



# El registro lacustre del Jurásico en el subsuelo de la cuenca Austral-Magallanes y su potencial como roca madre de hidrocarburos

**Hernán G. DE LA CAL<sup>1</sup>, Héctor J. VILLAR<sup>2</sup>, Gerardo N. PÁEZ<sup>3</sup>, Oscar F. GALLEGU<sup>4,5</sup>, Mateo D. MONFERRAN<sup>4,5</sup> y Evgeny V. YAN<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Roch S.A., Avenida Madero 1020, CP C1106ACX, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> GeoLab Sur S.A., Italia 1616, CP B1602DOF, Florida, Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup> Instituto de Recursos Minerales (INREMI), CONICET-Universidad Nacional de La Plata (UNLP), CP 1900, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

<sup>4</sup> Grupo Paleontología y paleoambientes continentales fanerozoicos - Centro de Ecología Aplicada del Litoral, CECOAL-CONICET-UNNE, Ruta Provincial N° 5, CP W3400, Corrientes, Argentina.

<sup>5</sup> Geología Histórica-Paleoinvertebrados-Micropaleontología (Área Ciencias de la Tierra - Departamento de Biología), Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agrimensura (FaCENA), Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Av. Libertad 5470, CP W3400, Corrientes, Argentina.

<sup>6</sup> Borissiak Palaeontological Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya ul. 123, Moscow, 117997 Russia.

Autor correspondiente: hdelacal@roch.com.ar

**Editor:** Susana E. Damborenea

Recibido: 29 de febrero de 2024

Aceptado: 21 de mayo de 2024

## RESUMEN

La cuenca Austral-Magallanes se originó a partir de un evento de *rifting* generalizado durante el Jurásico que afectó, en los sectores orientales de la misma, a un basamento ígneo-metamórfico de edad paleozoica, y a partir del cual se generaron depocentros en los que se acumularon sedimentos de naturaleza clástica, volcánica y mixta. Los depósitos volcánicos han sido agrupados en la Provincia Magmática Chon Aike, los que conforman una LIP (*Large Igneous Province*) ácida, reconocida a lo largo de la Patagonia. Interdigitados con estos niveles, se han documentado otros de naturaleza clástica, asociados en muchos casos con ambientes lacustres. Si bien trabajos previos han analizado la capacidad oleogénica puntual de algunas de estas rocas, no existen a la fecha trabajos que analicen estos depósitos desde un punto de vista integral a escala de cuenca. En esta contribución se presenta una caracterización litológica y geoquímica de cutting y testigos corona obtenidos de pozos exploratorios de hidrocarburos, material que correspondería a rocas que, de acuerdo con las descripciones originales presentes en los legajos de los pozos, tendrían un buen potencial oleogénico. Se integra, además, material inédito de otros pozos de la cuenca, tanto de su porción ubicada en Chile, como de sectores costa afuera del Mar Argentino. Finalmente, se reportan descripciones del material fosilífero presente en uno de los pozos estudiados, el cual representa el primer registro de este tipo para el subsuelo de la cuenca. Los estudios realizados muestran que las rocas analizadas poseen buenas propiedades oleogénicas, con una marcada impronta terrígena y participación de restos de plantas superiores, formadas en ambientes que varían desde pantanos a lacustres de agua dulce. En cuanto al material fósil, se reporta para el subsuelo por primera vez su hallazgo en la Serie Tobífera, y se compone principalmente de restos vegetales indeterminados y restos de invertebrados típicamente continentales (que coinciden plenamente con el origen terrestre de sistemas de pantanos-lacustres brindados por los análisis realizados) compuestos por crustáceos (Branchiopoda, Diplostraca), comúnmente conocidos como "estherias", "conchostracos" o espinicaudados asignados preliminarmente a tres familias (Palaeolimnadiopseidae, Fushunograptidae y ?Eosestheriidae) vinculadas a otras unidades sudamericanas de superficie, e insectos (Coleoptera) representados por élitros de coleópteros asignados a dos familias: una (Cupedidae) con registro en unidades triásicas sudamericanas y la otra (Asiicoleidae) cuyo registro es el primero para el hemisferio sur.

**Palabras clave:** Serie Tobífera, Chon Aike, geoquímica orgánica, sistema petrolero, registro fósil.

## ABSTRACT

*The Jurassic lacustrine record of the Austral-Magellan Basin subsurface and its potential as a source rock for hydrocarbons.*

The Austral-Magellan Basin developed as the result of a widespread Jurassic rift event that affected, in its eastern sectors, an igneous-metamorphic basement of Paleozoic age. During this process, several depocenters were developed and filled with clastic, volcanic and mixed sediments. The volcanic deposits originated during this event were grouped by other authors in the Chon Aike Magmatic Province, which represents a large felsic LIP that can be recognized throughout Patagonia. Interdigitated within these volcanic rocks, some clastic continental deposits were documented, associated in many cases with swamps and/or lacustrine environments. These deposits have been poorly studied as possible source rocks for the hydrocarbons generated in the basin, so in this paper we present an integral study analyzing the oleogenetic potential of these rocks in a basin-wide context. This contribution presents a lithological and geochemical characterization of cutting and drill-cores obtained from exploratory hydrocarbon wells, material that was preliminarily assigned to a good oleogenetic potential in the original well description files. This study also includes new, previously unpublished, material from other wells across the basin, including wells located in Chile and offshore Argentina. Finally, descriptions of the fossil content found in one of the wells are provided, being the first record of this kind for the basin subsurface. Results show that the studied rocks have good oleogenetic properties, with a strong terrigenous imprint and presence of plants-derived material, denoting a lacustrine and/or swamp environment. The reported fossil material represents the first mention of this kind of remains for this unit. In agreement with the terrestrial origin of swamp-lacustrine systems suggested by the analysis carried out, fossil remains are mainly unknown plant debris accompanied by typically continental invertebrates, such as crustaceans (Branchiopoda, Diplostraca) and insect remains (Coleoptera). The identified crustaceans, commonly known as "estherias" or "conchostracans" were preliminarily assigned to three families (Palaeolimnadiopseidae, Fushunograptidae and ?Eosestheriidae) as in other South American findings. Finally, the insect remains (Coleoptera) are represented by two sets of elytra that can be assigned to two families, one (Cupedidae) with a known record in some South American Triassic units and the other (Asiocoledae) representing the first record of this family for the Southern Hemisphere.

**Keywords:** Serie Tobífera, Chon Aike, organic geochemistry, petroleum system, fossil record.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca Austral-Magallanes se encuentra ubicada en el sector austral de la Argentina y Chile (Fig. 1). Esta región fue convirtiéndose, a lo largo de su historia, en una importante cuenca productora de petróleo y gas, que se inició en el sector chileno (zona de Manantiales en el año 1945, de acuerdo con Thomas 1949). Numerosos trabajos se han ocupado de caracterizar a la Fm. Springhill (Thomas 1949), principal reservorio de la cuenca (depósitos cretácicos de naturaleza clástica) y a las rocas marinas cretácicas responsables de la generación de la mayoría de los hidrocarburos producidos hasta la fecha (Arbe 1986, 1987, 1989; Arbe y Fernández Bell Fano 2002; Pittion y Goudain 1991; Pittion y Arbe 1999; Robbiano et al. 1996; Rodríguez et al. 2008; Schwarz et al. 2011) (Fig. 2).

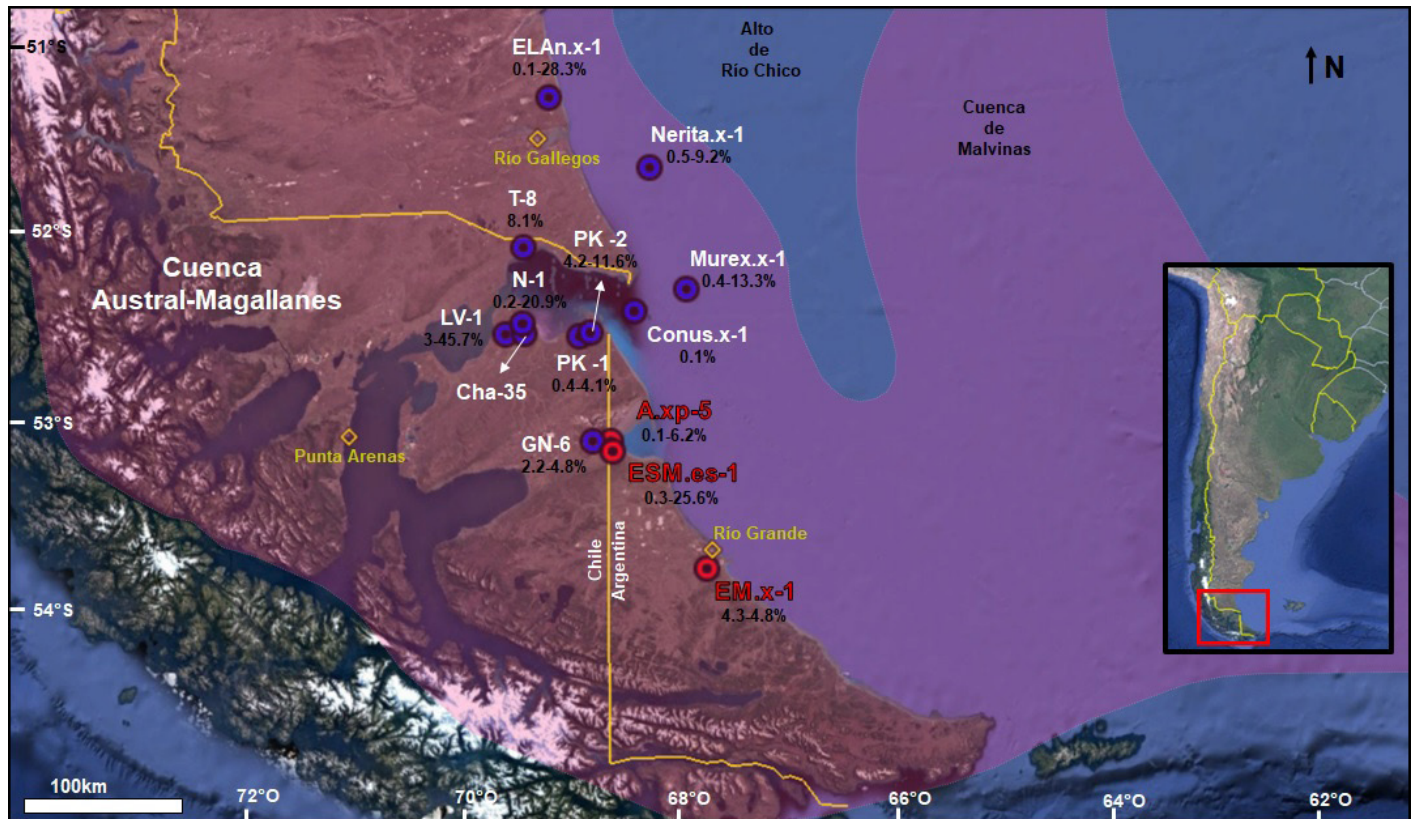
En este trabajo se presentan los resultados de estudios geoquímicos realizados sobre rocas (*cutting* y coronas) recuperadas de niveles pertenecientes a la Serie Tobífera en los pozos A.xp-5 (Angostura), EM.x-2 (El Monte) y ESM.es-1 (Estancia San Martín), perforados en la provincia de Tierra del Fuego (Fig. 1), junto a resultados de otros pozos de la cuenca

obtenidos previamente por diversas compañías que operan en la zona (inéditos). El objetivo principal del estudio es caracterizar la capacidad oleogénica y la madurez térmica de la materia orgánica presente en los intervalos lacustres del Jurásico del subsuelo de la cuenca Austral, donde escasos informes han sido publicados al respecto. En este sentido, las contribuciones de Cagnolatti et al. (1996) y Bravo y Herrero (1997) han propuesto que la Serie Tobífera puede presentar buenas condiciones como roca madre, por lo que este trabajo busca realizar una caracterización detallada de estos depósitos.

Finalmente, y como parte de los estudios realizados sobre este material, se reportan los primeros hallazgos de restos fósiles de invertebrados para la Serie Tobífera en el ámbito de la provincia de Tierra del Fuego, hallazgos con una importante connotación paleoambiental y bioestratigráfica para los depósitos jurásicos de la Patagonia.

## MARCO GEOLÓGICO

La cuenca Austral-Magallanes, con una extensión de



**Figura 1.** Mapa de ubicación de los pozos involucrados en este estudio: en rojo, los análisis presentados en esta contribución, y en círculos azules, aquellos pozos que se integran de estudios inéditos realizados por otras compañías operadoras. Se indica debajo de cada sigla de pozo el rango de valores de COT medido en %. Se indica la cuenca Austral-Magallanes, el alto de Río Chico y la cuenca de Malvinas, y las localidades argentinas de Río Grande y Río Gallegos, y la de Punta Arenas en Chile.

230,000 km<sup>2</sup>, se desarrolla en la actualidad tanto dentro del continente como en sectores *offshore* en el sur de la Argentina y Chile. Limita al oeste y al sur por los Andes Patagónicos, y al este con el alto de Río Chico (prolongación austral del Macizo del Deseado). Su historia evolutiva puede ser dividida en tres grandes etapas (Biddle et al. 1986; Robbiano et al. 1996), iniciando con una primera etapa de *rift*, relacionada a la ruptura de Gondwana durante el Jurásico, en la cual se generaron numerosos grábenes y hemigrábenes sobre un basamento ígneo-metamórfico paleozoico (Hervé et al. 2010). Estos depocentros fueron rellenos por depósitos epiclásticos, volcánicos y volcanoclásticos. A esta etapa de extensión tectónica le siguió una de subsidencia termal que se inició durante el Titoniano y continuó hasta el Barremiano, y que está representada por los depósitos transgresivos de la Fm. Springhill, que se depositaron durante una inundación generalizada de la cuenca. Por último, se ha identificado el desarrollo de varias fases de antepaís a partir del Cretácico (Rodríguez y Miller 2005, y referencias allí citadas) (Fig. 2).

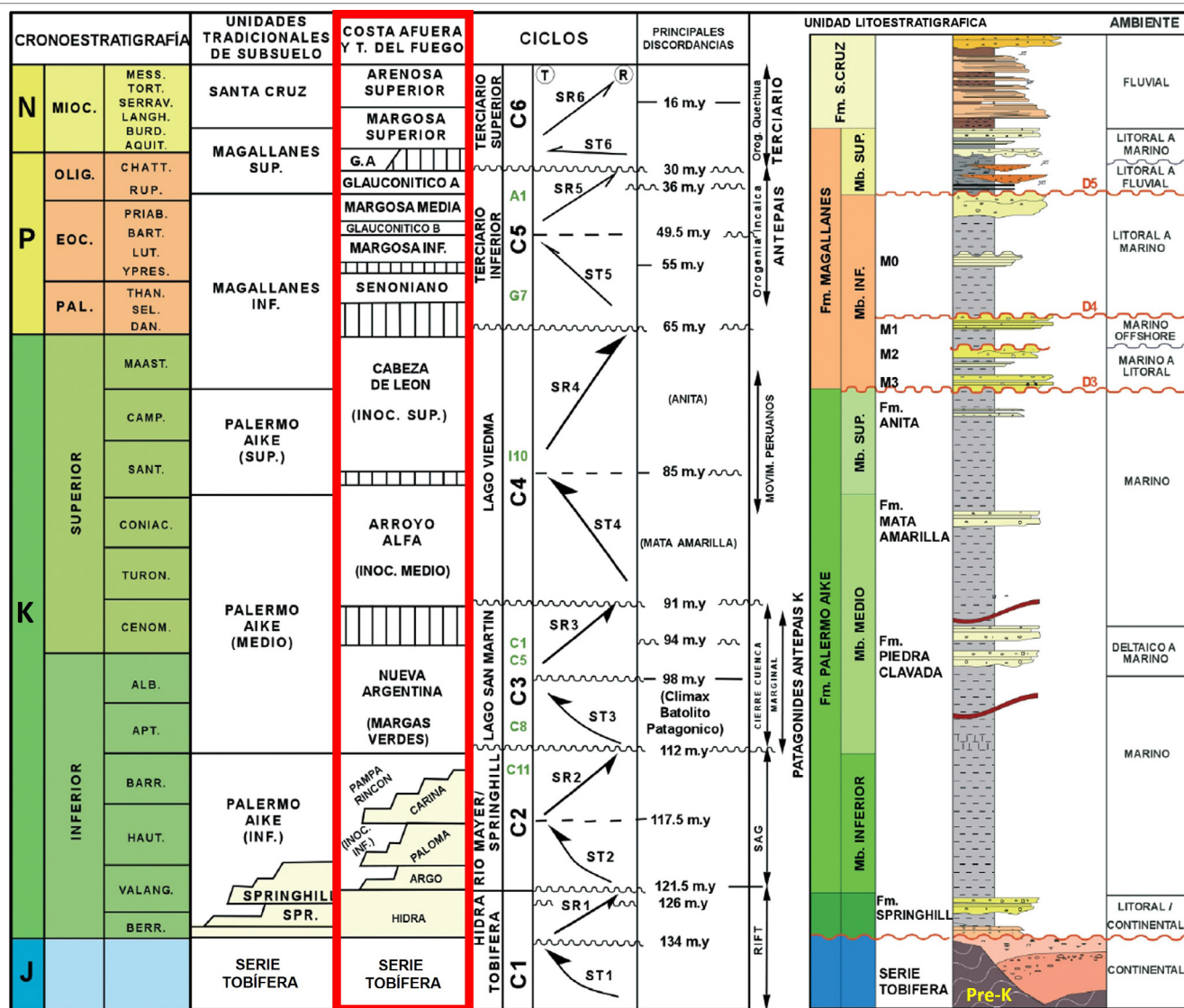
### Serie Tobífera

En el subsuelo de la cuenca Austral-Magallanes, las rocas volcánicas y volcanoclásticas pertenecientes a la Provin-

cia Magmática Chon Aike (Kay et al. 1989) han recibido la denominación de Serie Tobífera (Thomas 1949). Estas rocas representan el relleno volcanoclástico de los grábenes y hemigrábenes desarrollados durante la etapa de rift, sobre el Complejo Ígneo y Metamórfico de Tierra del Fuego (Hervé et al. 2010), basamento económico de la cuenca (representado por rocas plutónicas de edad cámbrica y gneisses pérmicos).

Afloramientos de esta provincia se distribuyen hacia el norte en el macizo Norpatagónico (Fm. Marifil, Malvicini y Llambías 1974), la cuenca de Cañadón Asfalto (Gr. Lonco Trapial) y el macizo del Deseado (Fms. Bajo Pobre y Chon Aike), y hacia el oeste y sur, en la zona cordillerana (formaciones El Quemado e Ibáñez), sectores en donde existe abundante información geológica de superficie. Sin embargo, la información recogida en el subsuelo se limita por lo general a escasos registros obtenidos por pozos hidrocarburíferos que han atravesado pocos metros dentro de esta unidad (ya que los mismos tenían como objetivo los depósitos cretácicos de la Fm. Springhill). Estas perforaciones han aportado información saltuaria sobre su arreglo de facies y ocasionalmente información geocronológica, como es el caso del depocentro Gaviota en el sector chileno de la cuenca, donde Pankurst et al. (2000) reportan una edad de 178 Ma (Jurásico Temprano,





**Figura 2.** Cuadro estratigráfico, ciclos depositacionales y columna estratigráfica simplificada de la cuenca Austral. Se indican las principales Rocas Madre (RM) y Roca Reservorio (RR) de la zona (modificado de Rodríguez et al. 2008, Robbiano et al. 1996, Arbe 1986, 1987, 1989 y Arbe et al. 2002). Edades basadas en Haq et al. 1987.

Toarciano). De acuerdo con estos autores se establece un diacronismo en el vulcanismo, caracterizado por el rejuvenecimiento hacia el oeste para las rocas que conforman estos depósitos (originalmente separado en 3 eventos magmáticos mayores, V1: 188-178 Ma, V2: 172-162 Ma y V3: 157-153 Ma), culminando con la apertura de la cuenca de Rocas Verdes al suroeste de la cuenca, cuyos afloramientos indican la generación de fondo oceánico.

Asociada a las rocas volcánicas de estas unidades, se ha documentado la presencia de rocas clásticas y volcanoclásticas re trabajadas, en algunos casos de origen lacustre. Este es el caso, por ejemplo, de la Fm. La Matilde (Stipanovic y Reig 1957; Lesta y Ferello 1972) en el Macizo del Deseado, la que forma parte del Grupo Bahía Laura (Lesta y Ferello 1972) junto a la Fm. Chon Aike (Stipanovic y Reig 1957) y la

Fm. Cañadón Asfalto en la cuenca homónima (Lesta y Ferello 1972; Lesta et al. 1980; Uliana et al. 2014).

Específicamente para la provincia de Tierra del Fuego (sector argentino de la cuenca), el registro sedimentario de los grábenes y hemigrábenes jurásicos ha sido documentado en su totalidad únicamente por unos pocos pozos. En este sentido, se han reconocido niveles portadores de materia orgánica (M.O.) con buena capacidad oleogénica hacia la base del relleno jurásico, en la denominada Secuencia S1 de Cagnollatti et al. (1996), en el pozo Angostura.xp-5 (empresa OEA, 1992). De acuerdo con estos autores, la presencia de polen de gimnospermas tales como *Microcachrydites antarticus* Cookson (Gimnospermae-Podocarpaceae) en la Secuencia S1, permitiría acotar la edad a un entorno no más antiguo que Jurásico Tardío (Barreda y Palamarczuk 1992).

## MATERIAL

Las muestras analizadas en este estudio corresponden a *cuttings* y coronas recuperadas en 3 pozos exploratorios perforados en el ámbito de la provincia de Tierra del Fuego. Estos pozos han sido seleccionados luego de revisar todos los pozos que han sido perforados en las áreas hidrocarburíferas operadas por la empresa Roch S.A.

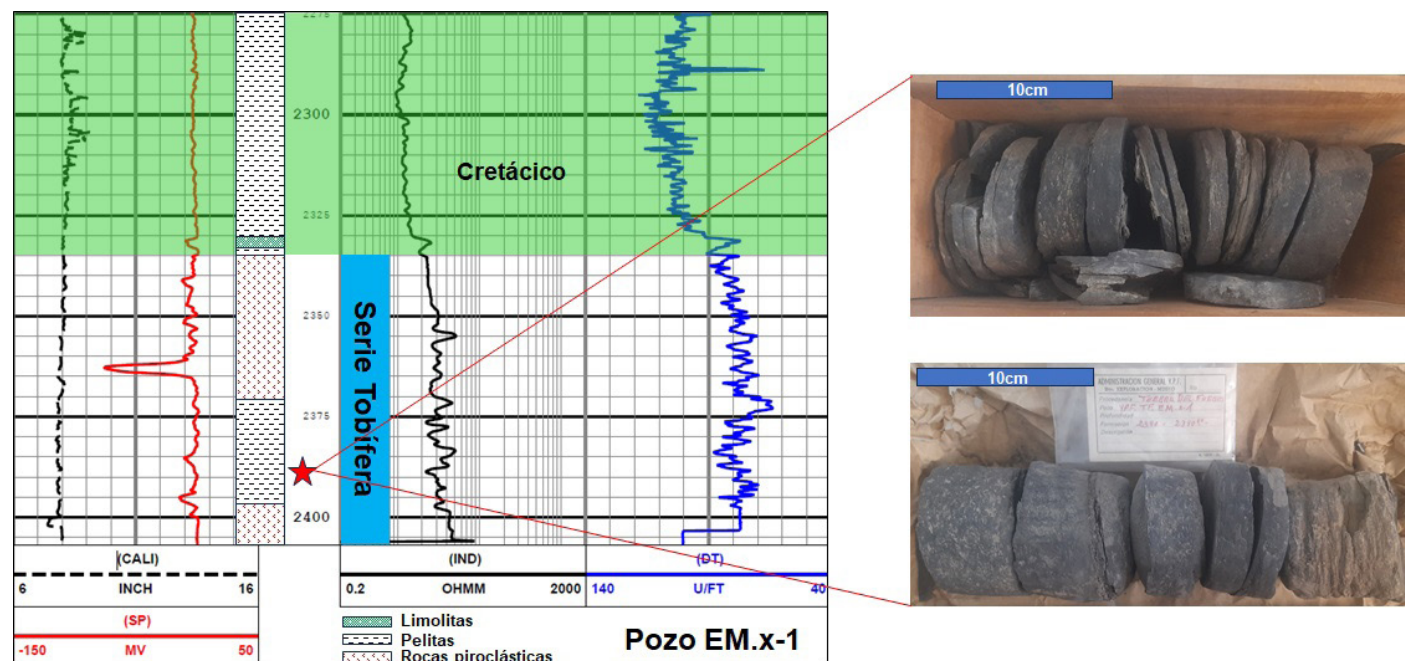
### Pozo YPF.TF.EM.x-1, “El Monte” (EM.x-1), Tierra del Fuego, Argentina

Perforado por la empresa YPF en el año 1973, al sur de la ciudad de Río Grande (Fig. 1), este pozo resultó descubridor de hidrocarburos de la Fm. Springhill, objetivo principal del mismo, interceptando además un poco más de 65 metros en la Serie Tobífera: en esta unidad se perforó una sección superior de unos 30 metros de rocas piroclásticas (“tobas blanquecinas y grises” en los informes originales), seguido de un intervalo de unos 30 metros de arcilitas carbonosas, para culminar la perforación en terrenos conformados nuevamente por tobas. Para este trabajo se analizó una corona recuperada a una profundidad de 2,390 metros (Fig. 3), 50 metros por debajo del tope de la Serie Tobífera, la que está representada por pelitas gris-negruzcas con presencia de abundante materia orgánica (M.O.). Es de destacar la presencia de restos fósiles en las coronas estudiadas, los que serán analizados en esta contribución. Los mencionados restos fósiles provienen

exclusivamente del testigo corona de este pozo. Dichos materiales se encuentran provisionalmente depositados en las Colecciones Paleontológicas de la Universidad Nacional del Nordeste “Dr. Rafael Herbst” en el CECOAL-CONICET-UNNE, hasta tanto se realicen los trámites correspondientes para su depósito definitivo en las colecciones que correspondan.

### Pozo YPF.TF.ESM.es-1, “Estancia San Martín” (ESM.es-1), Tierra del Fuego, Argentina

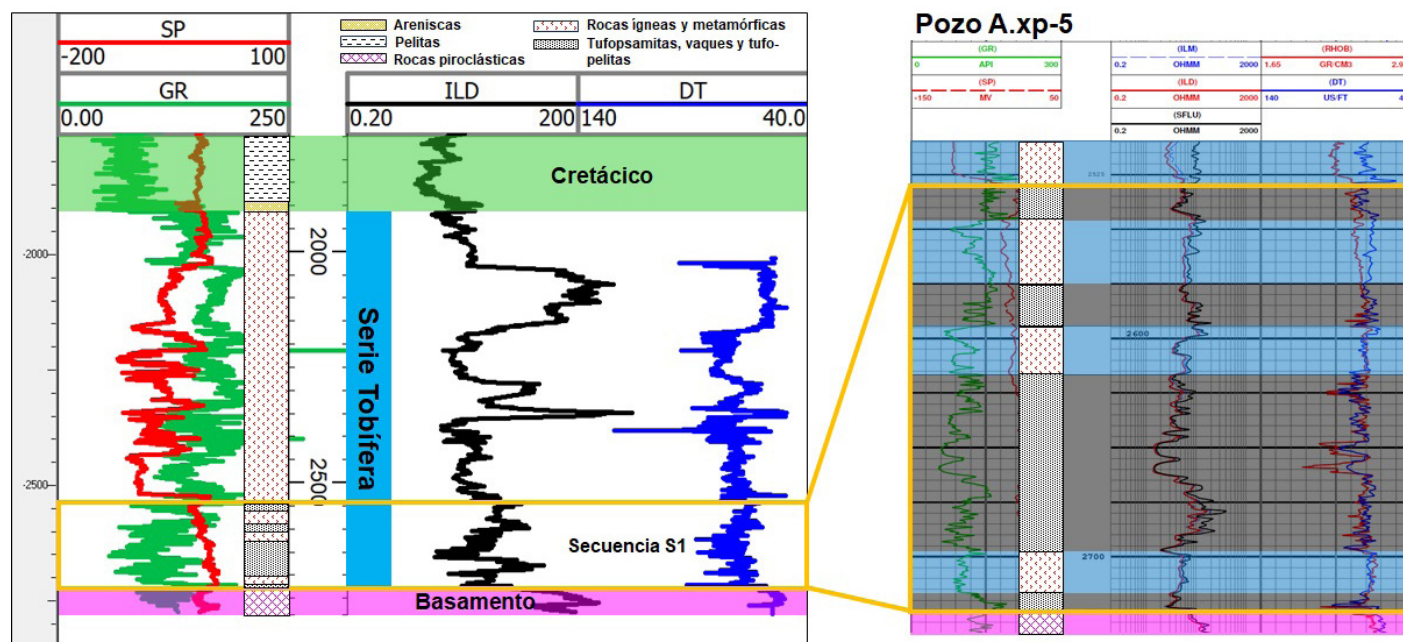
En el año 1990, con el objetivo principal de investigar “los depósitos jurásicos y probar la existencia de roca madre y roca reservorio dentro de la Fm. Lemaire” (Fig. 1), y con el objetivo secundario de “investigar la Fm. Springhill” se realizó una perforación que se convirtió en el pozo que más metros perforó en estos depósitos en el onshore de Tierra del Fuego (1,000 metros), alcanzando el basamento ígneo-metamórfico de la cuenca (Fig. 4). De este pozo se analizó el material correspondiente a unos 3 metros de la cuarta carrera recuperada de la corona (intercalados entre dos flujos piroclásticos), que conforman un nivel heterolítico de tufitas y pelitas carbonosas (LCV 2018). Todo el tramo presenta rasgos de deformación sinsedimentaria por compactación y se interpreta como depósitos generados en un paleoambiente de sedimentación subácueo de baja energía (restringido) alternando con depósitos de flujos densos variablemente diluidos que alcanzan distalmente un cuerpo de aguas tranquilas restringido, donde dominarían los procesos de decantación ocasionalmente en condiciones anóxicas que permiten cierta conservación del



**Figura 3.** Perfil eléctrico donde se indica el intervalo correspondiente a la Serie Tobífera en el pozo EM.x-1, e imagen del material analizado en esta contribución (corona). CALI: Caliper; SP: Potencial espontáneo; IND: Inducción; DT: Tiempo de tránsito.







**Figura 5.** Pozo A.xp-5: perfiles eléctricos a pozo abierto. A la izquierda, se indican los intervalos correspondientes al Cretácico, Jurásico y el Basamento de la cuenca atravesado por el pozo. A la derecha, detalle del intervalo correspondiente a la Secuencia 1, donde se indican con celeste a los depósitos piroclásticos y con gris, los intervalos clásticos, cuttings de los cuales ha sido analizado aquí. SP: Potencial espontáneo; GR: Gamma Ray; ILD, ILM, SFLU: Resistividades; RHO: Densidad; DT: Tiempo de tránsito.

libres (S1) que se destila térmicamente. Luego, la cantidad de hidrocarburos pirolizables (S2) se mide cuando la muestra se calienta en atmósfera inerte con una temperatura que aumenta desde 300°C a 550°C a una velocidad de calentamiento de 25°C/ minuto. Los valores de S1 y S2 se reportan en mg HC/g roca. Tmax, un indicador de madurez, es la temperatura de generación máxima de S2.

El dióxido de carbono generado durante la pirólisis, que funciona como un indicador del grado de compuestos ricos en oxígeno del querógeno, se reporta como S3 en unidades de mg CO<sub>2</sub>/g roca. Un estándar de laboratorio se analizó cada 10 muestras. El Índice de Hidrógeno (IH = S2 \* 100/COT) e Índice de Oxígeno (IO = S3 \* 100/COT) se usan como indicadores de tipo de querógeno cuando se grafican en diagramas de tipo van Krevelen.

**Microscopía del querógeno.** Para el análisis visual del querógeno se empleó un microscopio Carl Zeiss Axiolmager A2m equipado con fuentes de halógeno y mercurio. La reflectancia de la vitrinita (Ro %) y determinación del tipo de querógeno se realizó sobre probetas epoxi de concentrado de querógeno (HCl/HF para disgregar la roca), y se complementó con el uso de microscopía de luz transmitida sobre slides de tipo palinológico.

La reflectancia de la vitrinita se determinó después de calibrar el microfotómetro TIDAS S-SMP con un patrón de zafiro sintético de reflectancia 1.65 %. Luego de identificar la vitrinita "correcta" (indicadora de madurez) se realizaron mediciones

(idealmente 50) sobre diferentes partículas para establecer el valor de reflectancia promedio (Ro %) y su desviación estándar. La composición del querógeno se informó computando los componentes identificables tanto en luz incidente como en luz transmitida, bajo luz blanca y luz UV (modo fluorescente), y se expresa como porcentaje aproximado en volumen.

## Fósiles bajo lupa binocular

Los invertebrados fósiles se trataron con las técnicas estándar para este tipo de restos fósiles, que implican sólo un tratamiento mecánico para su limpieza y retiro de residuos de sedimentos sobre las impresiones o compresiones de los mismos. En algunos casos el testigo fue fragmentado utilizando martillos y cincheles de diferentes dimensiones para abrir láminas de menor espesor y así descubrir nuevos niveles portadores de restos fósiles. En esta tarea de limpieza se emplean, además, pinceles de cerda, pera de aire comprimido, agujas y estiletes. Se emplearon para la observación y fotografiado un microscopio estereoscópico Leica S8APO con cámara incorporada (CECOAL-CONICET-UNNE) y una lupa binocular marca Olympus modelo SZH10 con una cámara Olympus de alta resolución acoplada (INREMI-FCNyM-UNLP).

La metodología de estudio de los crustáceos branquiópodos ("conchostracos" espinicaudados) sigue las propuestas de Chen y Shen (1985), Tasch (1969, 1987), Shen (1994), Martin y Davis (2001), Li y Batten (2004), Monferran et al. (2013a) y Scholze y Schneider (2015). En cuanto a los restos

de insectos (coleópteros) se sigue las propuestas de Ponomarenko et al. (2014, 2020).

## ANTECEDENTES Y ESTUDIOS INÉDITOS

A continuación, se presenta una breve descripción de otros pozos de la cuenca a los que se ha podido acceder mediante convenios de acceso a la información (dado que no es información pública, de libre consulta) donde también se ha documentado la presencia de depósitos lacustres, concretamente pelitas negras, en el ámbito de la Serie Tobífera. Aunque la revisión de sondeos no es completa, a nivel de Cuenca, la identificación de los mismos se ha realizado a partir del análisis de numerosos legajos de pozos e informes internos, todos ellos inéditos, y que en su mayoría fueron provistos por la empresa ENAP-SIPETROL.

### **Pozo SJ.SCA.ELAn.x-1, “Estancia La Angelina” (ELAn.x-1), Santa Cruz, Argentina**

Perforado por la empresa San Jorge en la provincia de Santa Cruz, al norte de la ciudad de Río Gallegos (Fig. 1) en el año 1999. Alcanzó una profundidad final de 1,692 m perforando el tope de la Serie Tobífera en 1,452 m. Uno de sus objetivos era encontrar secciones volcánicas alteradas y/o fracturadas, y también identificar secuencias sedimentarias dentro de la misma Serie Tobífera. De acuerdo al control geológico, el intervalo atravesado se compone de “tobas arenosas intercaladas con tobas, niveles carbonosos y arcilitas carbonosas”.

### **Pozo Calafate-87 o “Calafate PK-1, ex PK-A” (PK-1) (Chile)**

Entre los años 1988 y 1989, y con una profundidad total (TD) de 4,375 m se perforaron ~2,070 m del intervalo jurásico a los fines de reconocer el relleno pre-cretácico en la cuenca, en una posición cercana al depocentro de ésta (Fig. 1). Este relleno se ha separado en cuatro megasecuencias denominadas, de base a techo, desde C1 a C4.

La secuencia C1 apoyaría sobre el basamento ígneo-metamórfico, encontrándose en este caso un total de 628 m de lavas y piroclastitas de composición riolíticas. Las otras tres megasecuencias (totalizan ~1,440 m) son de naturaleza principalmente sedimentaria, encontrándose de forma subordinada la participación de material volcánico primario.

El relleno sedimentario que conforma las megasecuencias estaría representando un ambiente lacustre hacia el que concurrirían abanicos deltaicos desde los márgenes.

De acuerdo con Moraga Benavides (1996), el relleno de

esta cuenca, también denominada Oriental, tendría ~4,000 m de espesor, donde se distinguirían tres estadios evolutivos: uno inicial caracterizado por sedimentación continental-aluvial (no perforado por el pozo PK-1); el segundo, caracterizado por depósitos volcánicos, y un tercer estadio caracterizado por sedimentación lacustre.

### **Pozo “Las Violetas PK-1, ex PK-A” (LV-1) (Chile)**

Enmarcado en el “Proyecto Exploración de Cuenas pre-Cretácicas”, fue perforado en el año 1993 con el objetivo de investigar el entrapamiento de hidrocarburos en reservorios fracturados desarrollados en depósitos volcanogénicos de las secuencias superiores de la sección pre-cretácica (Fig. 1). Con una TD de 2,961 m, investigó 630 m de la Serie Tobífera. Esta se compone por una secuencia de tobas con cristales y “fiammes”, con distintos grados de soldamiento, en la que se preservó, en su porción central, el registro de un episodio sedimentario de unos 50-60 m de potencia, constituido por lutitas de color gris medio y lutitas carbonosas de color gris oscuro con intercalaciones de areniscas tobáceas.

### **Pozo Calafate-88 o “Calafate PK-2, ex PK-B” (PK-2) (Chile)**

Perforado entre 1990-1991, con una TD de 2,890 m, fue realizado a los fines de probar la existencia de roca reservorio clástica en el margen oriental de la cuenca, para la cual se interpretó un relleno controlado por el desarrollo de abanicos deltaicos con proveniencia del este (Fig. 1). Penetró unos 960 m dentro de la Serie Tobífera, la cual fue separada en 3 unidades. Una superior, o Sección Sedimentaria (~260 m), caracterizada por una sucesión de depósitos volcanoclásticos, epivolcánicos y sedimentarios entre los que se reconocen niveles de lutitas pardo oscuro carbonosa, mantos de carbón, tobas cineríticas y areniscas tobáceas, alternadas irregularmente. La sección intermedia corresponde a unidades de flujo de ignimbritas con ocasionales coladas de riolita y de dacita (Sección Volcánica) y la inferior a un intrusivo dacítico. No se cuenta con información geoquímica de los niveles con M.O. para este pozo.

### **Pozo Gaviota Norte-6 o “Gaviota PK-1” (GN-6) (Chile)**

Tercer pozo realizado en el marco de un “Proyecto de Exploración de Cuenas pre-Cretácicas” (junto con los pozos Calafate PK-1 y PK-2), tendiente a evaluar el relleno clástico de estas cuencas con el fin de probar la existencia de roca madre y roca reservorio intergranular (en este caso, en una posición intermedia entre el depocentro y el margen me-



ridional de la cuenca). Fue perforado entre 1989 y 1990 (Fig. 1), alcanzó una profundidad total de 4,074 m, finalizando en el basamento de la cuenca (en el que ingresó ~30 m). Documentó ~1,925 m de la Serie Tobífera. Hacia la base de la secuencia jurásica se observaron ~90 m de limolitas y arcillolitas gris oscuras a negras con delgados niveles de arenisca arcillosa por encima de un nivel de basalto afanítico (86 m).

### Pozo Nevenka-1 (N-1) (Chile)

También realizado como parte del “Proyecto Exploración de Cuencas pre-Cretácicas”, pretendía investigar un “horst” con objetivo principal para la Fm. Springhill, y de manera secundaria, los depósitos dentro de la Serie Tobífera (Fig. 1). Fue perforado en el año 1988, y con una TD de 3,000 m, investigó 650 m de la Serie Tobífera. Se reconocieron dos secuencias, una superior conformada por clásticos epivolcánicos (~230 m) y tobas (~130 m), y una inferior (287 m) constituida principalmente por ignimbritas con intercalaciones muy subordinadas de clásticos gruesos y finos (16 m). Entre los clásticos se reconocieron bancos de areniscas y conglomerados de espesores reducidos (0.2-0.5 m) de composición marcadamente volcánica, y niveles de lutitas gris oscuras de hasta 30 metros de espesor y bancos de carbón intercalados, los que permitieron interpretar la existencia de un cuerpo de agua lacustre, al que ingresan sedimentos más gruesos en forma de avalancha.

### Pozo Chañarcillo-35 (Cha-35) (Chile)

Realizado durante el año 1975, este pozo perforó ~1,390 m en el Jurásico, con fondo en 3,717 m (Fig. 1). Los legajos de pozo indican que se atravesaron “tobas cineríticas, tobas brechosas y en menor proporción tobas arenosas”. En los primeros 231 m se identificaron sedimentitas lacustres (lutitas gris oscuras y pardas) intercaladas entre estas tobas, y a continuación, por debajo de un potente espesor de ignimbritas (250 m), se documentó otro intervalo de sedimentitas lacustres (>150 m de lutitas gris oscuras intercaladas con bancos de areniscas tobáceas y conglomerados) con restos vegetales. Finalmente, y por debajo de este nivel volcánico, se perforaron unos 700 m de rocas volcánicas y piroclásticas (Ignimbritas, lavas andesíticas y riolíticas).

El pozo tuvo por objetivo, además de evaluar las posibilidades de producción de la Fm. Springhill, reconocer la sección sedimentario-volcánica que conforma la Serie Tobífera con el fin de probar los posibles cuerpos de areniscas intercalados. No se cuenta con información geoquímica de los niveles con M.O.

### Pozo Tandy-8 (T-8) (Chile, Bloque Fell)

El pozo tiene origen en un proyecto de exploración de los recursos de hidrocarburos en la “Serie Tobífera”, de acuerdo con Moraga Benavides (1992), encontrándose a la fecha, la Fm. Springhill (horizonte productor tradicional de la cuenca) en una etapa madura de explotación (Fig. 1). El mismo documentó, durante su perforación en el año 1992, una secuencia de turbiditas lacustres compuesta de “arcillolitas negras y pardo oscuro y areniscas de baja permeabilidad, que se intercalan entre depósitos “epivolcánicos” de la Serie Tobífera. Perforó 784 m en el Jurásico, pudiendo separarse una unidad inferior compuesta por flujos ignimbríticos amalgamados (442 m), y una unidad superior (342 m) en la que se reconocen secuencias “epivolcánicas” y volcánicas alternadas irregularmente. Hacia la base se intercala una secuencia de turbiditas lacustres (23.5 m). De acuerdo al desarrollo vertical de facies, se las interpreta como un abanico turbidítico (Moraga Benavides 1992).

### Pozo GIA5.x-1 (Nerita.x-1) (Costa afuera, Área Octans-Pegaso)

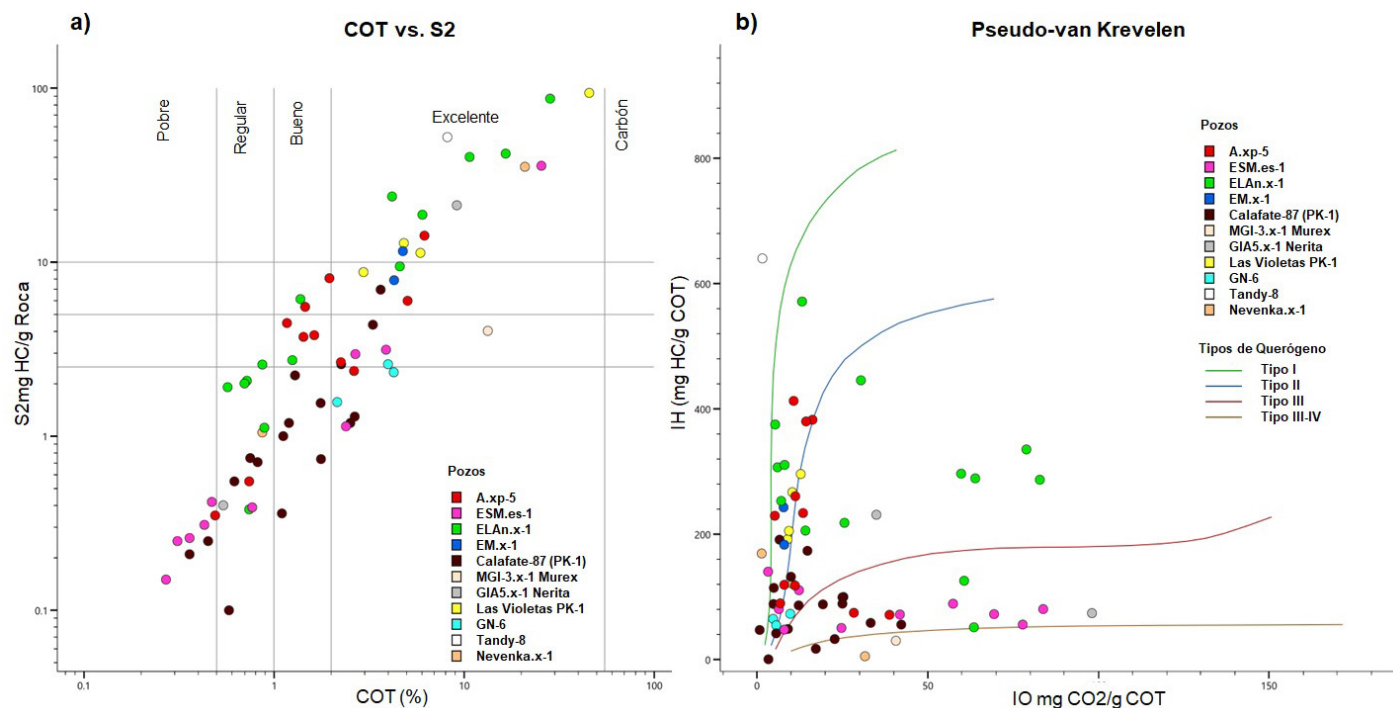
Perforado por la empresa Shell Hydrocarbons B.V. en el sector de *offshore* en el año 1981 (Fig. 1). Penetró la Serie Tobífera desde los 1,160 m bajo boca de pozo, hasta alcanzar los 1,220 m. De acuerdo con el control geológico de la época, se atravesó por coronas un paquete volcánico con láminas carbonosas, por debajo del cual se identificaron en *cutting* tobas hasta el fin del pozo.

### Pozo MFH9.x-1B Conus (Conus.x-1) (Costa afuera, Área Magallanes)

Fue el sexto pozo de nueve pozos perforado por la empresa Shell Hydrocarbons B.V. en el área Magallanes (*offshore*) en el año 1981 (Fig. 1). Penetró la Serie Tobífera desde los 1,635 m bajo boca de pozo, hasta alcanzar los 2,096 m. De acuerdo con el control geológico de la época, se atravesó por corona el tope de la Serie Tobífera, caracterizado por areniscas volcánicas con restos vegetales y fragmentos de conchillas probablemente de gasterópodos de agua dulce, por debajo del cual se identificaron en *cutting* tobas hasta el fin del pozo.

### Pozo MGI3.x-1 Murex (Murex.x-1) (Costa afuera)

Séptimo pozo de los nueve perforados por la empresa Shell Hydrocarbons B.V. en el *offshore*, en el año 1981 (Fig. 1). Alcanzó una profundidad final de 1,624 m, reconociendo 232 m de tobas, con niveles carbonosos intercalados con restos vegetales cerca del tope de la unidad.



**Figura 6.** a) Potencial de generación estimado a partir del pico S2 de la pirólisis y el contenido orgánico. b) Clasificación del querógeno a partir de los datos de pirólisis programada. Los querógenos I y II son generadores primarios de petróleo mientras que el querógeno III lo es de gas. El querógeno IV es generador marginal a nulo de cualquier tipo de hidrocarburos. Se incluyen las muestras correspondientes al material inédito. Aquellas muestras que poseen más de 10 % COT se corresponden con pelitas carbonosas a carbones. Abreviaturas: IH: índice de Hidrógeno; IO: índice de oxígeno.

### Pozos Dungeness XE22 y XE24 (Costa afuera)

Pozos estratigráficos perforados entre los años 1986 y 1987 (Fig. 1). Cerca de los 1,600 m de profundidad, atravesaron entre 100 y 200 metros de la Serie Tobífera por sobre el basamento de la cuenca (gneisses). Dentro del Intervalo Jurásico, se reconoció la presencia de niveles clásticos conformados por areniscas, conglomerados, limolitas y lutitas gris oscuro con restos carbonosos. No se cuenta con información geoquímica de los niveles con M.O.

## RESULTADOS

### Geoquímica de roca madre: Contenido orgánico, pirólisis programada, microscopía del querógeno y madurez térmica

**Pozos EM.x-1, ESM.es-1 y A.xp-5.** En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos para las muestras estudiadas de los tres pozos de Tierra del Fuego. Los gráficos de las figuras 6 y 7 sintetizan los parámetros básicos de contenido orgánico y pirólisis programada reunidos en la tabla.

El estudio geoquímico para las muestras de corona (0.4 m) del pozo EM.x-1 muestra valores de carbono orgánico total (COT) superiores a 4 % asociados a índices de hidróge-

no (IH) en el rango de 183-243 mg HC/g COT e índices de oxígeno (IO) inferiores a 10 mg CO<sub>2</sub>/g COT, indicando buenas características como roca madre de hidrocarburos con capacidad de generación mixta (gas y petróleo), típico de un querógeno de tipo II/III.

En el caso del pozo ESM.es-1 (3 m de testigo corona) se observan valores de TOC entre 0.27-2.68, con IH entre 50 y 110 mg HC/g COT e IO en el rango de 8-100 mg CO<sub>2</sub>/g COT, excepto una muestra que arrojó un elevado valor de COT (25.55 %) y que se caracteriza como una lutita carbonosa. En este sentido, las rocas poseerían pobres a regulares características como roca madre de hidrocarburos.

Finalmente, en el caso del pozo A.xp-5, las muestras analizadas (*cuttings* del tramo 2,535-2,721 m) muestran dos intervalos con buenos valores de COT, uno superior con valores entre 1.63 % y 6.2 %, IH superior a 90 mg HC/g COT e índices de oxígeno (IO) inferiores a 13 mg CO<sub>2</sub>/g COT, indicando buenas características como roca madre de hidrocarburos con capacidad de generación mixta (petróleo/gas) a generación de hidrocarburos gaseosos (querógeno de tipo II-III a III). El intervalo inferior se caracteriza por valores de COT entre 1.17 % y 1.96 %, IH superior a 261 mg HC/g COT (hasta 413 mg HC/g COT) e índices de oxígeno (IO) inferiores a 16 mg CO<sub>2</sub>/g COT, indicando moderadas a buenas características como roca madre de hidrocarburos (petróleo), a partir de

**Tabla.** Resultados obtenidos sobre las muestras analizadas en este estudio. TC: Corona; C: *Cutting*; COT: Carbono Orgánico Total (peso %) mediante Analizador de Carbono LECO; S1: Cuantificación del pico S1 de la pirólisis (mgHC/gRoca); S2: Cuantificación del pico S2 de la pirólisis (mgHC/gRoca); S3: Cuantificación del pico S3 de la pirólisis (mgCO<sub>2</sub>/gRoca); Tmax: Temperatura (°C) alcanzada en el máximo del pico S2; IH: Índice de Hidrógeno (mgHC/gCOT); IO: Índice de Oxígeno (mgCO<sub>2</sub>/gCOT); IP: Índice de Producción; Ro: Reflectancia de la vitrinita.

| Pozo      | Tipo de muestra | Prof.  | COT (%) | S1 mg/g | S2 mg/g | S3 mg/g | Tmax °C | S1/ COT | S2/ COT IH | S3/ COT IO | S2/ S3 | S1/ S1+S2 IP | Microscopía Querógeno |          |             |             |              |
|-----------|-----------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|------------|--------|--------------|-----------------------|----------|-------------|-------------|--------------|
|           |                 |        |         |         |         |         |         |         |            |            |        |              | Ro%                   | Amorfo % | Liptinita % | Vitrinita % | Inertinita % |
| EM.x-1    | TC              | 2390   | 4,29    | 0,72    | 7,87    | 0,34    | 440     | 17      | 183        | 8          | 23,15  | 0,08         | 0,85                  | 60       | Tr          | 25          | 15           |
|           |                 | 2390   | 4,76    | 0,66    | 11,55   | 0,37    | 444     | 14      | 243        | 8          | 31,22  | 0,05         | 0,89                  | 75       | Tr          | 15          | 10           |
| ESM. es-1 | TC              | 2060,3 | 0,27    | 0,11    | 0,15    | 0,21    | 441     | 41      | 56         | 78         | 0,71   | 0,42         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2060,7 | 3,89    | 0,40    | 3,14    | 0,25    | 462     | 10      | 81         | 6          | 12,56  | 0,11         | 0,69                  | 85       | Tr          | 10          | 5            |
|           |                 | 2761,1 | 0,77    | 0,13    | 0,39    | 0,19    | 462     | 17      | 50         | 25         | 2,05   | 0,25         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2761,4 | 0,43    | 0,13    | 0,31    | 0,18    | 421     | 30      | 72         | 42         | 1,72   | 0,30         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2761,7 | 25,55   | 1,76    | 35,88   | 0,83    | 445     | 7       | 140        | 3          | 43,23  | 0,05         | 0,66                  | 50       | Tr          | 40          | 10           |
|           |                 | 2762,1 | 2,39    | 0,19    | 1,14    | 0,19    | 449     | 8       | 48         | 8          | 6,00   | 0,14         | 0,76                  | 85       | Tr          | 10          | 5            |
|           |                 | 2762,2 | 2,68    | 0,34    | 2,96    | 0,33    | 446     | 13      | 110        | 12         | 8,97   | 0,10         | 0,70                  | 100      | Tr          | Tr          | Tr           |
|           |                 | 2762,6 | 0,36    | 0,10    | 0,26    | 0,25    | 447     | 28      | 73         | 70         | 1,04   | 0,28         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2763,1 | 0,47    | 0,13    | 0,42    | 0,27    | -       | 28      | 89         | 57         | 1,56   | 0,24         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2763,4 | 0,31    | 0,13    | 0,25    | 0,26    | 430     | 42      | 81         | 84         | 0,96   | 0,34         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2537,5 | 0,37    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2542,5 | 0,26    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
| A.xp-5    | C               | 2582,5 | 0,30    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2587,5 | 0,32    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2591,5 | 1,63    | 0,54    | 3,81    | 0,22    | 442     | 33      | 234        | 13         | 17,32  | 0,12         | 0,69                  | 70       | Tr          | 25          | 5            |
|           |                 | 2617,0 | 5,04    | 0,48    | 6,00    | 0,40    | 447     | 10      | 119        | 8          | 15,00  | 0,07         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2619,5 | 2,64    | 0,20    | 2,37    | 0,18    | 450     | 8       | 90         | 7          | 13,17  | 0,08         | 0,69                  | 45       | 5           | 45          | 5            |
|           |                 | 2624,0 | 6,20    | 0,67    | 14,23   | 0,32    | 438     | 11      | 230        | 5          | 44,47  | 0,04         | 0,70                  | 30       | 5           | 55          | 10           |
|           |                 | 2627,5 | 2,25    | 0,20    | 2,66    | 0,25    | 444     | 9       | 118        | 11         | 10,64  | 0,07         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2632,5 | 0,74    | 0,14    | 0,55    | 0,21    | 455     | 19      | 75         | 28         | 2,62   | 0,20         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2637,5 | 0,49    | 0,11    | 0,35    | 0,19    | 453     | 22      | 72         | 39         | 1,84   | 0,24         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2642,5 | 0,34    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2652,5 | 0,40    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2657,5 | 0,03    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2662,5 | 0,11    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2666,5 | 0,39    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2676,0 | 1,96    | 0,34    | 8,09    | 0,21    | 444     | 17      | 413        | 11         | 38,52  | 0,04         | 0,79                  | 65       | Tr          | 25          | 10           |
|           |                 | 2682,5 | 1,17    | 0,34    | 4,48    | 0,19    | 443     | 29      | 383        | 16         | 23,58  | 0,07         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2685,5 | 1,46    | 0,31    | 5,55    | 0,21    | 446     | 21      | 380        | 14         | 26,43  | 0,05         | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2688,0 | 1,43    | 0,21    | 3,73    | 0,16    | 441     | 15      | 261        | 11         | 23,31  | 0,05         | 0,78                  | 75       | Tr          | 15          | 10           |
|           |                 | 2692,0 | 0,38    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2717,0 | 0,11    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |
|           |                 | 2720,0 | 0,12    | -       | -       | -       | -       | -       | -          | -          | -      | -            | -                     | -        | -           | -           | -            |

querógeno interpretado como mezcla de querógeno de tipo I y III (propenso a generar petróleo y gas).

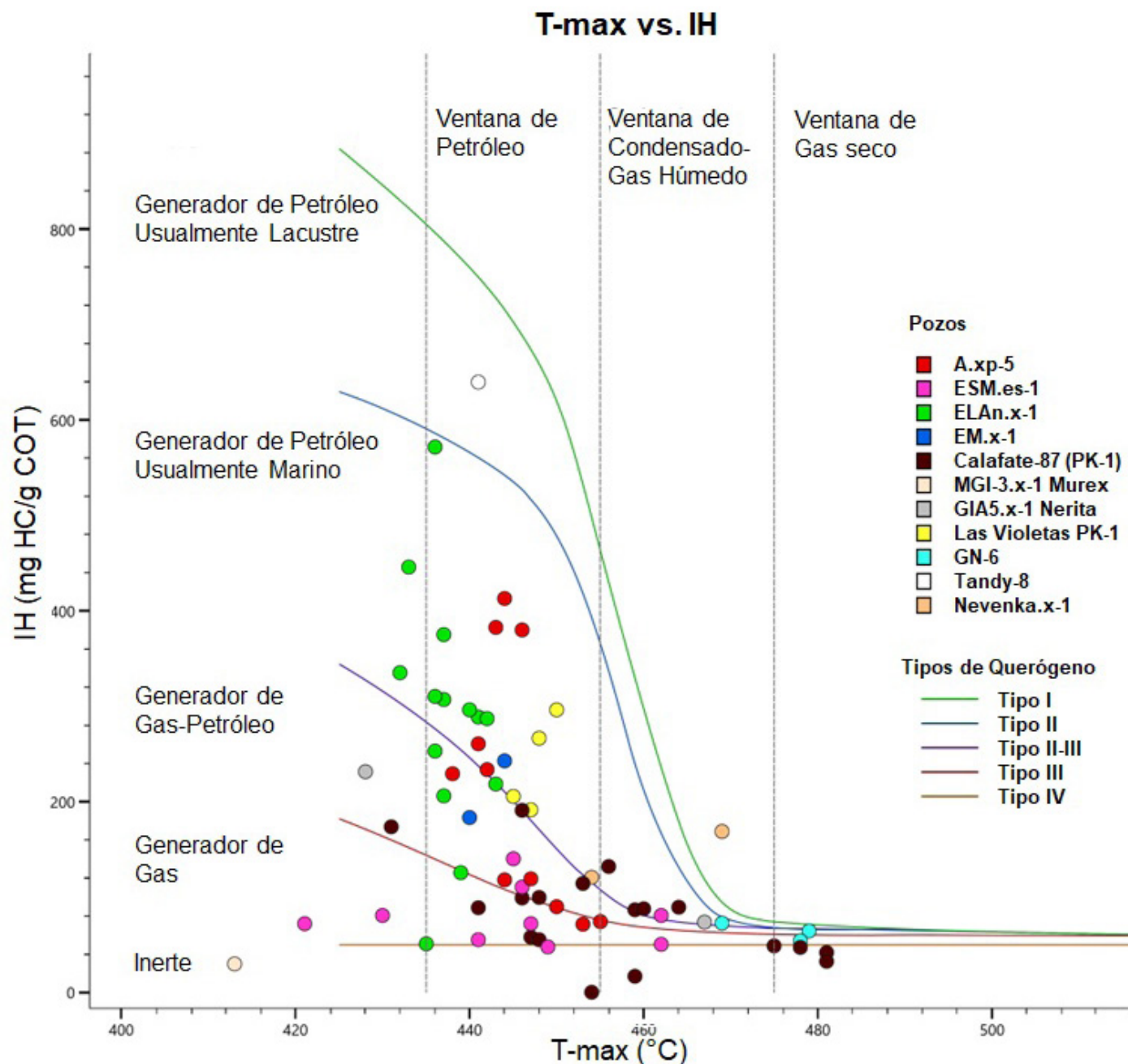
Para los tres pozos, hay que tener en cuenta que los valores originales, post deposición, deben haber sido mayores, y que, debido a la madurez alcanzada, se encuentran deprimidos, por lo que la valoración del tipo de querógeno y calidad de generación presenta un sesgo. Además, los valores actuales poseen cierto grado de depresión debido a que las muestras utilizadas no fueron preservadas, situación demos-

trada por Jarvie et al. (2012), donde se observa que los valores obtenidos por pirólisis podrían haber sido hasta cientos de veces porcentuales mayores de haber utilizado muestras preservadas.

El análisis microscópico del querógeno indica, para todos los pozos, una composición mixta de materia orgánica terrestre derivada de plantas superiores y materia orgánica amorfa posiblemente de origen acuático (Fig. 8).

La asignación de madurez térmica apunta a etapas tem-



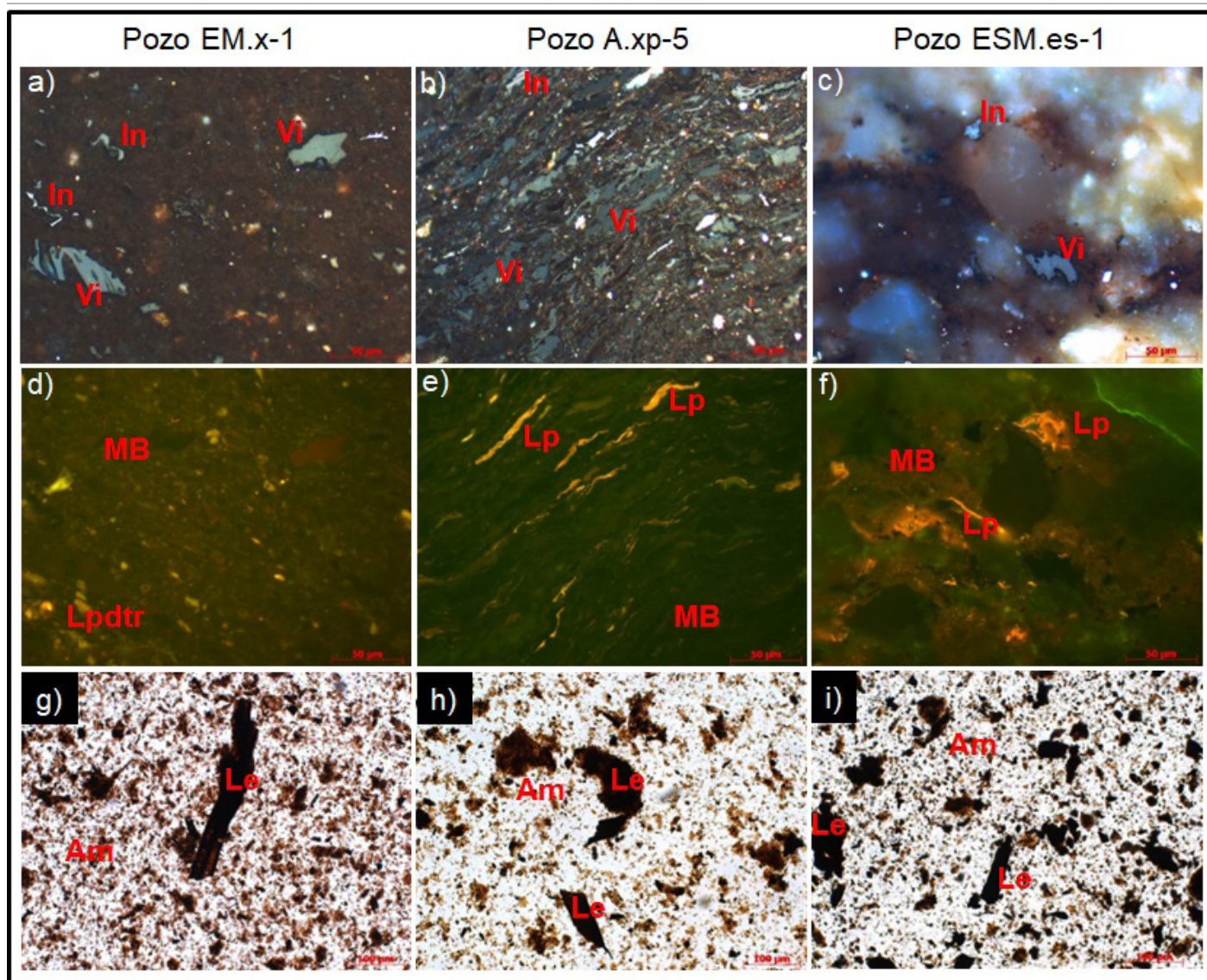


**Figura 7.** Estimación de la madurez térmica y tipo de fluido asociado a partir de los datos de Tmax e Índice de Hidrógeno (IH) de la pirólisis programada. Se incluyen las muestras correspondientes al material inédito.

pranas a medias de la ventana de generación de petróleo, con valores de Ro % entre 0.85-0.89 % para EM.x-1, 0.66-0.76 % en ESM.es-1 y 0.69-0.79 % en el pozo A.xp-5 (Fig. 9).

**Pozos con estudios inéditos.** Para el pozo ELAN.x-1 (provincia de Santa Cruz, Argentina), Villar (2000) sobre el análisis de *cutting* y testigos laterales, observa que el intervalo analizado (>150m) posee un amplio espectro de valores de TOC (0.03-28.36 %) y muy variable potencial generador. Las muestras plotan en querógeno de tipo II a II/III (Fig. 6b), implicando capacidad de generación mixta (petróleo/gas). Los datos de pirólisis de las muestras más ricas indican interesan-

te calidad como roca madre, con picos de S2 de hasta 87.06 mg/g. Por microscopía también se observan significativas variaciones: las composiciones varían de asociaciones con predominio de materia orgánica terrestre (plantas superiores) asociada a facies carbonosas a otras con buena calidad, fluorescentes, con predominio de materia orgánica de tipo amorfo (sapropélica). La presencia de muy abundantes palinomorfos terrestres y cutículas de plantas terrestres, la ausencia de plancton marino, ocasional presencia del alga *Botryococcus* y la general abundancia de vitrinita masiva bien preservada, sugieren la depositación en condiciones variables entre pan-



**Figura 8.** Microscopía del querógeno de los pozos EM.x-1, A.xp-5 y ESM.es-1. (a), (b), (c): campos representativos en preparaciones de plugs pulidos de roca entera, bajo luz blanca incidente, destacando presencia de material vitrinitico e inertinitico. (d), (e), (f): mismos campos bajo irradiación de luz azul-UV (modo fluorescente) destacando matriz mineral bituminosa y restos de liptinita y liptodetrinita dispersa con fluorescencias varias. (g), (h), (i): campos representativos en preparaciones de slide tipo palinológico de querógeno aislado, bajo luz blanca transmitida, poniendo de manifiesto restos leñosos y material amorfo disperso (posiblemente de origen mixto: terrestre + acuático). Abreviaturas: Vi: vitrinita; In: Inertinita; MB: matriz mineral bituminosa; Lp: liptinita; Lpdr: liptodetrinita; Le: restos leñosos; Am: material amorfo.

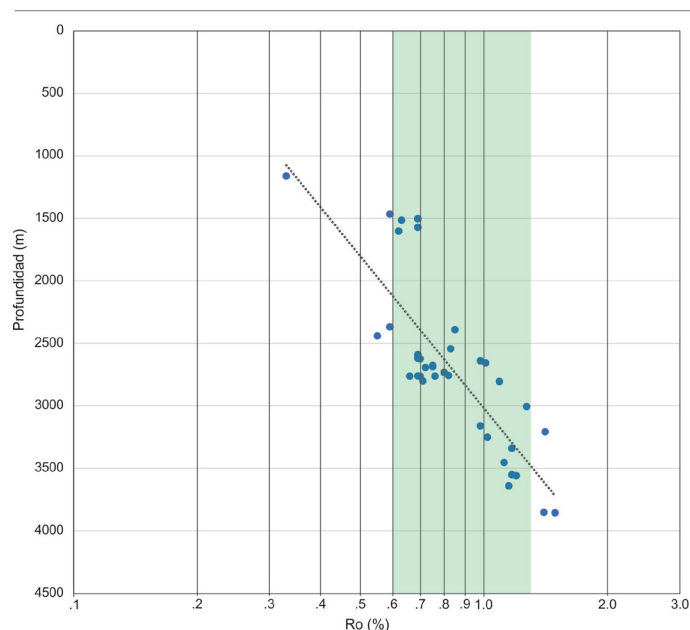
tanos y lagos de agua dulce. A partir de estos tipos de materia orgánica identificados, es de esperarse una capacidad de generación mixta para petróleo y gas. En cuanto a la madurez térmica, las muestras se encuentran en etapas tempranas de generación ( $R_o$  0.59-0.69 %). Se puede establecer que capas análogas a éstas podrían generar petróleos con patrones definidamente terrestres en su composición general y molecular, y posiblemente con un significativo componente ceroso.

En cuanto a los pozos del sector chileno de la cuenca, en los informes de The Robertson Group (1989, 1990, 1991), Simon Petroleum Technology (1994), Urien, Hogg & Asociados & Geochemical Solutions International (2003) y Villar (2019) se indica que:

-El pozo Calafate PK-1 fue analizado a partir de *cuttings* y coronas, registrándose valores de COT entre 0.36 y 4.14 %. El potencial como roca madre es pobre a regular, como se refleja de los valores de  $S_2$ , con valores máximos de 6.96 mg/g, pero dado el nivel de madurez ( $R_o$  hasta 1.17 %) mucho del potencial puede haber sido liberado en la actualidad, y la calidad original podría haber sido buena. A partir del examen visual del querógeno bajo microscopio, se determina que el mismo es de tipo terrestre, rico en esporas. El potencial debe haber sido mayormente hacia la generación de gas, a partir de un querógeno húmico, aunque pequeñas cantidades de petróleo ceroso se pueden haber generado.

-En el caso del pozo Calafate PK-2, se reporta que tres





**Figura 9.** Gradiente de madurez térmica compuesto a partir del conjunto de datos de Ro % de la Serie Tobífera de todos los pozos evaluados. En verde se resalta la ventana de petróleo.

muestras poseen valores de COT en el rango 4.24-11.64 % (entre 2,120-2,270 m).

-Para el pozo Nevenka.x-1, una de las tres muestras analizadas (corona), referida como un carbón, presenta valores de COT de 20.9 %, y buen potencial generador con valores de S2 de 35.35 mg/g e IH de 169, seguramente con potencial generador original de petróleo, encontrándose actualmente en ventana tardía de madurez (Ro de 1,04 %). Las restantes muestras poseen bajos valores de COT, entre 0.19 y 0.87 %. El examen visual de la muestra de carbón permite identificar que el 25 % consiste en liptinita, la que contribuye al elevado valor de IH, y además se observa que los poros están rellenos con material bituminoso fuertemente fluorescente. En el caso de las otras muestras, se ha identificado que los constituyentes corresponden a 50 % de material amorfo (sapropélico) y un 50 % de vitrinita (+/-Inertinita).

-En el caso del pozo GN-6, las tres muestras analizadas a partir de testigo corona, se encuentran con elevada madurez térmica (Ro entre 1.4 y 1.49 %), y aunque poseen buen contenido orgánico (COT entre 2.15 y 4.8 %), poseen bajo potencial generador. De cualquier forma, se cree que el potencial generador debe haber sido mucho mayor que el actual (S2 entre 1.57 y 2.59 mg/g, e IH entre 54 y 73 mg/g). La naturaleza terrestre del querógeno (predominio de vitrinita, entre 90 y 100 %, acompañado de inertinita) sugiere que las muestras deben haber sido propensas a generar gas tras su deposición, o en el mejor de los casos, de probable contribución mixta de petróleo y gas.

-Las muestras analizadas del pozo Las Violetas PK-1 corresponden a arcilitas gris negruzcas con alto a muy alto contenido de materia orgánica (TOC entre 2.96 y 45.7 %). Estas muestras tienen buen potencial generador y cuando se asocian a carbones, poseen excelente potencial como roca madre (S2 cercano a 94 mg/g). A pesar del carácter vitrinitico del querógeno (entre 80 y 85 %) revelado por el análisis microscópico, los datos de pirólisis indican que poseen cierto grado de capacidad de generación de petróleo (IH entre 192 y 296 mg/g). En cuanto a su madurez, las muestras se encuentran cerca de la ventana media con valores de reflectancia de vitrinita entre 0.72 y 0.8 %.

-Respecto del pozo Tandy-8, solo se ha podido recabar información sobre COT y pirólisis, no contándose con datos de microscopía. La muestra de corona analizada presenta valores de COT de 8.15 %, y valores de S2 de 52.3 mg/g y elevado IH (642 mg/g).

-De los pozos ubicados en el *offshore* del estrecho de Magallanes (Chile) se registran: 16 muestras del pozo Neptuno XE-1, con valores de COT en el rango 0.45-15.20 % (2,130-2,436 m), 1 muestra del pozo Ostión XE-1 con un valor de COT de 2.52 % (2,175 m) y 8 muestras del pozo Skua SK-1011, con valores de COT en el rango 0.82-1.50 % (1,874-1,944 m), datos que soportan la riqueza orgánica de la Serie Tobífera en este sector de la cuenca.

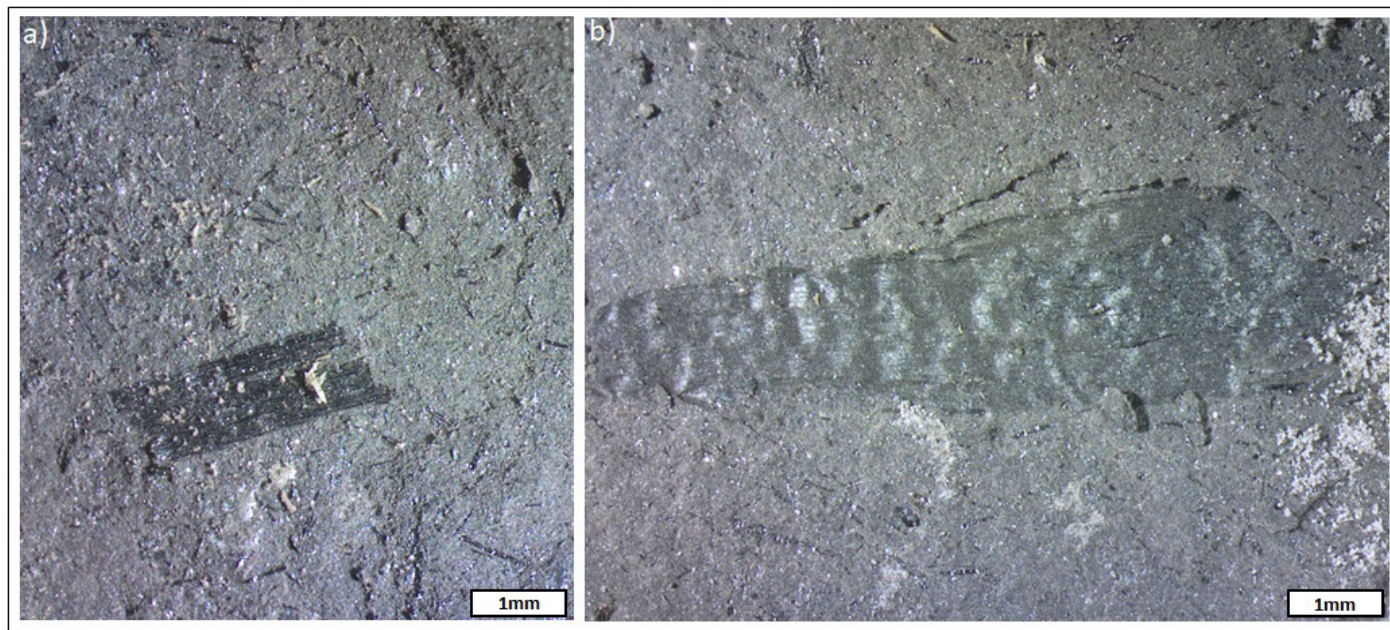
Por último, y de acuerdo con Villar (2004), las muestras pertenecientes al *offshore* argentino se caracterizan de la siguiente manera:

El único nivel analizado en el pozo Conus es particularmente pobre (0.13 % COT).

En el caso de los pozos Murex y Nerita, se han analizado dos niveles en cada uno, obteniéndose en ambos gran variabilidad: en el primero de ellos, se han determinado contenidos de carbón orgánico entre 0.38 % y 13.33 % COT, siendo la primera una muestra que carece prácticamente de interés como hipotético nivel generador. El otro nivel analizado posee un registro de COT particularmente elevado, representando esta muestra un nivel con características generadoras apenas moderadas (Fig. 6a) y querógeno tipo (III)/IV marginalmente gasífero (Fig. 6b), según sus limitados valores de S2 (4.03 mg/g) e IH (30 mg/g). Finalmente, para el pozo Nerita, los niveles poseen entre 0.54 % y 9.17 % COT; los rendimientos de pirólisis de las muestras varían en rangos de S2 desde 0.4 mg/g a 21.21 mg/g, estando asociada la muestra con mayor valor de S2 a potencial generador alto (Fig. 6a) y tipo de querógeno III (Fig. 6b), con capacidad mixta para generación de petróleo / gas.

La madurez térmica sugerida por Tmax, con registros no superiores a 430°C, es baja para el conjunto de las muestras





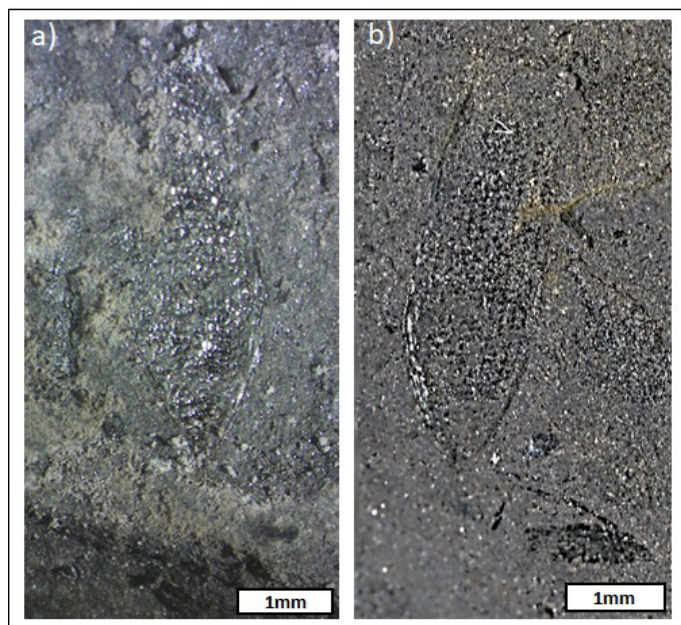
**Figura 10.** Restos vegetales indeterminados.

y vinculadas a fases pre-generación de petróleo.

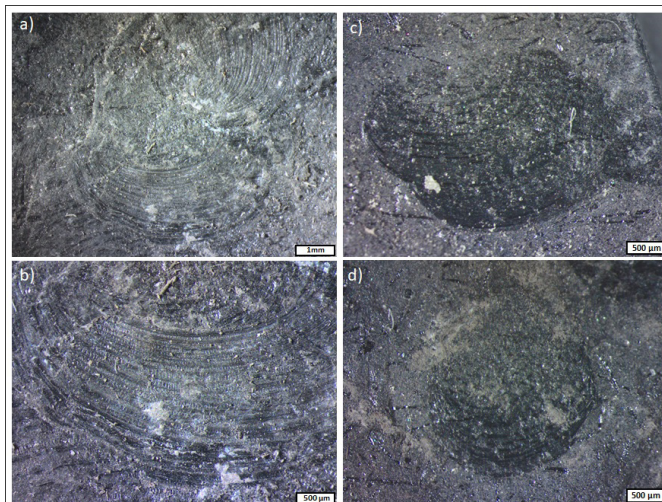
En cuanto a la microscopía del querógeno, de manera general, las muestras denotan asociaciones orgánicas mayormente dominadas por relictos identificables provenientes de plantas superiores. Este dominio está fuertemente controlado por participación de restos estructurados leñoso-carbonosos imponiendo un carácter especialmente gasífero al querógeno a la muestra de Murex, en aceptable concordancia con los datos de pirólisis Rock-Eval. Para el caso de Nerita, abundan restos liptiníticos diversos de origen terrestre asociados

a proporciones variables y altas de querógeno amorfo lipídico fluorescente y restos estructurados leñoso-carbonosos minoritarios: esta muestra tiende a cierta componente sesgada hacia la generación de petróleo, definiendo un carácter mixto (petróleo /gas) en aceptable acuerdo con los datos Rock-Eval. De manera generalizada, se identifican dos tipos de asociaciones orgánicas que esquemáticamente remiten a: depositación de carbones húmicos en ambientes tipo pantano (Murex); depositación de carbones con componente sapropélico (enriquecidos en lípidos) en condiciones subacuáticas (Nerita).

La madurez térmica registrada para el total de las muestras es de fase inmadura para la generación de todo tipo de hidrocarburos, con valores de Ro de 0.44 % en el pozo Murex



**Figura 11.** Élitros de coleópteros. a) Familia Asiocoleidae. b) Familia Cupedidae.



**Figura 12.** “Conchostracos”. a) y b) Familia Fushunograptidae. c) y d) especímenes de la Familia Paleolimnadiopseidae.



y 0.33 % en el pozo Nerita. El conjunto de los datos ópticos y de pirólisis Rock-Eval (Fig. 6 y 7) son consistentes con una muy limitada transformación del querógeno.

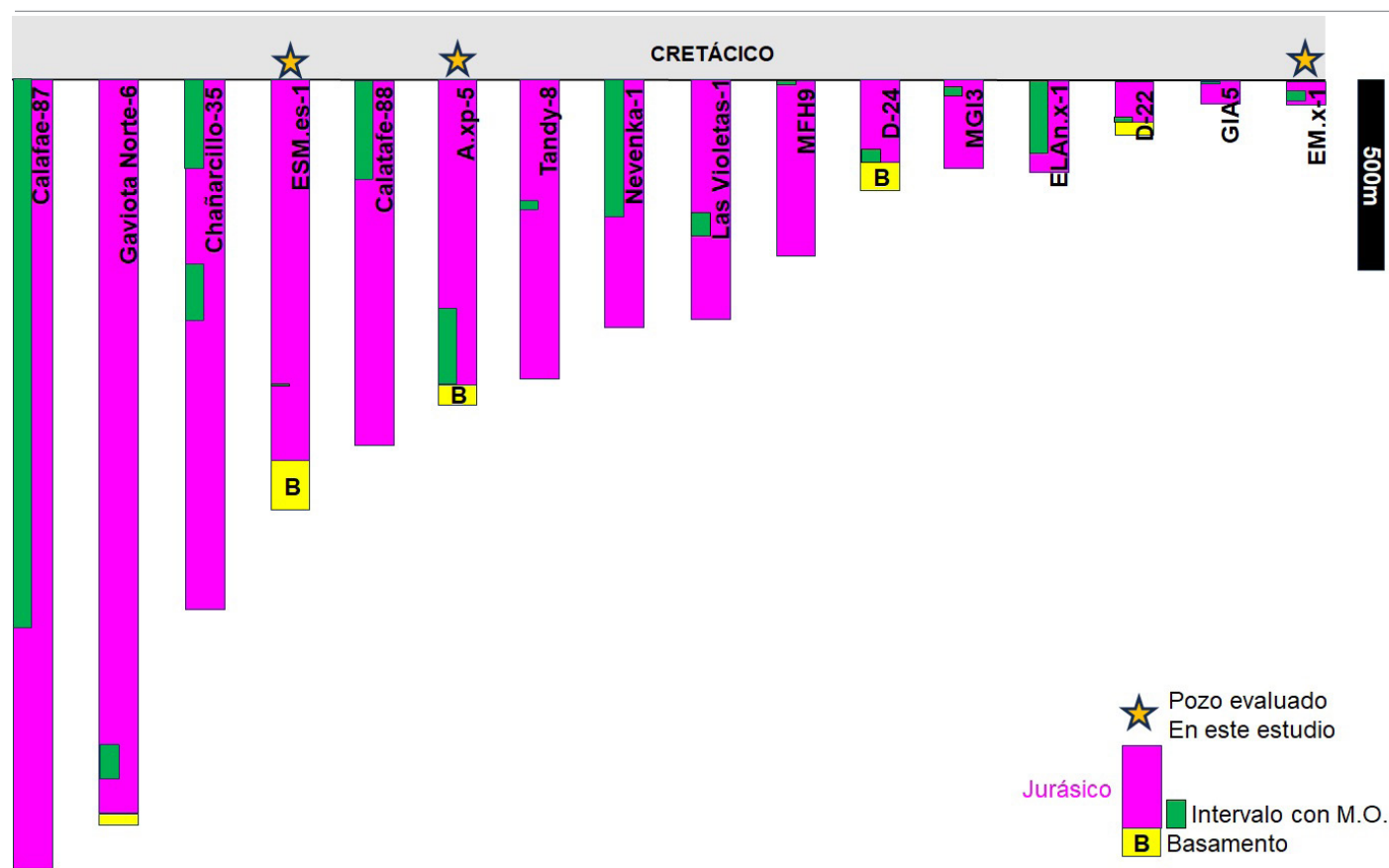
A partir de la integración de los datos de Ro % (Fig. 9) es posible graficar y establecer un gradiente de madurez térmica en función de la profundidad. En el mismo se observa que las muestras ingresan a la ventana de petróleo (0.6 % Ro) a una profundidad de ~2,120 m y salen de la misma (1.3 % Ro) a partir de los ~3,485 m. Estos datos son consistentes con aquellos de Ro de la Fm. Springhill publicados por Laffitte et al. (1986).

### Registro fósil de la Serie Tobífera

Las unidades jurásicas de la Patagonia Argentina que presentan registro fósil tradicionalmente se incluían en las unidades que afloran superficialmente en el Chubut Extraandino y en el Macizo del Deseado (Gallego et al. 2021). Allí las unidades geológicas portadoras son respectivamente las formaciones Cañadón Asfalto (Jurásico Medio a Superior, cuenca de Cañadón Asfalto) y La Matilde (Jurásico Medio). Estas unidades se caracterizan por la presencia de una diversa biota de vertebrados, invertebrados y plantas de los más variados grupos taxonómicos (Escapa et al. 2021; Gallego et al. 2021; Pol et al. 2021). En este trabajo, como ya se mencionó anteriormente, se presentan los primeros registros fósiles para la Serie Tobífera (cuenca Austral-Magallanes) para la provincia de Tierra del Fuego, los que fueron parcialmente reportados (y de manera inédita) previamente por Viviers (1973) en el pozo EM.x-1. De la Cal et al. (2023) reportaron los primeros hallazgos de fósiles reconociendo la abundante presencia de restos vegetales en general indeterminados (Fig. 10) y restos de invertebrados compuestos por insectos y “conchostracos”. Respecto a los insectos, se reconocen al menos dos grupos taxonómicos diferentes del Orden Coleoptera (Suborden Archostemata, Fig. 11). Un élitro de coleóptero asignado a la Familia Asiocoleidae, una familia extinta de pequeños escarabajos típicos del Pérmico medio-tardío que sobrevivieron hasta el Jurásico Tardío en localidades de Australia, China y Mongolia (Tan y Ren 2009; Ponomarenko et al. 2014, 2020). Su registro en la Serie Tobífera es particular porque es una familia característica de las asociaciones de coleópteros de tipo paleozoico y sus restos en depósitos más jóvenes son hallazgos únicos y raros, que podrían indicar algunos ambientes de refugio, donde persistirían elementos de biotas “más antiguas”. Sin dudas que este tipo de evidencias biológico-evolutivas escapan al objetivo de este trabajo y deberán ser analizadas detalladamente de manera comparativa en un futuro, demostrando así la importancia de estos primeros registros fósiles

para la unidad. Un segundo espécimen que se asemeja a la Familia Cupedidae previamente registrada para el Triásico Superior de la Argentina (Martins-Neto et al. 2006; Martins-Neto y Gallego 2009). Mancuso et al. (2007) mencionan que la biota de coleópteros triásicos de la Fm. Los Rastros (Triásico Medio) está compuesta principalmente por miembros del suborden Archostemata y que este primitivo grupo (cuyos élitros presentan ornamentación tipo “crossveins”) incluye las Familias Permosynidae (extinta en el Jurásico), Asiocoleidae y Cupedidae, que están estrechamente relacionadas filogenéticamente, y con registro conocido desde el Pérmico Inferior.

Además de los insectos, se identificaron tres taxones de “conchostracos” espinicaudados (familias Paleolimnadiopseidae, Fushunograptidae y ?Eosestheriidae) (Fig.12). Entre estos, el Palaeolimnadiopseidae, *Eosolimnadiopsis* ? *santacruzensis* (Gallego 1994) fue registrado en numerosas localidades de la Formación La Matilde (Gallego 1994). En segundo término, se reconocieron especímenes posiblemente del género *Orthestheria* (Fushunograptidae) por la presencia de una ornamentación de estrías radiales en las bandas de crecimiento y contorno ovoide-subcircular del caparazón (Fig. 12). La especie de “conchostracos” *Eosolimnadiopsis* ? *santacruzensis* está restringida al sur de la Patagonia y presenta similitudes con especies del Jurásico Inferior a Medio de China (Wang y Liu 1980; Liu 1982; Shen 1985). Con respecto al género *Orthestheria*, este posee una amplia distribución a nivel mundial desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior (Shen et al. 2004). Los especímenes reconocidos en la Serie Tobífera podrían estar estrechamente relacionados a la especie *Cyzicus* (*Lioestheria*) *malacaraensis* Tasch, 1987 registrada en la Formación La Matilde (Tasch 1987), y a otra especie *Orthestheria* (*Migransia*) *ferrandoi* (Herbst) Shen et al. 2004 reportada para la Formación Tacuarembó (Jurásico Superior–Cretácico Inferior) de Uruguay (Herbst y Ferrando 1985). Desde el punto de vista cronoestratigráfico, por el momento la asociación registrada (Palaeolimnadiopseidae - *Eosolimnadiopsis*, Fushunograptidae - *Orthestheria* y ?Eosestheriidae) en la Serie Tobífera sugiere un rango temporal que abarca desde finales del Jurásico temprano (Fauna de *Eosolimnadiopsis*, en Li y Matsuoka 2012) hasta el Jurásico tardío (Fauna de *Eosestheriopsis dianzhongensis*, en Chen et al. 2007 y Li 2004, y *Eosestheriopsis*, en Li y Matsuoka 2012) para China, Este de Asia y América del Sur (Monferran et al. 2020, y Assemblage I y II, en Gallego y Martins-Neto 2006) incluso pudiendo alcanzar el Cretácico temprano (Fauna de *Yanjiestheria* y Fauna de *Eosestheria*, en Chen et al. 2007).



**Figura 13.** Sección esquemática entre los pozos analizados en este estudio, nivelada al tope del Jurásico, indicando los intervalos donde se han reconocido los depósitos lacustres. Se indica con amarillo el basamento de la cuenca, en aquellos pozos que lo han alcanzado. Con estrellas doradas, los pozos ESM.es-1, A.xp-5 y EM.x-1 (evaluados en este estudio).

## DISCUSIÓN

### Sistema petrolero

De acuerdo con Magoon y Dow (1994), un sistema petrolero se define como un sistema natural que comprende un pod de roca madre (generadora de hidrocarburos) activa y todo el petróleo y gas relacionado, incluyendo todos los elementos y procesos geológicos esenciales para que exista una acumulación de hidrocarburos. Esta roca madre que alguna vez estuvo activa, ahora puede estar inactiva o agotada. El término sistema describe los elementos y procesos interdependientes que forman la unidad funcional que crea la acumulación de hidrocarburos. Los elementos esenciales incluyen una roca madre de petróleo, roca reservorio, roca sello y la sobrecarga, y los procesos son la formación de trampas y la generación-migración-acumulación de petróleo. Estos elementos y procesos esenciales deben ocurrir en el tiempo y el espacio para que la materia orgánica incluida en una roca madre pueda convertirse en una acumulación de petróleo. Un sistema petrolero existe dondequiera que se produzcan los elementos y procesos esenciales.

### Rocas madre lacustres en Argentina

Rocas madre asociadas a ambientes de *rift*/lacustres han sido reconocidas en todas las cuencas mesozoicas productivas de la Argentina. Este es el caso de las formaciones Agua da Bandera y Pozo D-129 en la cuenca del Golfo San Jorge, Fm. Cacheuta en la cuenca Cuyana, la Fm. Yacoraite en la cuenca del Noroeste Argentino y el denominado Pre-Cuyo en la Cuenca Neuquina (Uliana et al. 2014), variando su participación a nivel de cuenca en cuanto al aporte de hidrocarburos producidos a la fecha.

De acuerdo con Legarreta y Villar (2011), el Neocomiano y la Fm. D-129 poseen COT entre 0.5-3 %, vinculado a querógeno de tipo I/II a II/III; en el caso de la cuenca Cuyana, la roca madre posee valores de COT entre 3 y 10 %, con querógeno de tipo I; la Fm. Yacoraite se caracteriza por poseer un rango entre 0.5-6 % de COT, y querógeno tipo II/III; finalmente, el Grupo Pre-Cuyo ha documentado valores de COT entre 2 y 11 %, con querógeno de tipo I a mixto I/III. De esta forma, se observa que distintos tipos de querógeno pueden acumularse de acuerdo con las condiciones imperantes en los humedales a partir de los cuales se originan.



## Los sistemas petroleros de la cuenca Austral

En su revisión de los sistemas petroleros de la cuenca Austral, Rodríguez et al. (2008) reconocen la presencia de 6 sistemas petroleros distintos, cuya correlación entre rocas madre e hidrocarburos permite caracterizarlos como probados, hipotéticos o especulativos. En este sentido, estos autores indican que el sistema Tobífera–Tobífera/Springhill se considera como probado, teniendo en cuenta la información publicada por Bravo y Herrero (1997) para el sector chileno de la cuenca Austral. Estos últimos han postulado la correlación entre el petróleo recuperado de “reservorios arenosos del miembro superior de la formación Tobífera” en el hemigraben Calafate con extractos de hidrocarburos obtenidos de “rocas madres arcillosas del entorno y que están en contacto estratigráfico con las areniscas”, sin embargo, los autores no aportan mayores detalles, sobre todo datos geoquímicos que soporten la postulación (biomarcadores).

## La Serie Tobífera como roca madre

La presencia de pelitas negras ha sido mencionada en los afloramientos ubicados al oeste de la cuenca, en la provincia de Santa Cruz (Poiré y Franzese 2010; Poiré et al. 2023). De cualquier forma, los mismos representarían el relleno más joven (V3 de Pankhurst et al. 2000) previo a la apertura de la cuenca de Rocas Verdes, y su influencia marina habría generado una impronta distintiva, disímil a los depósitos aquí analizados.

Para el sector argentino de la cuenca Austral, Cagnolatti et al. (1996) ya habían indicado la capacidad oleogenética de las rocas perforadas en el pozo A.xp-5 (COT 0.72-7.34 % y facies orgánica depositada probablemente en un ambiente lacustre con aporte de materia orgánica terrestre y subordinadamente algal-bacteriana), y para el sector chileno, Bravo y Herrero (1997) habían destacado la presencia de niveles pelíticos jurásicos en Las Violetas, Calafate y Gaviota Norte (COT 0.5-6 % y querógenos de tipo vitriniticos, con aporte subordinado de inertinita y sapropélicos, con predominancia de querógenos terrestres de tipo III y capacidad de generación mixta).

Como ya fue descrito a partir de los gráficos de las figuras 6 y 7, la base de datos aquí analizada permite caracterizar a las pelitas negras identificadas hasta la fecha como un grupo heterogéneo, con querógenos que varían desde tipo I a tipo III/IV, con abundante participación de material terrestre (derivado de plantas) y sapropélico de calidad moderada, lo que implica presencia de rocas generadoras con interesante capacidad para petróleo y gas. Rocas, con fuerte afinidad terrestre como las aquí analizadas, han sido identificadas como

responsables de los hidrocarburos producidos en la cuenca Gippsland en Australia (Edwards et al. 2016).

Respecto a la presencia de rocas madre con querógeno tipo I (aquellas con excelentes condiciones de generación de petróleo), se ha anticipado su presencia por correlación teórica con petróleos reportados en Tierra del Fuego por de la Cal et al. (2022) (Pozo AS.x-1001, Grupo G1), aquel identificado en el pozo Laguna Maria.x-1 en la Provincia de Santa Cruz (CGC, comunicación personal), bitumen alojado en la Serie Tobífera en el pozo AM-616 en el Área Magallanes del *offshore* argentino (Villar 2005) y con dudas, petróleos recuperados en los pozos Calafate pk-1 y Dicky-8A en Chile (Robertson 1997).

## Los sistemas lacustres en la Serie Tobífera

En la figura 13 se han graficado las pelitas negras identificadas a lo largo del relleno volcánico de la Serie Tobífera (relleno nivelado al tope del Jurásico) y donde se observa que su ocurrencia se da aleatoriamente en la columna estratigráfica (inicio del relleno, sectores medios, etc). Independientemente del sesgo que pueda existir en la información analizada (condicionada por la escasez de perforaciones, así como la falta de evaluación de numerosos hemigrábenes), se destaca el gran espesor que de este tipo de depósitos ha quedado preservado en el pozo Calafate-87 (>1000m).

Dada la predominancia de material piroclástico/volcánico por sobre aquel de origen sedimentario, se podría inferir que este último responde a momentos de calma de la actividad volcánica, donde los ambientes sedimentarios, especialmente cuerpos de agua donde material fino fue capaz de decantar y la materia orgánica ser preservada, pudieron haberse instaurado y perdurar en el tiempo, lo que permitió el establecimiento de las poblaciones de los espinicaudados (“conchostracos”).

Los “conchostracos” constituyen el componente autóctono de estos sistemas lacustres mientras que los insectos comprenden el componente alóctono a los mismos (Mancuso et al. 2007). Ambos grupos representan los principales elementos hallados corrientemente en los ecosistemas lacustres mesozoicos (Gallego et al. 2021).

Los espinicaudados se caracterizan particularmente por habitar en la actualidad ambientes de agua dulce temporales (charcas), y ocasionalmente han sido reportados en ambientes salobres del pasado (Tasch 1969; Frank 1988; Li y Matsuoka 2012). Entre los ambientes dulceacuícolas en que habitan tanto los representantes actuales como fósiles, se encuentran las márgenes y zona litoral de grandes lagos, pequeños sistemas lacustres del valle de inundación, pantanos, tundras, cavernas, pequeños lagos permanentes, charcas

y hasta campos de cultivo de arroz (Monferran 2014; Monferran et al. 2013b, 2016). Estos cuerpos acuáticos pueden contener sedimentos en suspensión y estar densamente vegetados. Las variables ambientales en las que se desarrollan presentan valores de temperaturas entre 13 y 25°C, pero algunas especies pueden sobrevivir a 1 o 41°C. Normalmente, viven en aguas continentales de pH neutro (pH = 7) a alcalino (pH = 9.7) o ligeramente ácido (pH = 6) (Tasch 1969; Frank 1988). En relación a los insectos, tanto los representantes de los Asiocoleidae como de los Cupedidae reportados en este trabajo se caracterizan por tener hábitos eminentemente terrestres y alóctonos al lago de Tobífera. Mancuso et al. (2007) mencionan para la biota de coleópteros triásicos un hábito de vida semejante, tanto para formas fósiles como actuales. Los cupédidos recientes se caracterizan por vivir en diferentes hábitats como bosques cerrados o abiertos, y en madera en descomposición (en coincidencia con la abundante materia orgánica registrada en los niveles portadores). Muchas de las especies de cupédidos son endémicas, y conocidas sólo en áreas limitadas. Como en el caso de la Familia Ommatidae, también se pueden encontrar en las selvas tropicales, praderas áridas o bosques abiertos. Los adultos son malos voladores o sea que se dispersan poco fuera de sus sitios de residencia habituales, siendo así buenos indicadores ambientales. Las piezas bucales del adulto sugieren hábitos de alimentación del polen, mientras que todas las larvas conocidas se alimentan de madera muerta. Estos hábitos de vida en relación a la vegetación circundante a los sistemas lacustres se ven soportados por la presencia de abundante materia orgánica en los niveles portadores de esta fauna.

## CONCLUSIONES

La unidad analizada en este estudio tiene buenas características para ser considerada roca madre efectiva de hidrocarburos, a partir de la identificación de numerosos intervalos con moderado a alto contenido orgánico, características de pirólisis y microscópicas en línea con querógenos que varían desde escasos registros de tipo I algal (lacustre) de alta calidad pro-petróleo, a mezclas I/III, con carácter mixto para petróleo-gas, a III/IV posiblemente controlado por material leñoso derivado de plantas superiores y con calidad disminuida sesgada hacia un carácter pro-gas. El rango de madurez térmica registrado en las muestras de la Serie Tobífera, en el conjunto de los pozos considerados, es bien amplio (dependiendo de la posición y profundidad), según los datos disponibles de Ro (reflectancia de la vitrinita %) y Tmax de pirólisis: inmaduro a marginalmente maduro en alrededor de los 2,000

m; ventana de petróleo temprano a medio entre aproximadamente 2,200 y 3,000 m; fase de petróleo tardío entre aproximadamente 3,000 y 3,500 m; fase de gas-condensado a profundidades mayores de ~3,500 m. En el gráfico de la figura 9, llaman la atención los datos que a una profundidad de 1,500/1,600 m se encuentran en la ventana de petróleo. Los datos corresponden al pozo ELAN.x-1 e indican una anomalía respecto del gradiente “normal/esperable” al que se ajustan las demás muestras, lo que podría deberse a causas tectónicas (exhumación) o al aporte térmico generado por actividad magmática (se ha documentado la existencia de intrusivos ígneos a lo largo de Santa Cruz por Porras et al. 2011, y referencias allí citadas) como han indicado Laffitte et al. (1986) para el sector norte de la cuenca, en base al análisis realizado sobre muestras de carbón de la Fm. Springhill.

Es de esperarse que cada depocentro posea un tipo de relleno particular, y por ende, un tipo de materia orgánica preservada característica, que lo diferencie del resto. En este sentido, Liu et al. (2023) han demostrado la variabilidad en los macerales del Mb. Chang 7 (Fm. Yanchang, Triásico de la cuenca de Ordos, China) a partir del estudio de dos secciones aflorantes: los mismos han determinado en una de ellas, una secuencia caracterizada por querógeno de tipo I (dominado por material amorfo y alginita en menor medida), y la otra caracterizada por querógeno tipo III dominado por vitrinita e inertinita. Dado esto, no se descarta que dentro de un mismo depocentro de la Serie Tobífera existan variaciones en el tipo de querógeno, y que aún no se haya determinado debido a la escasez de perforaciones. Este quizá es el caso del depocentro donde se han perforado los pozos Angostura y Estancia San Martín, donde la escasa información sísmica registrada permitiría inferir que los mismos han sido perforados en una posición de borde/costa de los cuerpos de agua (de acuerdo con Cagnolatti et al. 1996 y de la Cal et al. 2022, el depocentro Angostura tendría su desarrollo hacia la Bahía de San Sebastián, ubicada al este de los pozos ya mencionados).

A excepción de los pozos A.xp-5 y ESM.es-1 (depocentro Angostura), la mayoría de los depocentros de los sectores *onshore* y costa afuera de la Argentina han sido escasamente explorados (sólo se ha perforado los primeros metros del relleno jurásico, debido a que el objetivo exploratorio se concentraba en la Fm. Springhill del Cretácico), lo que representa seguramente un sesgo en la información disponible para su caracterización. Dado esto, estudios multidisciplinarios como los aquí expuestos contribuirán a caracterizar los ambientes lacustres asociados al *rifting* jurásico de la Patagonia, aportando datos no solo del tipo de vida imperante en los mismos, sino de las características de los cuerpos de agua donde la materia orgánica fue preservada. En este sentido, la integra-

ción de los estudios presentados con futuros análisis (geoquímica de petróleo y extractos de roca, algunos en marcha) permitiría determinar con mejor precisión la dinámica de este tipo de sistemas y aquellas estrategias exploratorias que involucren al Sistema Petrolero Tobífera-Tobífera.

En cuanto al material fósil, este es el primer reporte para la Serie Tobífera y se compone principalmente de restos vegetales indeterminados y restos de invertebrados típicamente continentales compuestos por crustáceos “conchostracos” (espinicaudados) asignados preliminarmente a tres familias (Palaeolimnadiopseidae, Fushunograptidae y ?Eosestheriidae) e insectos del orden Coleoptera, representados por élitros asignados a Cupedidae con registro en unidades triásicas sudamericanas y a Asiocoleidae cuyo registro es el primero para el hemisferio sur.

Finalmente, es de destacar, que, por el momento, y a la luz de la información con la que se cuenta, no se ha determinado una correlación directa entre roca y petróleo que permita afirmar que el Sistema Petrolero Tobífera-Tobífera constituya un Sistema de tipo probado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la empresa Roch S.A. por permitir la publicación de los datos, y a Enrique Feinstein por el constante apoyo. Se agradece además a la empresa ENAP-SIPETROL, especialmente a Daniel Perez Simón, Marcelo Santiago, Ivan Arriagada Saldias, Pablo Mella Sepulveda y Nestor Canessa Di Santo por el acceso a la información referente a pozos por esa empresa operados; a Julieta Balderramas de la Secretaría de Hidrocarburos de Tierra del Fuego por el acceso a parte del material aquí estudiado y a la empresa IGI Ltd por el acceso a una licencia académica del software p:IGI. Además, se agradece al Comité Organizador del 8° Simposio Argentino del Jurásico, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE-SGCyT) por el apoyo a los proyectos sobre invertebrados fósiles (PI-18Q005 y PI-23Q001, O.F.G. y M.D.M.). Finalmente, se agradece a Susana Damborenea, editora invitada, y a los revisores Hugo Arbe y Carlos Macellari por los comentarios y sugerencias realizadas, los que han enriquecido el manuscrito de manera significativa.

## REFERENCIAS

Arbe, H.A. 1986. El Cretácico de la Cuenca Austral: sus ciclos de sedimentación. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 585

p., Buenos Aires.

Arbe, H.A. 1987. El Cretácico de la Cuenca Austral. Boletín de Informaciones Petroleras 9: 91-110.

Arbe, H.A. 1989. Estratigrafía, discontinuidades, y evolución sedimentaria del Cretácico de la Cuenca Austral, Provincia de Santa Cruz. En: Chebli, G.A. y Spalletti, L.A. (eds.), Cuencas Sedimentarias Argentinas. Serie Correlación Geológica, N° 6, Universidad Nacional de Tucumán, 10° Congreso Geológico Argentino, 1987: 419-442, Tucumán.

Arbe, H. y Fernández Bell Fano, F. 2002. Formación Springhill en el área costa afuera. En: Schiuma, M., Hinterwimmer, G., y Vergani, G. (eds.), Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas Argentinas, 5° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: 75-89, Mar del Plata.

Barreda, V. y Palamarczuk, S. 1992. Informe Palinológico de la Sección 1650-55m a 2690-64m del Pozo Angostura Xp-5. OEA S.A. (inédito), 15 p.

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: 41-61.

Bravo, P. y Herrero, C. 1997. Reservorios naturalmente fracturados en rocas volcánicas jurásicas, Cuenca de Magallanes, Chile. 6° Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Memorias, Tomo I: 66-84, Bogotá.

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. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, vol. 1: 123-139, Buenos Aires.

Chen, P.J. y Shen, Y.B. 1985. An introduction to fossil Conchostraca. Science Press, 241 p., Beijing.

Chen, P.J., Li, G. y Batten, D.J. 2007. Evolution, migration and radiation of late Mesozoic conchostracans in East Asia. Geological Journal 142: 391-413.

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. 11° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Exploración y Sistemas Petroleros, Trabajos Técnicos: 383-405, Mendoza.

de la Cal, H.G., Gallego, O.F., Monferran M.D., Villar, H.J., Páez, G. y Yan, E.V. 2023. Novedosos Hallazgos Fosilíferos y Estudios Geoquímicos en el Registro Lacustre de la Serie Tobífera, Jurásico del Subsuelo de la Cuenca Austral, Tierra del Fuego, Argentina. 8° Simposio Argentino del Jurásico, Asociación Geológica Argentina, Serie D Publicación Especial 17: 27-29, Buenos Aires.

Edwards, D.S., Ahmed, M., Bernecker, T., Boreham, C.J., Gong, S., Gollie-Divko, L., Gorter, J., Hall, L., Langford, R.P., Mitchell, C. y Volk, H.



2016. A Geochemical Overview of Some Gippsland Basin Hydrocarbon Accumulations. Search and Discovery Article #10840.
- Escapa, I., Elgorriaga, A., Nunes, C., Scasso, R. y Cúneo, N.R. 2021. Megafloras del Jurásico en la Cuenca de Cañadón Asfalto: Biomás en Transformación. En: Giacosa, R. (ed.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut, 21° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 878-901, Puerto Madryn.
- Frank, P.W. 1988. Conchostraca. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 62: 399-403.
- Gallego, O.F. 1994. Conchostracos Jurásicos de Santa Cruz y Chubut, Argentina. *Ameghiniana* 31(4): 333-345.
- Gallego, O.F., Cabaleri, N.G., Monferran, M.D., Armella, C., Zacarías, I.A., Silva Nieto, D. y Jiménez, V.C. 2021. D.2.c Invertebrados Continentales. En: Giacosa, R. (ed.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut, 21° Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 755-779, Puerto Madryn.
- Gallego, O.F. y Martins-Neto, R.G. 2006. The Brazilian Mesozoic conchostracan faunas: its geological history as an alternative tool for stratigraphic correlations. *Geociências* 25: 231-239.
- Haq, B.U., Hardenbol, J. y Vail, P.R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science* 235: 1156-1167.
- Herbst, R. y Ferrando, L.A. 1985. *Cyzicus* (Lioestheria) ferrandoi n. sp. (Conchostraca, Cyzicidae) de la Formación Tacuarembó (Triásico Superior) de Uruguay. *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral* 16(1): 29-47.
- 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: 235-275.
- Jarvie, D.M., Jarvie, B.M., Weldon, W.D. y Maende, A. 2012. Components and Processes Impacting Production Success from Unconventional Shale Resource Systems. Search and Discovery Article #40908.
- Kay, S., Ramos, V., Mpodozis, C. y Sruoga, P. 1989. Late Paleozoic to Jurassic silicic magmatism at the Gondwana margin: Analogy to the Middle Proterozoic in North America?. *Geology* 17: 324-328.
- Laffitte, G.A., Arias, W.E. y Marinelli, R.V. 1986. Caracterización Térmica de la F. Springhill, Cuenca Austral. Relación con el Entrampamiento de los Hidrocarburos. 60° Reunión Anual de Expertos, ARPEL, Exploración, Actas: 70-78, Lima.
- LCV, 1992. Estudio Petrográfico y mineralógico, sondeo A.xp-5. OEA, informe 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. (inédito) 72p., Buenos Aires.
- Legarreta, L. y Villar, H.J. 2011. Geological and Geochemical Keys of the Potential Shale Resources, Argentina Basins. IAPG, Search and Discovery Article, 80196.
- Lesta, P. y Ferello, R. 1972. Región extraandina de Chubut y norte de Santa Cruz. En: Leanza, A. (ed.), Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias: 602-687, Córdoba.
- Lesta, P.J., Ferello, R. y Chebli, G.A. 1980. Chubut extraandino. En: Turner, J.C.M. (ed.), Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 2: 1307-1387, Córdoba.
- Li, G. 2004. Discovery of Qinghaiaestheria from the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in Sichuan, southwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences* 24: 361-365.
- Li, G. y Batten, D.J. 2004. Revision of the conchostracan genera *Cratos-tracus* and *Porostracus* from Cretaceous deposits in north-east China. *Cretaceous Research* 25: 919-926.
- Li, G. y Matsuoka, A. 2012. Jurassic clam shrimp ("conchostracan") faunas in China. *Sci Rep, Niigata Univ (Geology)* 27: 73-88.
- Liu, S.W. 1982. Early Jurassic Palaeolimnadiopseioidea (Conchostraca) de China. *Acta Palaeontologica Sinica* 21(4): 383-390.
- Liu, B., Teng, J. y Mastalerz, M. 2023. Maceral Control on the Hydrocarbon Generation Potential of Lacustrine Shales: A Case Study of the Chang 7 Member of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, North China. *Energies* 16(2): 636.
- Magoon, L. y Dow, W. 1994. The petroleum system. En: Magoon, L. y Dow, W. (ed.), The Petroleum System from source to Trap. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 60: 3-24.
- Malvicini, L. y Llambías, E. 1974. Geología y génesis del depósito de manganeso Arroyo Verde, provincia del Chubut. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas: 185-202, Córdoba.
- Mancuso, A.C., Gallego, O.F. y Martins-Neto, R.G. 2007. The Triassic Insect Fauna from the Los Rastros Formation (Bermejo Basin) La Rioja Province, Argentina: their context, taphonomy and palaeobiology. *Ameghiniana* 44(2): 337-348.
- Martin, J.W. y Davis, G.E. 2001. An updated classification of the recent Crustacea, Natural History Museum of Los Angeles County. *Science Series* 39: 1-124.
- Martins-Neto, R.G., Gallego, O.F. y Mancuso, A.C. 2006. The Triassic Insect Fauna from Argentina. Coleoptera from Los Rastros Formation (Bermejo Basin), La Rioja Province. *Ameghiniana* 43(3): 591-609.
- Martins-Neto, R.G. y Gallego, O.F. 2009. The Triassic Insect Fauna from Argentina. Blattoptera and Coleoptera from Ischichuca Formation (Bermejo Basin) La Rioja province. *Ameghiniana* 46(2): 361-372.
- Monferran, M.D. 2014. Estudio sistemático y paleoecológico de los conchostracos de la Formación Cañadón Asfalto (Jurásico Medio-Superior), Chubut (Argentina), Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédita), 326 p., Buenos Aires.
- Monferran M.D., Gallego, O.F. y Cabaleri, N.G. 2013a. First record of the family Fushunograptidae ("Conchostraca", Spinicaudata) of the Cañadón Asfalto Formation (Upper Jurassic), Patagonia Argentina. *Ameghiniana* 50: 447-459.
- Monferran M.D., Gallego, O.F., Astrop T. y Cabaleri N.G. 2013b. Autecology of *Wolfestheria smekali* (spinicaudata) from the Upper Jurassic (Cañadón Asfalto Formation), Patagonia, Argentina. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 392: 52-61.

- Monferran, M.D., Cabaleri, N.G., Gallego, O.F., Armella, C. y Cagnoni, M. 2016. Spinicaudatans from the Upper Jurassic of Argentina and their paleoenvironments. *Palaos* 31: 405-420.
- Monferran, M.D., Gallego, O.F., Cabaleri, N.G. 2020. Revision of two spinicaudatan species from the Cañadón Asfalto Formation (Jurassic), Patagonia Argentina. *Zoological Studies* 59 (37): 1-11.
- Moraga Benavides, J. 1992. Antecedentes para la Evaluación de una Secuencia de Turbiditas Lacustres de Baja Permeabilidad Desarrolladas en la Serie Tobífera. Tandy 8. ENAP, (inédito), 20 p., Punta Arenas.
- Moraga Benavides, J. 1996. Prospección de Hidrocarburos en Cuencas de Extensión Precretácicas, Magallanes, Chile. Tesis de grado, Universidad de Chile, 121 p., Santiago.
- Pankhurst, 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: 605-625.
- Pittion, J.L. y Arbe, H.A. 1999. Sistemas petroleros de la Cuenca Austral. 4º Congreso Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas I: 239-262, Mar del Plata.
- Pittion, J.L. y Goudain, J. 1991. Source-Rocks and oil generation in the Austral Basin. 13º World Petroleum Congress, Proceedings 2: 113-120, Buenos Aires.
- Poiré, D.G. y Franzese, J. 2010. Mesozoic clastic sequences from a Jurassic rift to Cretaceous foreland basin, Austral Basin, Patagonia, Argentina. En: del Papa, C. y Astini, R. (eds.), *Field Excursion Guidebook*, 18º International Sedimentological Congress, FE-C13: 1-53, Santa Cruz.
- Poiré, D.G., Tineo, D.E., Moyano Paz, D., García, P.J., Pérez, L.M. y Noriega, R.H. 2023. Calizas, Margas y Pelitas Negras del "Sistema Petrolero Tobífera-Tobífera", Jurásico de la Cuenca Austral, Argentina. 18º Reunión Argentina de Sedimentología: 9º Congreso Latinoamericano de Sedimentología, Actas: 315, La Plata.
- Pol, D., Carballido, J.L., Rougier, G.W., Rauhut, O.W.M., Sterli, J. y Gómez, K. 2021. D.6. Vertebrados Tetrápodos Mesozoicos de la Cuenca Cañadón Asfalto. En: Giacosa, R. (ed.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Chubut*, 21º Congreso Geológico Argentino, Relatorio: 780-805, Puerto Madryn.
- Ponomarenko, A.G., Aristov, D.S., Bashkuev, A.S., Gubin, Yu.M., Khramov, A.V., Lukashevich, E.D., Popov, Yu. A., Pritykina, L.N., Sinitisa, S.M., Sinitshenkova, N.D., Sukatcheva, I.D., Vassilenko, D.V. y Yan, E.V. 2014. Upper Jurassic Lagerstätte Shar Teg, Southwestern Mongolia. *Paleontological Journal* 48: 1573-1682.
- Ponomarenko, A.G., Yan, E.V., Strelnikova, O.D. y Beattie, R.G. 2020. The first finding of an asiocoleid beetle (Coleoptera: Asiocoleidae) in the Upper Permian Belmont Insect Beds, Australia, with descriptions of a new genus and species. *Israel Journal of Entomology* 50: 1-9.
- Porras, J., Agüera, M., Pérez, A.M., Pagán, F. y Belotti H. 2011. Caracterización Geológica y Potencial Petrolífero de los Cuerpos Ígneos Intrusivos de la Cuenca Austral, Argentina. 8º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos: 519-548, Mar del Plata.
- Robbiano, J.A., Arbe, H.A. y Gangui A. 1996. Cuenca Austral Marina. 13º Congreso Geológico Argentino, y 3º Congreso de Exploración de Hidrocarburos. En: Ramos, V.A. y Turic, M.A. (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina*, Relatorio 17: 323-341, Buenos Aires.
- Robertson Research International Limited (Robertson) 1997. Reporte N°7948/lc: Oil-Oil and Oil-Source Rock Correlation Study, Magallanes Basin, Chile. ENAP (inédito), 199 p.
- Rodríguez, J. y Miller, M. 2005. Cuenca Austral. En: Chebli, G.A., Cortiñas, J., Spalletti, L.A., Legarreta, L. y Vallejo, E. (eds.), *Frontera Exploratoria de la Argentina*. 6º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG: 307-324, Mar del Plata.
- 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.), 7º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, *Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas*: 1-31, Buenos Aires.
- Scholz, F. y Schneider, J.W. 2015. Improved methodology of 'conchostracan' (Crustacea: Branchiopoda) classification for biostratigraphy. *Newsletters on Stratigraphy* 48: 287-298.
- Schwarz, E., Veiga, G.D., Spalletti, L.A. y Massaferro, J.L. 2011. The transgressive infill of an inherited-valley system: The Springhill Formation (lower Cretaceous) in southern Austral Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology* 28: 1218-1241.
- Shen, Y.B. 1985. Classification and evolution of the Family Palaeolimnadiopseidae (Conchostraca). *Scientia Sinica (Series B)* 28(8): 888-894.
- Shen, Y.B. 1994. Jurassic conchostracans from Carapace Nunatak, southern Victoria Land, Antarctica. *Antarctic Science* 6: 105-113.
- Shen, Y.B., Gallego, O.F. y Martínez, S. 2004. The conchostracan subgenus *Orthestheria* (Migransia) from the Tacuarembó Formation (Late Jurassic-? Early Cretaceous, Uruguay) with notes on its geological age. *Journal of South American Earth Simon Petroleum Technology Sciences* 16: 615-622.
- (SPT) Limited. 1994. Reporte N° 7417/lc: A Petroleum Geochemical Analysis of Rock Samples and Oils from 6 Wells, Magallanes Basin, Chile, (inédito), 85 p., Llandudno.
- Stipanovic, P.N. y Reig, O.A. 1957. El "Complejo Porfirico de la Patagonia Extrandina" y su fauna de anuros. *Acta Geológica Lilloana* 1: 185-230.
- Tan, J.J. y Ren, D. 2009. Mesozoic Archostematan Fauna from China. China Press, 347p. Beijing
- Tasch, P. 1969. Branchiopoda. En: Moore, R.C. (ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology*, Geological Society of America and University of Kansas, Part R., Arthropoda, Capítulo 4: 128-191, Boulder.
- Tasch, P. 1987. Fossil Conchostraca of the Southern Hemisphere and Continental Drift. Paleontology, Biostratigraphy and Dispersal. Geological Society of America, *Memoir* 165, 290 p., Boulder.
- The Robertson Group plc. 1989. Reporte N° RLS/368 Geochemical

- analysis of Well Samples and Oils from Four Wells in the Magallanes Basin, Chile. ENAP (inédito), 190 p., Llandudno.
- The Robertson Group plc. 1990. Reporte N° 6715/lc: Organic Geochemistry, including Oil-Source Rock Correlation, in the Calafate PK-1. Magellan Basin, Chile. ENAP (inédito), 45 p., Llandudno.
- The Robertson Group plc. 1991. Reporte N° 6910/lc: A Petroleum Geochemical Evaluation of Three Core Samples from the Interval 3847m to 3856m in the Gaviota Norte-6 Well, and Four Oils from Gaviota Norte-7, Chile. ENAP (inédito), 45 p., Llandudno.
- Thomas, C.R. 1949. Geology and petroleum exploration in Magallanes Province, Chile. AAPG Bulletin 33: 1553-1578.
- Uliana, M.A., Legarreta, L., Laffitte, G. A. y Villar, H.J. 2014. Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas petrolíferas de Argentina. 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Simposio de Recursos No Convencionales: 3-92, Mendoza. (Trabajo original publicado en 1999).
- Urien, Hogg & Asociados & Geochemical Solutions International. 2003. Estudio geoquímico de la Cuenca de Magallanes. ENAP (inédito), Archivo Técnico, 71 p.
- Villar, H.J. 2000. Geochemical report. Source Rock Evaluation SJ.SC. ELAn.x-1 Well, Estancia La Angelina, CA-4 (M) Moy Aike Blok. Austral Basin. Chevron San Jorge (inédito), 142 p., Vicente López.
- Villar, H.J. 2004. Informe Geoquímico. Evaluación de Roca Madre de Hidrocarburos en Muestras de Cutting de los Pozos MGI3 x-1 Murex y GOC5 x-1 Glossus, y en Muestras de Testigo Corona de los Pozos GIA5 x-1 Nerita, MGA9 x-1 Cypraea, MLD4 x-1 Yvania, MFH9 x-1B Conus y GGH6 x-1 Turcica. Cuenca Austral. Sipe-trol (inédito), 13 p. Vicente López.
- Villar, H.J. 2005. Informe Geoquímico. Evaluación de Extracto Orgánico de un Testigo de Corona en el Pozo AM-616-h, Cuenca Austral. Sipe-trol (inédito), 7 p., Vicente López.
- Villar, H. J. 2019. Reporte Geoquímico: 1) Caracterización de Tres Petróleos Crudos Provenientes de los Pozos Catalina-45, Calafate Este-3 y Yacimiento Gorrión. 2) Revisión de Información de la Formación Tobífera como Roca Madre en el Graben Calafate, Tierra del Fuego, Cuenca Magallanes, Chile. Geopark (inédito), 58 p., Florida.
- Viviers, M. 1973. Estudio Paleontológico de un Testigo del Pozo YPF. TF.EM.x-1 (El Monte-Tierra del Fuego). YPF (inédito), 15 p.
- Wang, S. y Liu, S.W. 1980. Fossil conchostracans. En: Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (ed.), Mesozoic Stratigraphy and Palaeontology of ShanKanNing Basin. Geological Publishing House: 84-186, Beijing.