de muy baja permeabilidad, y se presume que la secuencia subyacente (*surge*) pudo haber tenido cierto grado de control en el aporte de fluidos (D'Elia 2021).

En la corona del pozo SM.a-1002 (Secuencia S3), se ha observado que estas fracturas son verticales a subverticales, por lo que atraviesan el testigo a lo largo de hasta dos metros, con paredes tapizadas por cristales de cuarzo drusiforme de tamaño grueso a muy grueso, con crecimiento perpendicular al plano de fractura, generando puentes con una apertura hidráulica de hasta 8 mm (Fig. 12). Se asume que estas Fracturas Hidráulicas son las responsables de la alta permeabilidad del reservorio.

Las fracturas térmicas (similar a la disyunción columnar en basaltos, pero con diferente geometría) se originan por la contracción del material debido al enfriamiento. Estas poseen aperturas hidráulicas menores que las anteriores (Fig. 13) y se asume que poseen mayor distribución, aportando al almacenamiento del reservorio.

Estos dos tipos de fracturas son coetáneos y se relacionan con el enfriamiento del depósito piroclástico.

Las fracturas tectónicas y las hidrotermales no aportan a la permeabilidad del sistema debido a la escasa o nula apertura hidráulica, obliterada en algunos casos por la presencia de distintos tipos de relleno.

Esto ubica al reservorio como tipo I en la clasificación de Nelson (2001) (Fig. 14).

Con el objetivo de entender la distribución espacial y la orientación del sistema de fracturas, se realizó un procesamiento AVAZ (Amplitud vs. Azimuth, Geoprocesados 2019) en el marco de una caracterización de la sísmica 3D, auxiliado con la información de los pozos existentes

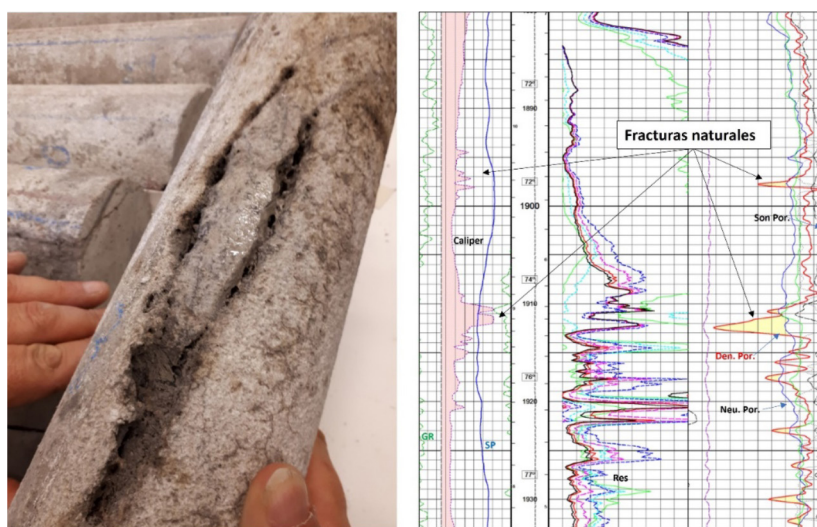


Figura 12. Detalle de fractura hidráulica observada en la corona del pozo SM.a-1002 y perfiles donde se identifican fracturas a partir de saltos de ciclo en las curvas de porosidad (track de la derecha) y caliper.

del yacimiento, a partir del cual se obtuvieron distintos productos. Uno de ellos es un cubo de intensidad de fracturas, mediante el cual se logró delimitar, para los niveles de interés, las zonas de mayor intensidad de fracturas (Fig.15). El pozo SM-1004, perforado en el mes de marzo de 2022 comprobó exitosamente la presencia de las mismas.



Figura 13. Fracturas térmicas reconocidas en la corona del pozo SM.a-1002 (cada tramo de corona corresponde a un metro de longitud).

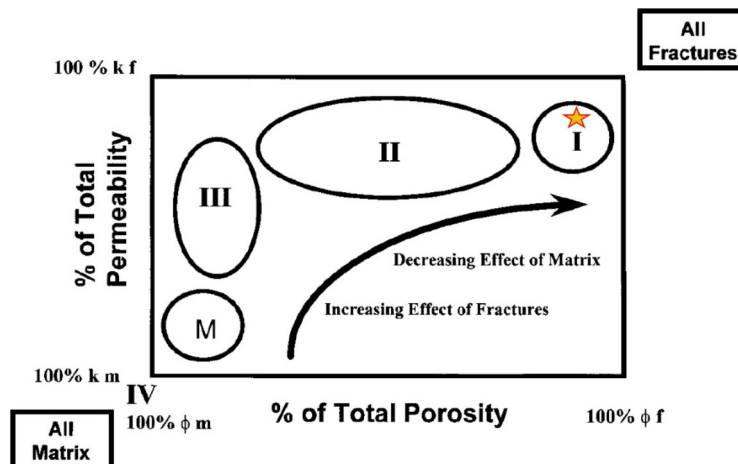


Figura 14. Clasificación de Nelson (2001) de reservorios de acuerdo al porcentaje de aporte por fracturas y/o matrix. Se indica la ubicación del reservorio analizado.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

-El reservorio del Yacimiento San Martín está emplazado en rocas volcaniclásticas de la Serie Tobífera, naturalmente fracturadas, siendo las fracturas hidráulicas y las de contracción térmica las que generan las condiciones de reservorio.

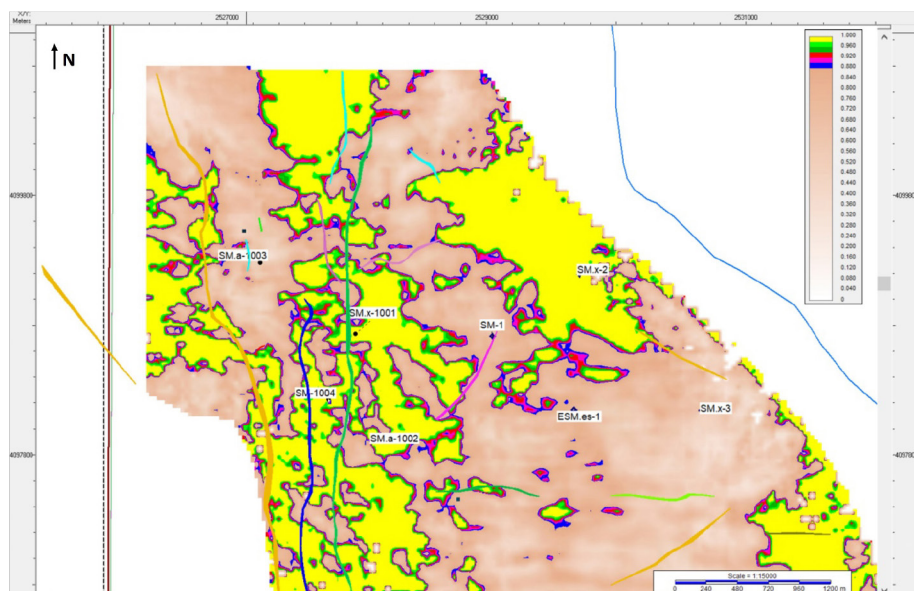


Figura 15. Mapa de intensidad de fracturas para la secuencia S3. El color amarillo indica la presencia de alta intensidad de fracturas. Coordenadas Gauss-Krüger.

-Estas rocas se relacionan con un ambiente volcánico explosivo dominado por flujos de alta densidad y viscosidad, que se inicia como una erupción hidromagmática (S2: ignimbrita con bajo grado de soldamiento) y culmina con la erupción de la secuencia S3 (ignimbrita con alto grado de soldamiento), que componen el reservorio documentado. Esta última unidad conforma una sola unidad de enfriamiento.

-La extensión del flujo piroclástico aún no ha podido ser definida con exactitud, aunque en base a la información documentada en sísmica y pozos ubicados en Argentina y Chile, se estima que este depósito cubrió un área superior a los 400 km² y su volumen mínimo estimado supera los 40 km³. La erupción que originó este depósito ha sido más de 15 veces superior en volumen a la registrada en el Vesubio en el año 79 D.C.

-Desde el punto de vista petrofísico, la matriz del reservorio posee bajos valores de porosidad <3% y muy bajos valores de permeabilidad, del orden de 0.001mD y 0.01mD. La alta capacidad de producción está asociada a un extenso sistema de fracturas en el que se reconocen distintos tipos, siendo las más importantes desde el punto de vista del reservorio las de origen hidráulico y térmico. Dadas las características mencionadas se puede clasificar al reservorio como un reservorio fracturado tipo I, de acuerdo con la clasificación de Nelson (2001).

-El yacimiento se emplaza en una estructura elongada NNO-SSE con cierre contra falla al oeste, donde la altura de la columna mineralizada, comprobada a través de ensayos de pozo y producción, alcanza los 200 metros.

-El sello, al igual que en la mayoría de los yacimientos de la Cuenca Austral lo conforman las pelitas de la Fm. Pampa Rincón (y/o equivalentes).

-El origen del petróleo ha sido asignado principalmente a los intervalos marinos del Cretácico de la cuenca (Fm. Pampa Rincón).

-Se confirma la existencia de un sistema petrolero activo Pampa Rincón – Serie Tobífera (!), conformando el primer descubrimiento productivo de petróleo de relevancia en el territorio argentino de Tierra del Fuego, relacionado a las rocas de la Serie Tobífera.

-El importante volumen de roca involucrado (más allá del spill point) y la extensión de los juegos de fracturas descriptos le confieren al sistema un elevado almacenamiento y una alta permeabilidad, que se condicen con los notables caudales de petróleo surgente registrados en los pozos y la muy baja declinación medida, lo que permite inferir un importante empuje de agua como mecanismo de drenaje.

-Por las características de su emplazamiento y por el excepcional caudal de producción de petróleo, San Martín se convirtió en uno de los descubrimientos exploratorios más relevantes de la Cuenca Austral en los últimos años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la UTE Río Cullen-Las Violetas por permitir la publicación de la información. Asimismo, al Dr. Leandro D'Elia por sus aportes y sugerencias que permitieron mejorar sustancialmente el contenido de este trabajo, y a los colegas Diego Lenge, Boris Ploszkiewicz, Gustavo Vergani y Carlos Cruz por sus comentarios y recomendaciones.

REFERENCIAS CITADAS

- Azpiroz, G., Covellone, G., Mykietiuk, K., Simonetto, L., Atencio, M., Tórtora, L., Ancheta, D., Meissinger, V. y Pedro, E., 2018. Exploración del Play Serie Tobífera en el ámbito de Tierra del Fuego. Cuenca Austral. Argentina y Chile. X CONEX-PLO, Sesiones Generales, pp. 143-155.
- Bravo, P. y Herrero, C., 1997. Reservorios naturalmente fracturados en rocas volcánicas jurásicas, Cuenca de Magallanes, Chile, VI Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Memorias, Tomo I, pp. 66-84.
- Biddle, K.T., Uliana, M.A., Mitchum, R.M., Fitzgerald, M.G. y Wright, R.C., 1986. The Stratigraphic and Structural Evolution of the Central and Eastern Magallanes Basin, Southern South America. En Allen, P.A. y Homewood, P. (eds.), Foreland Basins. International Association of Sedimentologists, Special Publication 8, pp. 41-61.
- Cagnolatti, M.J., Martins, R., y Villar, H., 1996. La Formación Lemaire como probable generadora de hidrocarburos en el área Angostura, provincia de Tierra del Fuego, Argentina. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, vol. 1, pp. 123-139.
- de la Cal, H.G., Villar, H.J., Páez, G. y Feinstein, E., 2022. El Sistema Petrolero Tobífera-Tobífera en la provincia de Tierra del Fuego, Cuenca Austral, Argentina, y su potencial exploratorio en

- el Hemigraben Angostura. XI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Mendoza En prensa.
- D'Elia, L., Francese, J.R. y García, M.R., 2019. Yacencia de las unidades piroclásticas de la Serie Tobífera en el Área San Martín, Cuenca Austral: Implicancias Estratigráficas y Petrofísicas con énfasis en el Sistema Petrolero. Roch S.A., informe interno inédito.
- D'Elia, L., 2021. Análisis estratigráfico y litológico del tope de la secuencia 2 con énfasis en su mecanismo de origen y depositación: implicancias en el Sistema petrolero del yacimiento San Martín. Roch SA, informe interno inédito.
- Erlicher, J. y Trincherro, E., 1989. Propuesta para la perforación del pozo YPF.TF.ESM.es-1 (Estancia San Martín), Territorio Nacional de la Tierra del Fuego. YPF SE, informe interno inédito.
- GEOPROCESADOS, 2019. Proyecto San Martín. Caracterización de Reservorios Fracturados. Roch SA, informe interno inédito.
- Hervé, F., Calderón, M., Fanning, M., Kraus, S. y Pankhurst, R., 2010. SHRIMP chronology of the Magallanes Basin basement, Tierra del Fuego: Cambrian plutonism and Permian high-grade metamorphism. *Andean geology* 37, pp. 235-275.
- Hinterwimmer, G., 2002. Los reservorios de la Serie Tobífera. En Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (eds.), *Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina*, Simposio del V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, pp. 27-47.
- LCV, 1992. Estudio Petrográfico y Mineralógico Sondeo: TF.A.xp-5. OEA S.A., informe interno inédito.
- LCV, 2018. Sondeo YPF.TF.ESM.es-1 (1ª a 4ª ccc), Estancia San Martín, Fm. Springhill y Serie Tobífera: Estudio Sedimentológico y Petrográfico. Roch S.A., informe interno inédito.
- Nelson, R., 2001. *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*, 2nd edition. Gulf Professional Publishing, 332 pp.
- Pakhurst, R.J., Riley, T.R., Fanning, C.M. y Kelley, S.P., 2000. Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of Magmatism Associated with the Break-up of Gondwana. *Journal of Petrology* 41 (5), pp. 605-625.
- Peroni, G., Cagnolatti, M. y Pedrazzini, M., 2002. Cuenca Austral: marco geológico y reserva histórica de la actividad petrolera. En Schiuma, M., Hinterwimmer, G. y Vergani, G. (Eds.), *Simposio Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina*, V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, pp. 11-19.
- Phillips, W.J., 1972. Hydraulic fracturing and mineralization. *Journal of the Geological Society* 128, pp. 337-359.
- Quane, S.L. y Russell J.K., 2005. Ranking welding intensity in pyroclastic deposits. *Bulletin of Volcanology* 67, pp. 129-143
- Robbiano, J. A., Arbe, H. y Gangui, A., 1996. Cuenca Austral Marina. En Ramos, V.A. y Turic, M. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina*, Relatorio del XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, pp. 343-358, Buenos Aires.
- Rodríguez, J. y Miller, M., 2005. Cuenca Austral. En Chebli, G., Cortiñas, J., Spalletti, L., Legarreta, L., y Vallejo, E. (eds.), *Frontera Exploratoria de la Argentina*, Simposio del VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, pp. 307-323.
- Rodríguez, J.F., Miller, M. y Cagnolatti, M.J. 2008. Sistemas Petroleros de Cuenca Austral, Argentina y Chile. En: Cruz, C.E., Rodríguez, J.F., Hechem, J.J. y Villar, H.J. (eds.), *Sistemas Petroleros de las Cuen-*

- cas Andinas, Simposio del VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, pp. 1-31.
- Sruoga P., Rubinstein, N. y Hinterwimmer, G., 2004. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobífera, South Patagonia, Argentina. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 132: 31-43.
- Thomas, C.R., 1949. Geology and petroleum exploration in Magallanes Province, Chile. *AAPG* 33 (9), pp.1553-1578.
- Y-TEC, 2019. Estudio Integral de Coronas Pozo SM.a-1002 (San Martín). Roch S.A., informe interno inédito.