

# LOS CINCO SISTEMAS PETROLEROS COEXISTENTES EN EL SECTOR SUDESTE DE LA CUENCA NEUQUINA: DEFINICIÓN GEOQUÍMICA Y COMPARACIÓN A LO LARGO DE UNA TRANSECTA DE 150 KM

Héctor. J. Villar<sup>1\*</sup>, Leonardo Legarreta<sup>2</sup>, Carlos E. Cruz<sup>3</sup>, Guillermo A. Laffitte<sup>4</sup>, Gustavo Vergani<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>FCEyN - Dep. Cs.Geol., UBA-Conicet, Bs.As.; <sup>2</sup>Patagonia Exploración, Bs.As.; <sup>3</sup>Pluspetrol, Bs. As.; <sup>4</sup>M&P System, Bs.As.; <sup>5</sup>Repsol YPF, Bs.As.

<sup>1</sup> lqvillar@fibertel.com.ar

<sup>2</sup> leolegarreta@paexsa.com.ar

<sup>3</sup> ccruz@pluspetrol.com.ar

<sup>4</sup> mpsystem@fibertel.com.ar

<sup>5</sup> gverganif@repsolypf.com

**Palabras clave:** Neuquén, Sistemas Petroleros, Geoquímica

**Abstract.** *The Five Coexisting Petroleum Systems in the Southeast Area of the Neuquén Basin: Geochemical Definition and Comparison through a 150-km Transect*

This paper deals with the geochemical appraisal of five productive petroleum systems of the southeastern portion of the Neuquén Basin, with the distinctiveness that they have been recognized to partially coexist in a restricted geographical area represented along a 150 km extension transect. The identification of the stratigraphic and areal distribution of source rocks and their thermal maturity trends, together with the associated hydrocarbon accumulations, stands for a multifaceted task, in which petroleum geochemistry strengthens its key role as an exploration tool.

The South Huincul and Huincul High areas represent a challenge for understanding the distributions of different oils sourced either from the low-mature, sulfur-rich, highly-anoxic Vaca Muerta facies or from the moderate-mature, lower-quality type II/III Los Molles shales. A comparable but overall more mature Los Molles facies developed towards the basin center has also fed reservoirs in areas where the typical platform to basinal Vaca Muerta source facies appears to have acted as the principal charge system. In addition, both Los Molles and Vaca Muerta intervals contributed to accumulations in zones where non marine oils sourced from the lacustrine fresh-water Pre-Cuyo and lacustrine saline Pre-Cuyo source rocks, locally accumulated within individual deep half-grabens.

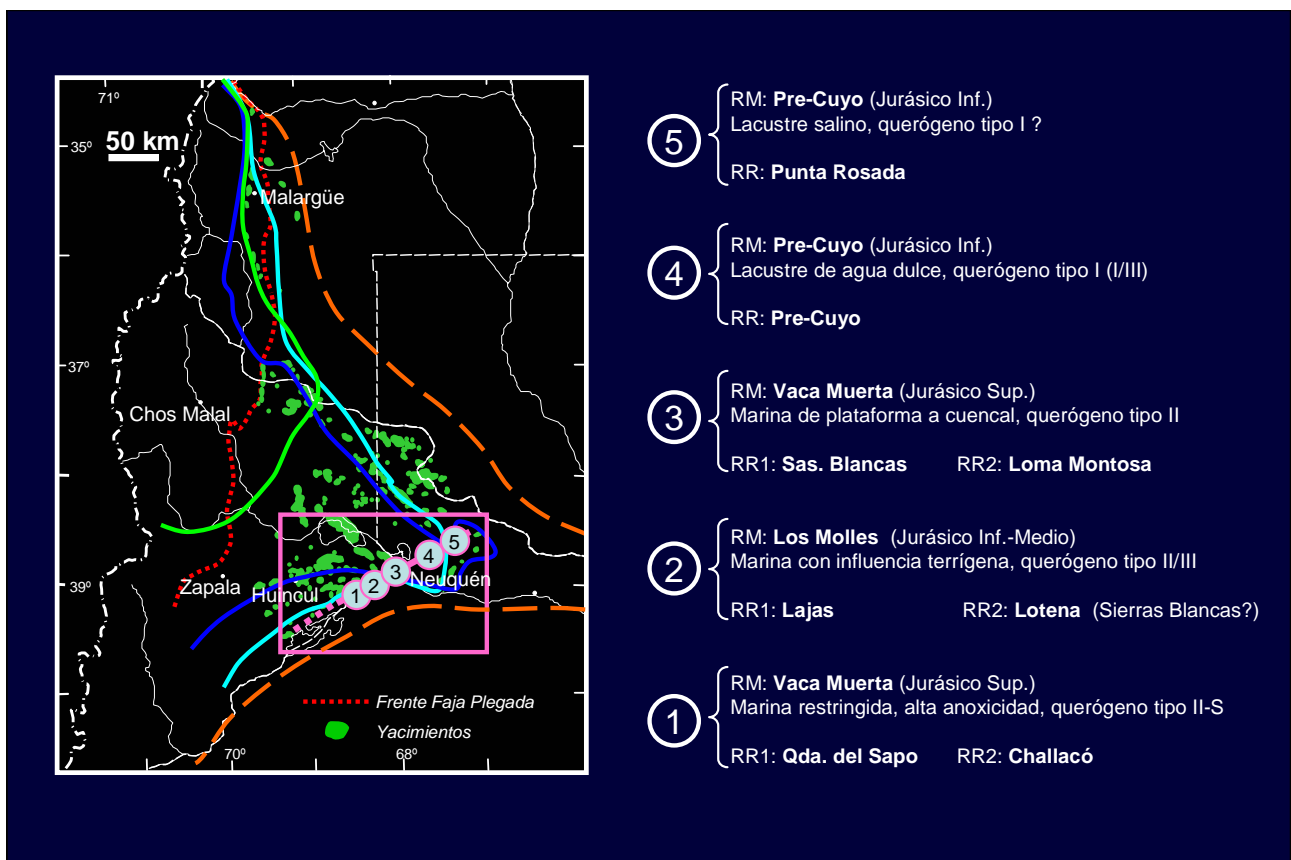
Estimated oil volumetrics of the area assign a EUR of 591.9 MMBO to the Vaca Muerta-Sierras Blancas (!) petroleum system, whereas the South Dorsal system of Vaca Muerta-Quebrada del Sapo (!) and the Los Molles *plus* Pre-Cuyo (various reservoirs) systems contribute with EURs of 125.2 MMBO and 161.1 MMBO, respectively. Gas accumulations in the area achieve a EUR of 17,948.7 BCFG, indiscriminately assigned to the Vaca Muerta and Los Molles charge systems of the North Flank of the Huincul High and Basin Center.

## INTRODUCCIÓN

La Cuenca Neuquina constituye la cuenca hidrocarburífera más prolífica de Argentina con una producción diaria de alrededor de 360 MBO y 2.6 BCFG. Considerable actividad exploratoria efectuada en los últimos años por numerosas compañías de petróleo ha llevado a incrementar el conocimiento de las complejas características de los sistemas petroleros de la cuenca, incluyendo su extensión, productividad y eficiencia para la efectiva acumulación de hidrocarburos.

Este trabajo se concentra en la evaluación geoquímica de cinco sistemas petroleros productivos en la porción sudeste de la cuenca, cuya particularidad es que han sido reconocidos como parcialmente coexistentes en un área geográfica restringida, representada a lo largo de una transecta de 150 km de extensión (Fig. 1). El estudio pone énfasis en la identificación y distribución areal de rocas generadoras y sus patrones de madurez, y en el reconocimiento de las familias de hidrocarburos asociadas. Sobre esta base, se define la identidad y extensión de los sistemas petroleros y se discute su contribución a los variados tipos de acumulaciones del área.

Los sistemas petroleros considerados se refieren a tres subsistemas generadores con rocas madre marinas y a dos subsistemas generadores con rocas madre no marinas (lacustres). Las áreas Sur de la Dorsal y de Dorsal de Huincul (1 y 2 en la Fig.1) representan un desafío para entender la distribución de diferentes petróleos originados ya sea a partir de facies generadoras marinas altamente anóxicas de Vaca Muerta, conteniendo querógenos de tipo II ricos en azufre y madurez térmica limitada, o de lutitas de Los Molles conteniendo querógenos II/III y madurez térmica moderada. Una facies de Los Molles comparable pero de manera general más madura desarrollada hacia el centro de la cuenca también alimentó reservorios en áreas donde la típica facies de plataforma a cuencal de Vaca Muerta (3 en la Fig. 1) posiblemente haya actuado como el principal sistema de carga. Adicionalmente, tanto los intervalos de Los Molles como de Vaca Muerta contribuyeron a acumulaciones en zonas en las que también se acumularon petróleos no marinos vinculados a generación en rocas madre lacustres de agua dulce (4 en la Fig. 1) y de agua salada (5 en la Fig. 1) del Pre-Cuyo, localmente depositadas en hemigrábenes individuales y profundos.



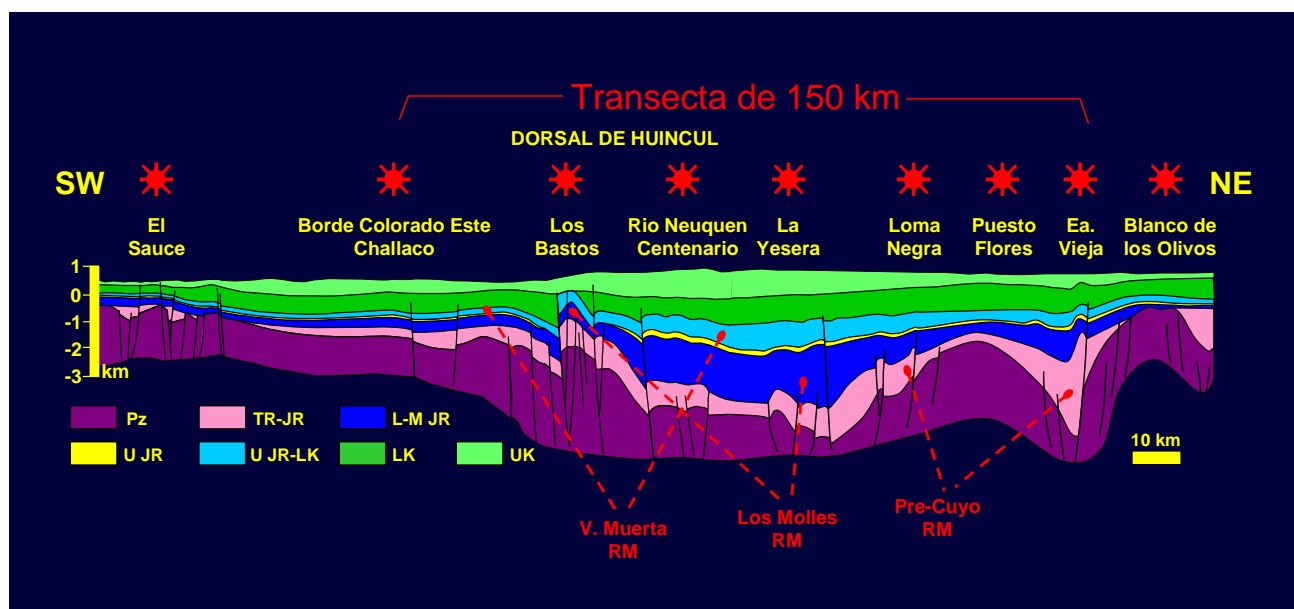
**Figura 1.** Área de estudio (rectángulo violáceo) en el sector sudeste de la Cuenca Neuquina y localizaciones clave para la evaluación de cinco sistemas petroleros a lo largo de una transecta de 150 km. Las tres curvas celeste, azul y verde representan la distribución de facies generadoras de las tres rocas madre principales (Vaca Muerta, Los Molles y Agrio, respectivamente), a nivel de cuenca. A la derecha, las rocas madre (RM) involucradas en el área de estudio y los principales reservorios (RR) asociados.

El área evaluada es posiblemente la más madura desde el punto de vista exploratorio, habiendo ocurrido en ella el primer hallazgo de petróleo de la cuenca en el año 1923. Sin embargo, se reportan continuamente descubrimientos de nuevas acumulaciones, vinculadas a varias secciones de roca madre activas, múltiples reservorios, gran variedad de trampas estratigráficas, estructurales y combinadas, con producción distribuida desde el basamento al Cretácico Superior. La complejidad de los sistemas petroleros del área está asociada a la presencia de la Zona de Fallamiento de Huincul (“Dorsal de Huincul”) interpretada como una falla de rumbo dextral, a lo largo de la cual hubo una fuerte inversión tectónica. Este elemento estructural estuvo

activo desde el comienzo de la historia de la cuenca hasta el Cretácico Superior y esa misma actividad tectónica sinsedimentaria es responsable por la variedad de trampas.

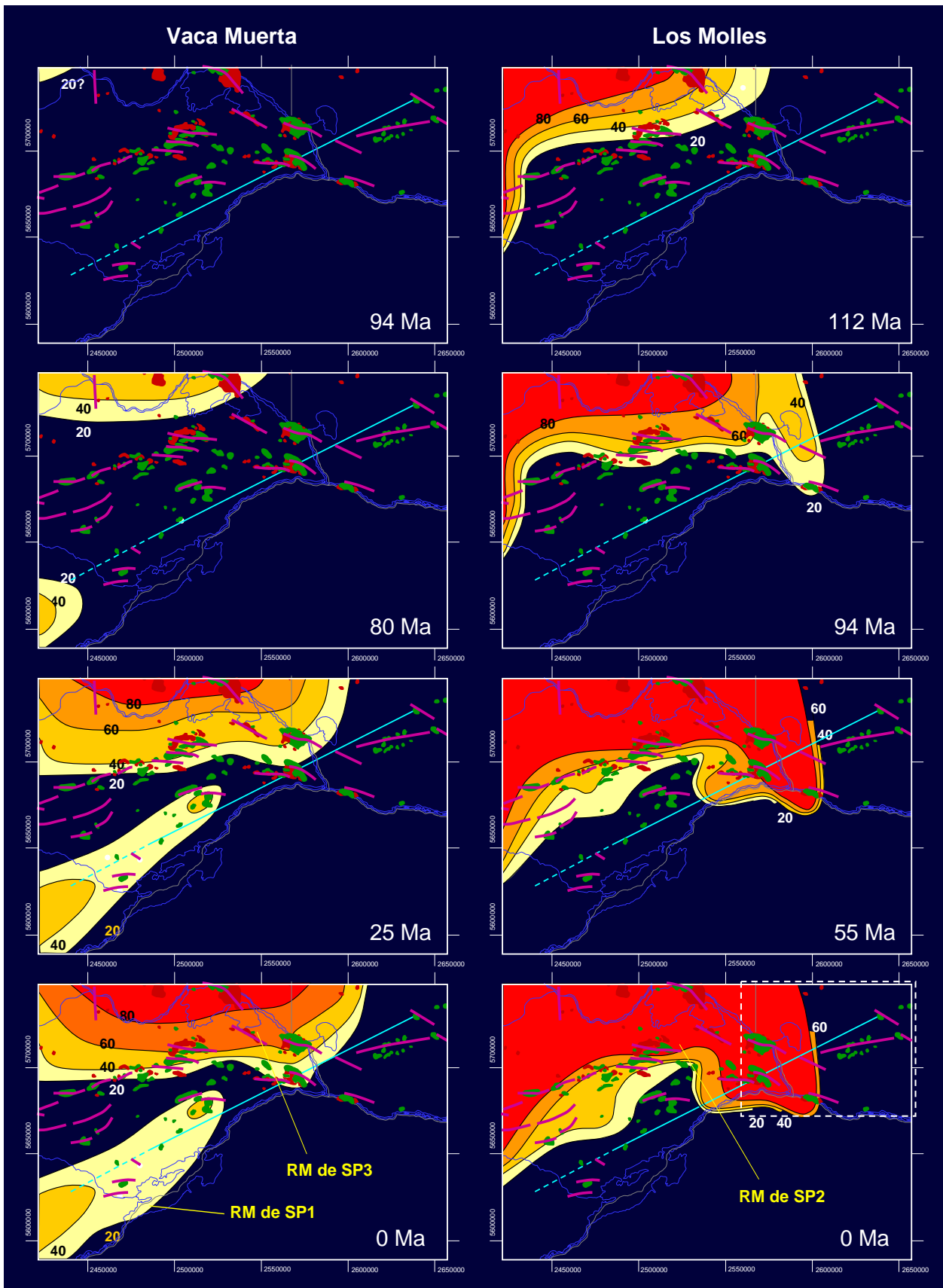
La literatura sobre investigaciones geoquímicas del área de estudio es abundante. Los sistemas petroleros de la Dorsal de Huincul y de la zona Sur de la Dorsal han sido documentados en los trabajos de Cruz *et al.* (1999 y 2002), con extensión también hacia la región del Engolfamiento Neuquino en el último de ellos. Los trabajos de Pando *et al.* (1984) y de Vela (1997) presentan información específica de la roca madre Los Molles, particularmente en zona de la Dorsal de Huincul, mientras que los de Villar *et al.* (1993 y 1994) y de Veiga *et al.* (2001a,b,c y 2002) enfocan sobre los patrones de los sistemas petroleros en la zona sur del Engolfamiento y en el ámbito occidental de la Dorsal de Huincul. Las características geoquímicas de los sistemas generadores lacustres Pre-Cuyanos fueron descritas por Uliana *et al.* (1999) y Legarreta *et al.* (1999), además de información detallada y específica sobre la geoquímica de petróleos asociados al depocentro Estancia Vieja presentada por Zumberge (1993). Trabajos integrados de los sistemas petroleros de la cuenca que sirvieron de apoyo a este estudio son los de Uliana y Legarreta (1993), Wavrek *et al.* (1994), Urien y Zambrano (1994), Legarreta *et al.* (2003, 2004) y Legarreta *et al.* (2005, este congreso).

El trabajo está organizado como un recorrido a lo largo de la transecta de 150 km de la Fig. 1, desde el SW al NE, comenzando en el ámbito de Sur de la Dorsal, atravesando la Dorsal de Huincul, moviéndose hacia la cuenca profunda para finalmente alcanzar los hemigrábenes del Pre-Cuyo, en dirección a la plataforma NE. Los distintos ámbitos atravesados se esquematizan en el corte de la Fig. 2, en el cual también se destacan algunas localidades clave de referencia. Sobre esta base, el trabajo tiene como objetivo destacar las características geoquímicas principales y la extensión geográfica de los cinco sistemas petroleros productivos reconocidos.



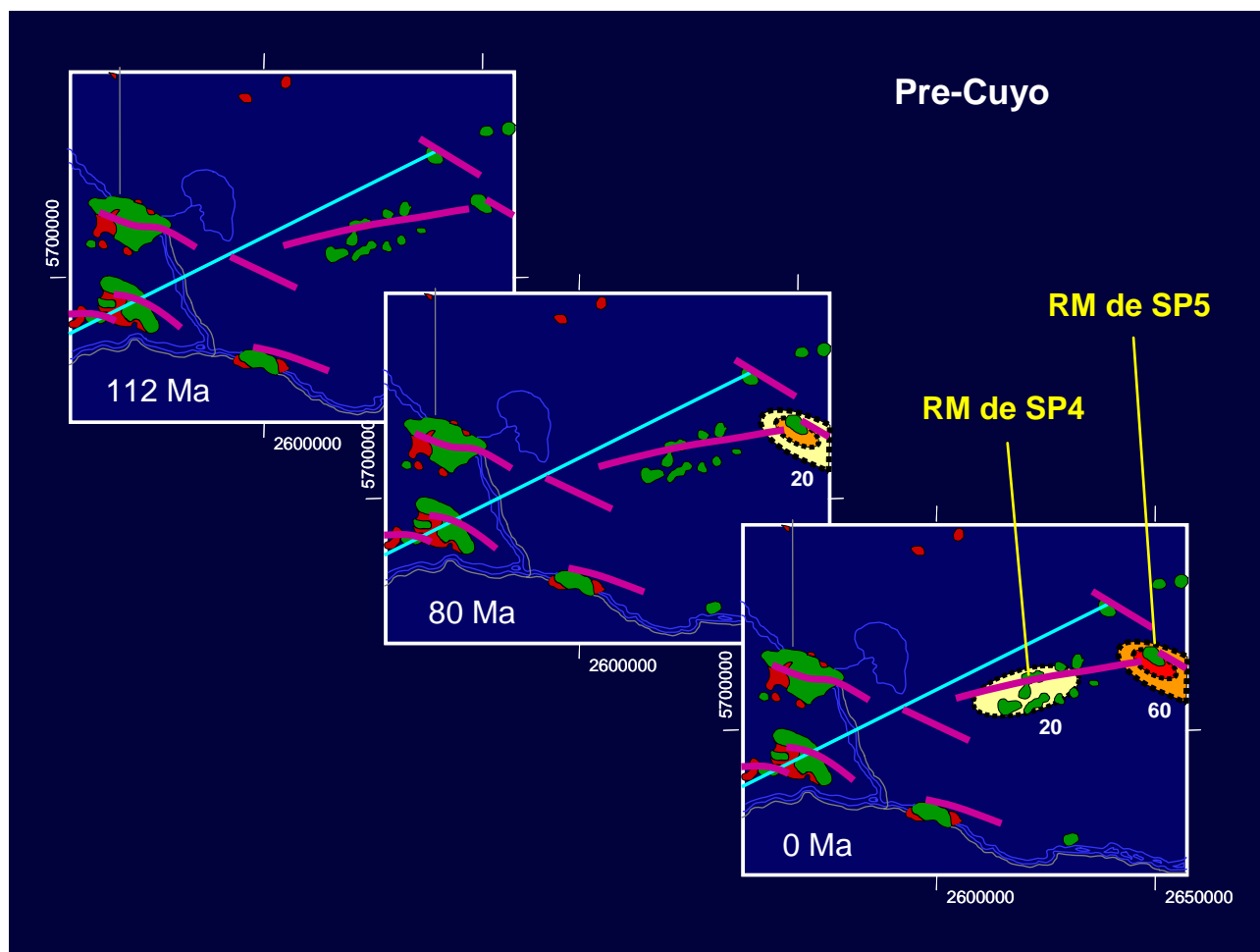
**Figura 2.** Ámbitos y localidades clave a lo largo de la transecta guía de este estudio (ver Fig. 1). Se identifica también la distribución de las rocas madre (RM) involucradas en los sistemas petroleros.

A modo de introducción, las Figs. 3 y 4 presentan los sectores de desarrollo de los subsistemas generadores que han originado las acumulaciones de hidrocarburos del área de estudio, y su ubicación respecto de la transecta. En la columna izquierda de la Fig. 3 se muestran los estadios de evolución de la cocina de Vaca Muerta, obtenidos a partir de modelados térmico-cinéticos 1D en posiciones clave, a los 94 millones de años (Ma), 80 Ma, 25 Ma y al presente, desarrollándose desde el centro oeste de la cuenca y expandiéndose en el tiempo hasta cubrir una porción significativa del sector norte del área de estudio, además del desarrollo independiente de una cocina generadora en la zona Sur de la Dorsal. El estadio actual y extensión geográfica de ambas cocinas es útil para anticipar la ubicación relativa de dos de los sistemas petroleros involucrados en este estudio, informalmente llamados SP1 para el asociado a Vaca Muerta como roca generadora en el área de Sur de la Dorsal, y SP3 para el asociado a Vaca Muerta en el Flanco Norte de la Dorsal de Huincul.



**Figura 3.** Evolución de la tasa de transformación porcentual (20, 40, 60, 80) del querógeno, representando en el tiempo el desarrollo de las cocinas de las rocas madre (RM) Vaca Muerta (columna izquierda) y Los Molles (columna derecha), asociadas a los sistemas petroleros SP1-SP3 y SP2, respectivamente. El recuadro en línea punteada blanca en el diagrama de “Los Molles, 0 Ma” remite al área detallada en la Fig. 4.

De manera análoga, la aproximación para la roca madre Los Molles se representa en la columna derecha de la Fig. 3, para tiempos de 112 Ma, 94 Ma, 55 Ma y presente, observándose la más temprana y esperable evolución de la cocina en la porción centro oeste, impactando ya el área de estudio en 112 Ma y expandiéndose con el tiempo, hasta que la mayor parte hacia el norte de la transecta incluye secciones de roca madre con niveles medios a altos de madurez térmica y conversión a hidrocarburos. El diagrama permite anticipar la existencia del sistema petrolero denominado SP2, con roca generadora Los Molles, existente en el ámbito de la Dorsal de Huincul y en su Flanco Norte hacia centro de cuenca. Finalmente, la Fig. 4 representa los estadios evolutivos de las cocinas de roca madre lacustre en los hemigrábenes de Loma Negra y Estancia Vieja, con desarrollo nulo en 112 Ma, desarrollo incipiente en 80 Ma para el depocentro Estancia Vieja, y desarrollo moderado para Loma Negra y avanzado para Estancia Vieja, a tiempo presente. Ambas cocinas quedan vinculadas a los sistemas petroleros SP4 y SP5, respectivamente.



**Figura 4.** Evolución de la tasa de transformación porcentual (20, 40, 60, 80) del querógeno, representando en el tiempo el desarrollo de las cocinas de las rocas madre (RM) lacustres de depocentros Precuycanos (ver posición relativa en el diagrama “Los Molles, 0 Ma” de la Fig. 3), asociadas a los sistemas petroleros SP4 y SP5.

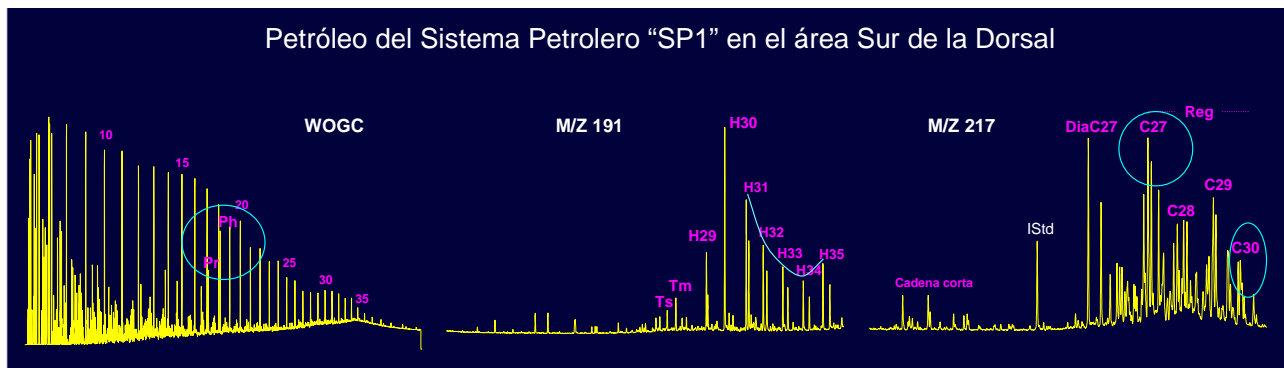
#### SISTEMA PETROLERO DEL ÁREA SUR DE LA DORSAL

El sistema petrolero, denominado SP1 en este estudio, está característicamente limitado a la porción sur del área de estudio. Involucra a petróleos originados en secciones de Vaca Muerta y alojados predominantemente en el reservorio Quebrada del Sapo (depósitos fluviales y eólicos del Jurásico Superior) luego de migración vertical desde la roca madre suprayacente. Un reservorio secundario del área está constituido por la F. Challacó. La Fig. 5 ilustra la configuración roca madre-reservorio para las localidades típicas de Borde Colorado - Borde Colorado Este y Aguada Quinchao. Las trampas son del tipo de pliegues de la cobertura sedimentaria asociados con bloques rotados por fallas extensionales.



decenas de metros, en comparación con otras localidades de la cuenca. Aunque la historia de enterramiento involucró una columna poco espesa del orden de 1000 m a 1600 m, el flujo térmico comparativamente alto y la generación temprana de la roca madre (cinética II-S) favorecieron la generación de hidrocarburos.

Los petróleos asociados están bien preservados, son medio-pesados a intermedios (API~22-30°), ricos en azufre y viscosos, presentan una marca composicional y molecular (Fig. 7) consistente con su origen en querógeno II-S de ambiente anóxico estricto, y madurez térmica baja a media. La existencia de hidrocarburos gaseosos es exigua con un GOR cercano a cero, lo cual está en línea con el bajo grado de maduración térmica de la roca madre.



**Figura 7.** Cromatograma de petróleo entero (WOGC) y cromatogramas de masa para terpanos (M/Z 191) y esteranos (M/Z 217) representativos de petróleos originados en la facies euxínica de Vaca Muerta en el área Sur de la Dorsal, pertenecientes al sistema petrolero SP1. En celeste se destacan algunos elementos cromatográficos y de biomarcadores característicos.

## SISTEMAS PETROLEROS DEL ÁREA DORSAL DE HUINCUL Y DE SU FLANCO NORTE

Los sistemas petroleros del Área Dorsal de Huincul y de su Flanco Norte involucran a los rotulados como SP2 y SP3, con sus respectivas rocas generadoras Los Molles y Vaca Muerta (Fig. 3). Estos sistemas son los de mayor distribución geográfica en el área de estudio y presentan considerable solapamiento geográfico. Se los describe separadamente para el área de Dorsal propiamente dicha y para su Flanco Norte hacia centro de cuenca.

### SP2 y SP3 en el Área de la Dorsal de Huincul

El hábitat de los hidrocarburos de esta zona se ilustra en los cortes de la Fig. 8 para las localidades Aguada Baguales y Punta Senillosa - Las Chivas.

Los hidrocarburos están fundamentalmente acumulados en el reservorio Lajas (marino somero), con trampas que involucran fallas compresionales a lo largo de la zona de fallamiento de la Dorsal, además de participación de algún componente estratigráfico relacionado con el truncamiento del reservorio Lajas. Como rocas reservorio de menor importancia pueden actuar las Formaciones Punta Rosada (fluvial), Lotena (marino somero), conglomerados y areniscas del denominado Mb. Cutralcó de la Fm Los Molles y rocas volcánicas del Pre-Cuyo. La migración de hidrocarburos originados en Los Molles se considera dominada por un patrón vertical; aquellos de filiación en Vaca Muerta obedecen a un transporte con componente lateral significativo desde posiciones efectivamente generadoras orientadas hacia el norte (centro de cuenca).

El querógeno de la roca madre Los Molles es mixto, marino-terrestre, categorizable como tipo II/III a III depositado en ambientes subóxicos a moderadamente reductores, con un sesgo gasífero importante (Fig. 9). De manera general, la parte inferior de la unidad muestra rasgos más prolíficos para petróleo, mientras que la parte superior presenta características para generar predominantemente gas.

El querógeno de Vaca Muerta responde a un tipo II rico, petrolífero, involucrando fuerte componente marino algal, contribución continental mínima a nula, y condiciones anóxicas de depositación. En comparación con la facies orgánica anóxica restringida perteneciente al sistema SP1 de Sur de la Dorsal y la facies orgánica carbonática del distrito de Malargüe en el noreste de la Cuenca, esta facies orgánica de SP3 es largamente la de mayor distribución en la cuenca, incluyendo variaciones de subfacies entre cuencal (más arcillosa) y de plataforma (más carbonática).

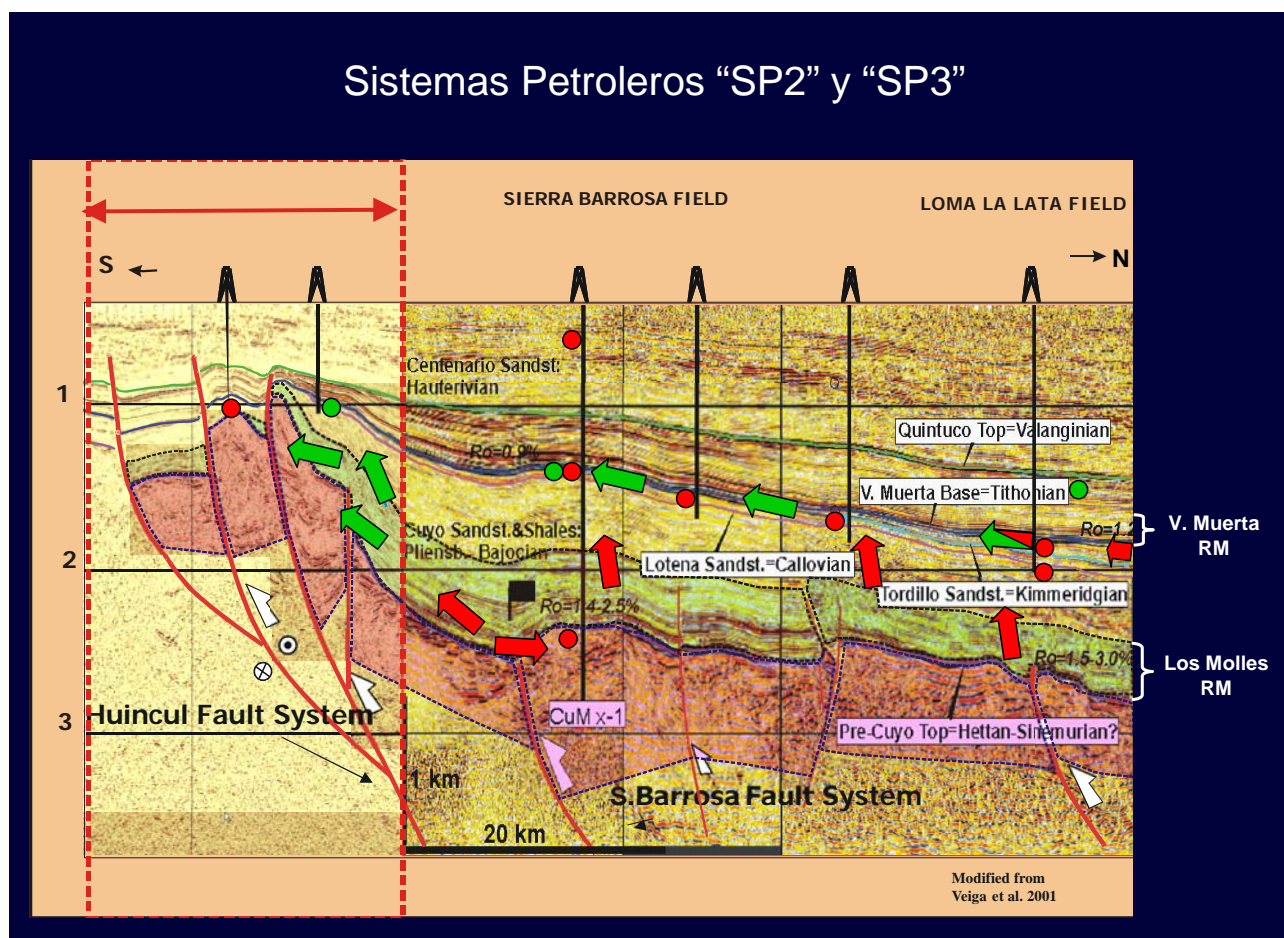




Sobre la Dorsal de Huincul, las pelitas generadoras de Los Molles alcanzaron mayormente la fase de generación de petróleo. Sin embargo, con una visión más estricta, es posible identificar variaciones significativas de madurez térmica debido a la presencia de altos y depocentros alternantes que ayudan a explicar el amplio espectro de tipos de hidrocarburos. En cuanto a las pelitas de Vaca Muerta, las mismas están térmicamente inmaduras a marginalmente maduras para generación substancial de cualquier tipo de hidrocarburos.

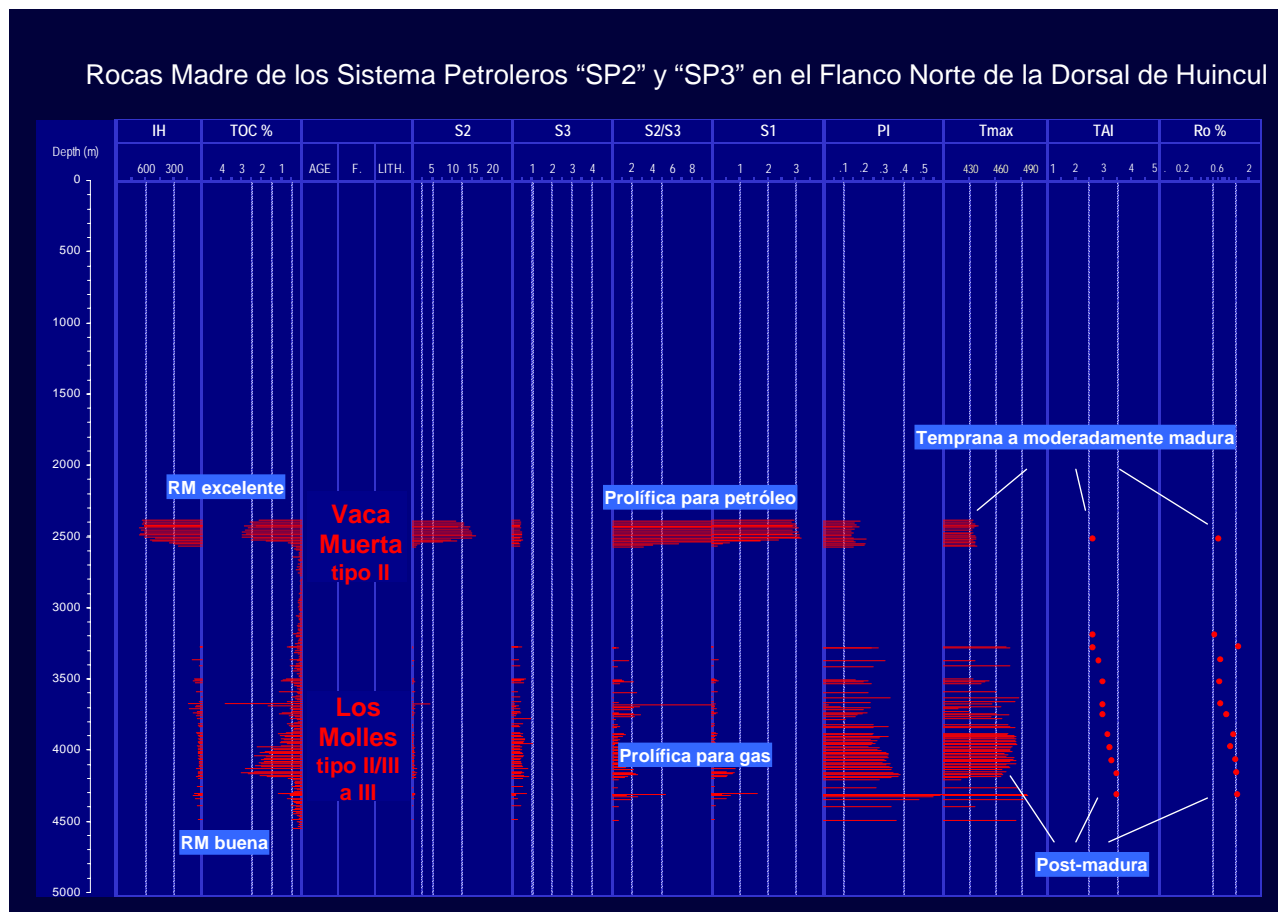
### SP2 y SP3 en el Flanco Norte de la Dorsal de Huincul a Centro de Cuenca

El corte de la Fig. 10 esquematiza la continuidad de los sistemas de carga de Los Molles y Vaca Muerta desde el ámbito de Dorsal hacia su Flanco Norte y extensión hacia posiciones profundas de la cuenca. Las unidades de reservorio son múltiples, destacándose los marino someros de Lajas y Lotena, los fluviales/eólicos de Tordillo-Sierras Blancas, los carbonatos de Quintuco-Loma Montosa y, en menor medida, las rocas volcánicas del Pre-Cuyo, y los depósitos marino someros de Centenario. Las trampas son predominantemente anticlinales relacionados a inversión tectónica. El patrón característico es de migración lateral de moderada a larga distancia para los hidrocarburos originados en Vaca Muerta a través del eficiente *carrier* Sierras Blancas, en contraposición a la migración predominantemente vertical a través de fallas para los hidrocarburos originados en Los Molles.



**Figura 10.** Sistemas petroleros SP2 y SP3, extendiéndose desde la Dorsal de Huincul (Fig. 8) hacia posiciones profundas de la cuenca. (corte esquemático adaptado de Mosquera *et al.*, 2004, y éste de Veiga *et al.*, 2001c) Los sistemas de carga Los Molles y Vaca Muerta, cubriendo un amplio rango de madurez térmica, alimentan numerosos reservorios con hidrocarburos líquidos y gaseosos. Las flechas verdes y rojas simbolizan migración de petróleo y de gas, respectivamente; los círculos verdes y rojos, acumulaciones de petróleo y de gas, respectivamente.

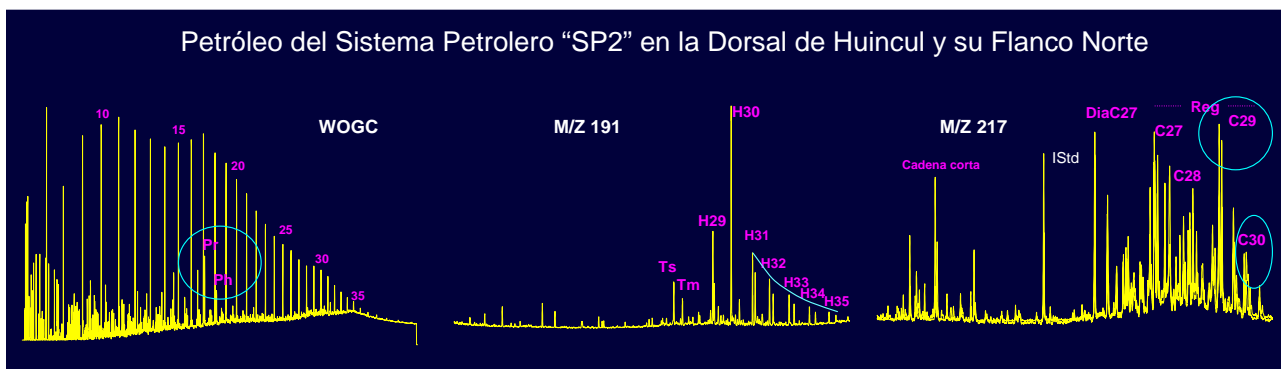
Las características geoquímicas primarias de los sistemas de carga de Los Molles y Vaca Muerta (Fig. 11) son comparables a los descriptos para la zona de la Dorsal de Huincul (Fig. 9). La gran diferencia está dada por los grados de madurez térmica que alcanzaron las rocas madre, ya que Vaca Muerta puede encontrarse en madurez temprana a media, o inclusive en madurez tardía en las posiciones más profundas, mientras que Los Molles está típicamente sobremadura (Fig. 11). Por otro lado, los espesores de los intervalos generadores pueden variar significativamente con una fuerte tendencia de incremento hacia centro de cuenca. En particular, se han documentado espesores generadores de Los Molles de unas pocas decenas de metros sobre la Dorsal y de varios cientos de metros en posiciones profundas de cuenca.



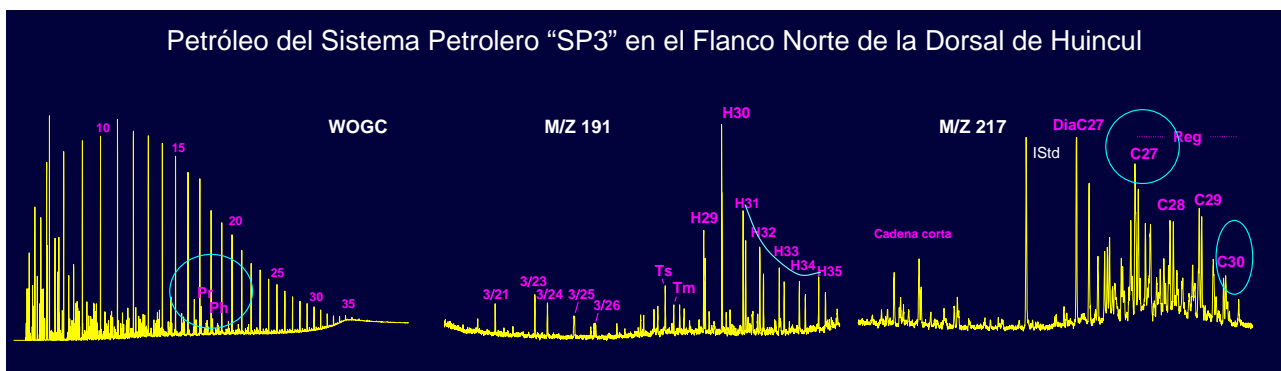
**Figura 11.** Log geoquímico característico de las rocas madre Los Molles y Vaca Muerta en el Flanco Norte de la Dorsal de Huincul a Centro de Cuenca (sistemas petroleros SP2 y SP3).

Las acumulaciones de hidrocarburos líquidos vinculables a Los Molles están principalmente concentradas en los reservorios Lajas (+Lotena y Pre-Cuyo) en posiciones de, o próximas a, la Dorsal de Huincul, luego de migración corta a moderada, controlada por las pobres propiedades petrofísicas de los niveles *carrier* de Lajas. Los sistemas de falla relacionados con el rasgo estructural de la Dorsal de Huincul ayudaron a cargar los reservorios con una tendencia más o menos continua de hidrocarburos livianos a más pesados, desde el centro de cuenca hacia las estructuras de la Dorsal. Estos hidrocarburos líquidos (Fig. 12) cubren un rango de densidades API de 35-60° (intermedios a muy livianos), mostrando una signatura de origen marino con contribución variable y moderada de materia orgánica terrestre en su roca madre, depositada en ambiente suavemente reductor a subóxico. No existen rasgos de biodegradación de petróleos en los yacimientos conocidos. Con referencia a las acumulaciones de hidrocarburos gaseosos, enormes cantidades se habrían generado en posiciones cuencales profundas, en las cuales los escasos pozos perforados han documentado contenidos orgánicos residuales muy altos (COT: 2-6%) en rocas sobremaduras (Ro~1.5-3%). Se asume que estos gases podrían haber migrado hacia posiciones cercanas a la Dorsal de Huincul. De hecho, una publicación reciente de Cruz *et al.* (2002) considera inclusive que al menos parte del gas acumulado en el gigante Loma La Lata (reservorio Sierras Blancas) podría haber derivado de un origen en Los Molles.

Los petróleos acumulados en el área de la Dorsal de Huincul y su Flanco Norte con origen en Vaca Muerta (SP3) están bien preservados, son nafteno-parafínicos a parafínicos, intermedio-livianos (API~30-40°), con contenido en azufre bajo a moderado, registrando las variaciones organofaciales de su roca madre (signatura marino-anóxica, desde típicamente lutítica a rica en carbonato). Su impronta isotópica es característicamente menos negativa ( $\delta^{13}\text{C}$  de saturados ~ -27 a -30 ‰) que la registrada en los petróleos de Los Molles ( $\delta^{13}\text{C}$  de saturados ~ -30 a -32 ‰) del sistema SP2, lo cual provee un elemento diagnóstico diferenciador a nivel composicional. Al igual que los petróleos de Los Molles, los petróleos de Vaca Muerta en el área cubren un



**Figura 12.** Cromatograma de petróleo entero (WOGC) y cromatogramas de masa para terpanos (M/Z 191) y esteranos (M/Z 217) representativos de petróleos originados en la facies de Los Molles existente en el área de la Dorsal de Huincul y Flanco Norte, pertenecientes al sistema petrolero SP2. En celeste se destacan algunos elementos cromatográficos y de biomarcadores característicos.



**Figura 13.** Cromatograma de petróleo entero (WOGC) y cromatogramas de masa para terpanos (M/Z 191) y esteranos (M/Z 217) representativos de petróleos originados en la facies de plataforma a “cuenca” de Vaca Muerta en el Flanco Norte de la Dorsal de Huincul, pertenecientes al sistema petrolero SP3. En celeste se destacan algunos elementos cromatográficos y de biomarcadores característicos.

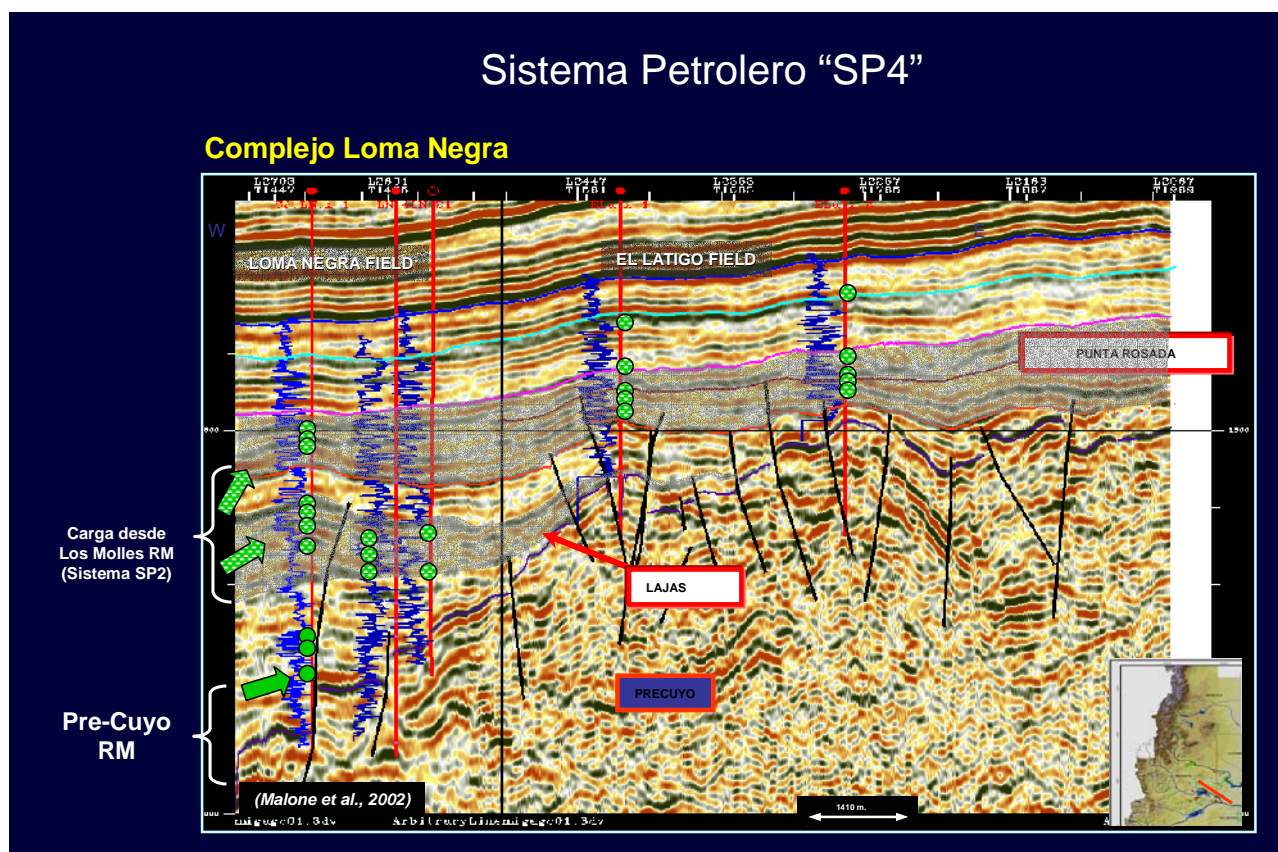
espectro completo de madurez de generación, vinculado a la tendencia de maduración de la roca madre impuesta por la profundidad de soterramiento creciente hacia la cuenca. Ello implica cargas variables desde porciones distales a proximales de la cocina, movilizadas en dirección a la trampa a través del *carrier* Sierras Blancas. En efecto, se ha documentado, tanto en el área de estudio de este trabajo como en la Plataforma Noreste, la existencia de petróleos de alta madurez que implican, según los casos, distancias de migración de entre 50 a 100 km desde posiciones de cocina. En este marco, es lícito considerar también una importante movilización de condensado y gas, vía migración lateral de larga distancia. El reconocimiento de la filiación de estos hidrocarburos livianos, especialmente gaseosos, en el sentido de discriminar su origen en Vaca Muerta versus su origen en Los Molles no siempre es posible con alto grado de confiabilidad a partir de

información geoquímica exclusivamente, en particular si no se cuenta con abundantes datos isotópicos que puedan definir una tendencia firme, tanto regional como por niveles de reservorio. En ese sentido, el mejor diagnóstico se logra a partir de evidencias convergentes que incluyan evolución de las cocinas y sincronía con la disponibilidad de vías de migración y trampas.

### SISTEMAS PETROLEROS DE LAS ÁREAS LOMA NEGRA Y ESTANCIA VIEJA

Estos sistemas petroleros, con denominaciones informales SP4 y SP5, se limitan a dos hemigrábenes con importante relleno de sedimentos no marinos del Pre-Cuyo, de distinta naturaleza en cuanto a su ambiente de depositación, facies orgánica y, consecuentemente, de los petróleos asociados.

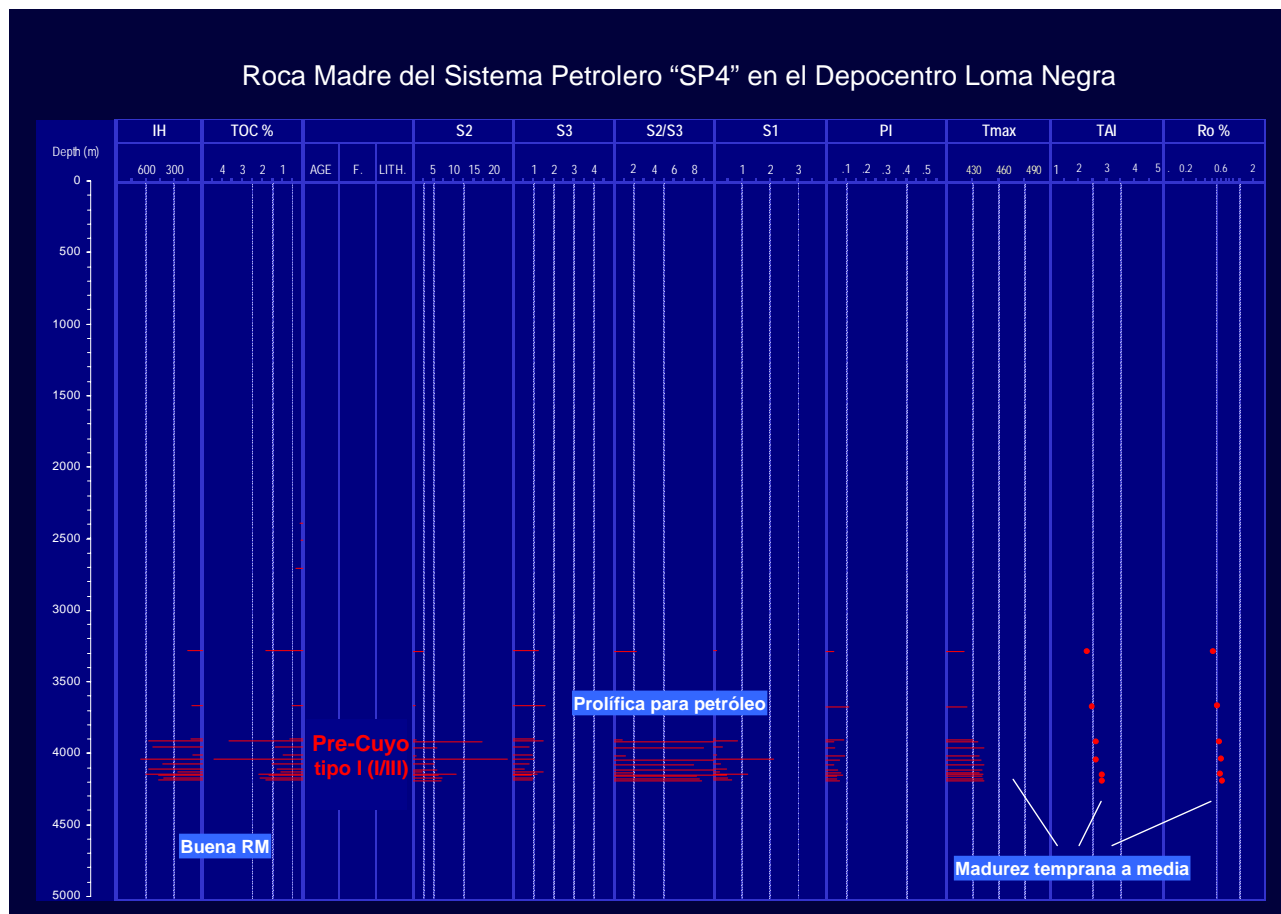
El sistema petrolero SP4, centrado en el área de Loma Negra, involucra petróleos originados en depósitos lacustres de agua dulce a ocasionalmente salobre. Estos hidrocarburos se alojaron mayormente en reservorios de conglomerados y areniscas del mismo Pre-Cuyo (Fig. 14). Los petróleos producidos en el área a partir de los reservorios Lajas y Punta Rosada se reconocen como derivados del sistema Los Molles (SP2) a partir de una posición de cocina próxima. Las trampas del área son de varios tipos, estructurales y combinadas.



**Figura 14.** Sistema petrolero SP4 en localidades típicas del depocentro Loma Negra (corte esquemático adaptado de Malone *et al.*, 2002). Las flechas y círculos verdes sólidos simbolizan migración y acumulación de petróleo a partir de la roca madre Pre-Cuyo; las flechas y círculos verdes trameados representan carga y acumulación a partir de una cocina de Los Molles no visible en el corte, implicando presencia del sistema SP2 en el área.

La roca madre Pre-Cuyo del sistema SP4 (Fig. 15) contiene un querógeno con mezclas variables de materia orgánica acuática rica en algas, frecuentemente reconocidas como de tipo *Botryococcus* (tipo I), dominante en los niveles generadores de alta calidad prolíficos para petróleo, desmejorada en algunos intervalos por presencia de restos de material derivado de plantas superiores (tipo III). Las secciones generadoras de este sistema fueron afectadas por un *stress* térmico bajo a apenas moderado. En este caso, contrariamente a lo documentado para la baja madurez generalizada en el área Sur de la Dorsal (SP1), la relativamente limitada

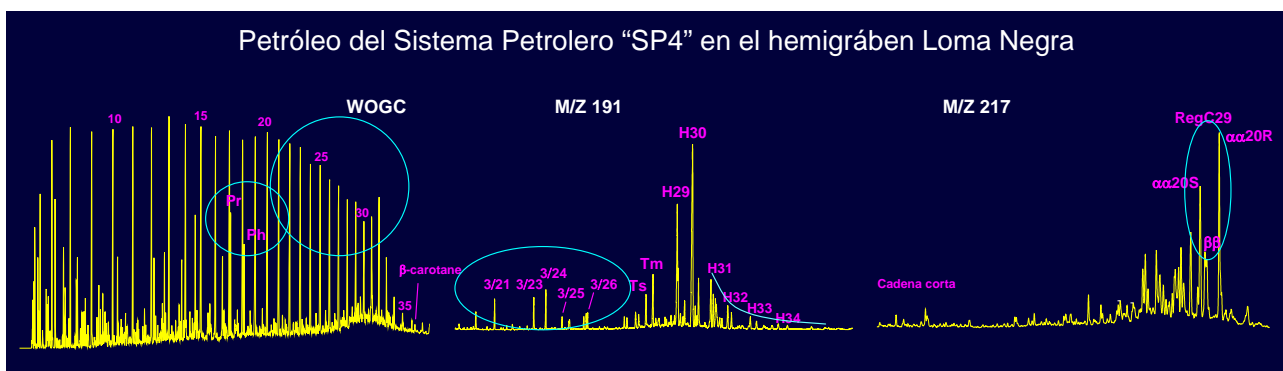
conversión a hidrocarburos (Fig. 4), a pesar del soterramiento considerable de la roca madre (3000-4000 m), está controlada por el bajo flujo térmico del área. Consistentemente, las manifestaciones de gas vinculadas a este sistema son exiguas.



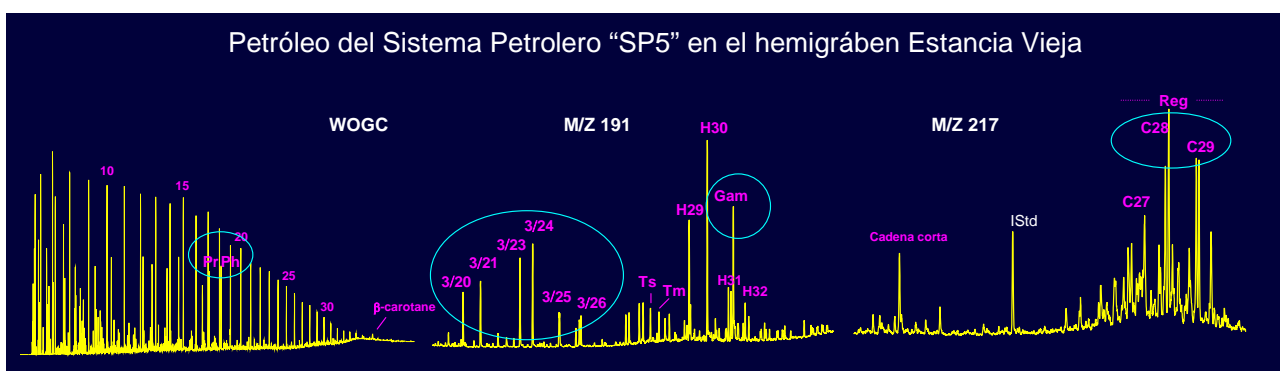
**Figura 15.** Log geoquímico característico de la roca madre lacustre de agua dulce del Pre-Cuyo en el Depocentro Loma Negra (sistema petrolero SP4).

Los petróleos del sistema SP4 (Fig. 16) presentan la característica impronta molecular vinculable a generación en depósitos lacustres. Desde el punto de vista composicional, son altamente parafínicos, con frecuencia enriquecidos en componente ceroso, pobres en azufre y densidades API intermedias de 25-35°, pero altas viscosidades (sin biodegradación). Su impronta isotópica es fuertemente negativa, con valores  $\delta^{13}\text{C}$  de saturados típicamente por debajo de -32‰.

En contraposición, los petróleos del sistema SP5, limitados al área Estancia Vieja (Zumberge, 1993) registran un origen en una facies orgánica que, aunque también no marina, remite a un sistema lacustre de alta salinidad y fuerte participación carbonática, expeditivamente reconocible en las trazas cromatográficas y de biomarcadores (Fig. 17). Sus niveles de maduración térmica son variables, en un amplio espectro que va desde estadios tempranos a tardíos de generación, en línea con el modelado térmico-cinético de su roca madre (Fig. 4). El principal reservorio de estos petróleos está provisto por la F. Punta Rosada, en trampas anticlinales originadas por la inversión tectónica del hemigráben. En el área también se reconocen petróleos pertenecientes al sistema SP3, originados en Vaca Muerta y alojados en el reservorio Sierras Blancas.



**Figura 16.** Cromatograma de petróleo entero (WOGC) y cromatogramas de masa para terpanos (M/Z 191) y esteranos (M/Z 217) representativos de petróleos originados en la facies lacustre de agua dulce de la roca madre del Pre-Cuyo en el área Loma Negra, pertenecientes al sistema petrolero SP4. En celeste se destacan algunos elementos cromatográficos y de biomarcadores característicos.



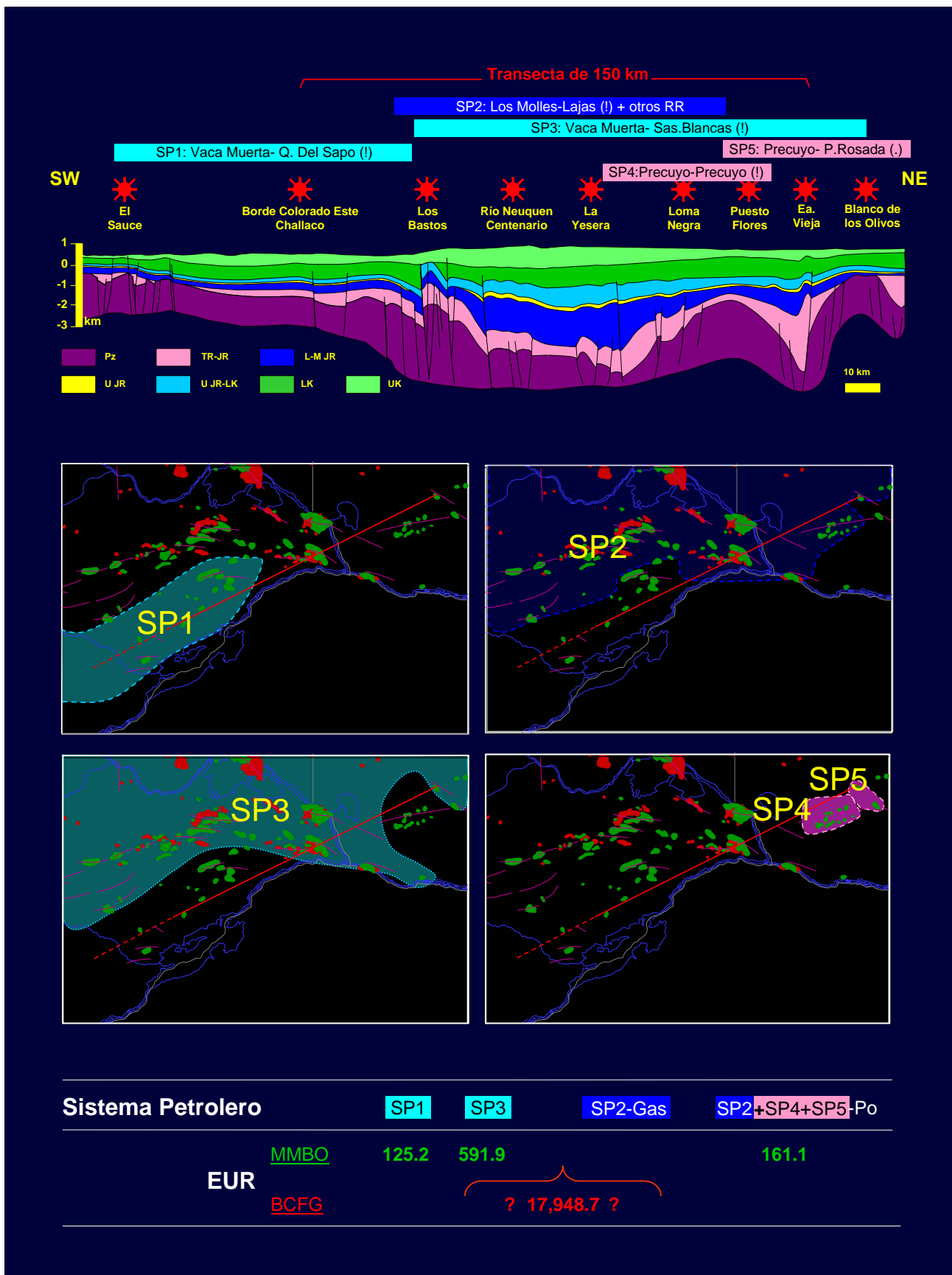
**Figura 17.** Cromatograma de petróleo entero (WOGC) y cromatogramas de masa para terpanos (M/Z 191) y esteranos (M/Z 217) representativos de petróleos originados en la facies lacustre salina de la roca madre del Pre-Cuyo en el área Estancia Vieja, pertenecientes al sistema petrolero SP5. En celeste se destacan algunos elementos cromatográficos y de biomarcadores característicos.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

La Fig. 18 presenta una síntesis, *sensu* Magoon y Dow (1994), de la extensión geográfica (roca madre y todas sus acumulaciones genéticamente vinculadas), localización estratigráfica y nomenclatura formal de los sistemas petroleros descritos en este estudio a lo largo de la transecta de 150 km que sirvió como guía para atravesar en sentido SW-NE la porción sudeste de la Cuenca Neuquina, desde el área Sur de la Dorsal, atravesando la Dorsal de Huincul y su Flanco Norte para finalmente alcanzar los hemigrábenes del Pre-Cuyo, en su extremo nororiental.

Los cinco sistemas petroleros visitados (tres de ellos vinculados a rocas madre marinas y dos de ellos a rocas madre lacustres) presentan características geoquímicas distintivas, tanto desde el punto de vista de los rasgos primarios de sus sistemas de carga, como de sus patrones de madurez térmica y de tipo de hidrocarburos asociados.

Los estudios efectuados en prácticamente la última década han conformado una sólida base para comprender el funcionamiento de estas “máquinas de hidrocarburos” en una de las áreas más prolíficas de la Cuenca Neuquina, en cuanto a su capacidad de generación, su sincronía con la formación de vías de migración y trampas, y su eficiencia de acumulación y preservación de gas y petróleo. Ello ha traído aparejado un refinamiento del concepto exploratorio, a partir de la construcción de modelos que predicen con alto grado de confiabilidad dónde se generan los hidrocarburos, cuándo abandonan la roca madre, cómo se movilizan y cuál será finalmente la probabilidad de que alcancen una roca reservorio y se entrapen en acumulaciones de interés comercial. En este camino, la geoquímica del petróleo ha jugado un rol clave como herramienta exploratoria, tal vez impensada hace algunos años.



**Figura 18.** Síntesis de la extensión de los cinco sistemas petroleros descritos y comparados en este trabajo. Se incluye una estimación volumétrica (MMBO y BCFG) de las acumulaciones por sistema o por grupo de sistemas.

Por último, el diagrama de la Fig. 18 incluye una estimación volumétrica de las acumulaciones de petróleo y gas en el área de estudio, para los sistemas individuales o agrupados. El sistema SP3, con denominación formal Vaca Muerta- Sierras Blancas (!) resulta ser largamente el más prolífico para petróleo, con un EUR calculado en 591.9 MMBO frente a los sistemas SP1, denominado Vaca Muerta-Quebrada del Sapo (!), y SP2-SP4-SP5 no discriminados, denominados Los Molles-Lajas (!)[+otros], Precuyo-Precuyo (!) y Precuyo-Punta Rosada (.), respectivamente, el primero con una estimación EUR de 125.2 MMBO, y los segundos con una estimación EUR de 161.1 MMBO. Respecto de los hidrocarburos gaseosos del área, la cifra de 17,948.7 BCFG se atribuye de manera generalizada a los sistemas SP2 y SP3, no discriminados. En efecto, como se ha discutido, la asignación rigurosa de las acumulaciones gasíferas del área está aún atravesada por significativa incertidumbre y plantea un desafío para futuros proyectos de investigación sobre estos sistemas petroleros.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a las compañías en las cuales se desempeñan por haber permitido la publicación de este trabajo.

## **LISTA DE TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO**

- Cruz, C.E., F. Robles, C.A. Sylwan y H.J. Villar, 1999. Los sistemas petroleros jurásicos de la Dorsal de Huincul. Cuenca Neuquina, Argentina. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Tomo I: 175-195. Mar del Plata.
- Cruz, C.E., Gómez Omil, R., A. Boll, E.A. Martínez, C. Arregui, C.A. Gulisano, G.A. Laffitte y H.J. Villar, 2002. Hábitat de los hidrocarburos y sistemas de carga Los Molles y Vaca Muerta en el sector central de la Cuenca Neuquina, Argentina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas-CD-ROM, 20p. Mar del Plata.
- Gómez Omil R., J. Schmithalter, A. Cangini, L. Albariño y A. Corsi, 2002. El Grupo Cuyo en la Dorsal de Huicul. Consideraciones estratigráficas, tectónicas y petroleras. Cuenca Neuquina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas-CD-ROM. Mar del Plata.
- Legarreta, L., G.A. Laffitte y S.A. Minniti, 1999. Cuenca Neuquina: múltiples posibilidades en las series jurásico-cretácicas del depocentro periandino. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Tomo I: 145-175. Mar del Plata.
- Legarreta, L., C. Cruz, G.A. Laffitte y H.J. Villar, 2003. Source rocks, reserves and resources in the Neuquén Basin, Argentina: Mass-balance approach and exploratory potential. International Congress and Exhibition of the American Association of Petroleum Geologists. Abstract. Barcelona, España.
- Legarreta, L., C. Cruz, G. Vergani, G.A. Laffitte y H.J. Villar, 2004. Petroleum Mass-Balance of the Neuquén Basin, Argentina: A Comparative Assessment of the Productive Districts and Non-Productive Trends. International Congress and Exhibition of the American Association of Petroleum Geologists. Expanded Abstract, 6p. Cancún, México.
- Legarreta, L., H.J. Villar, G.A. Laffitte, C.E. Cruz y G. Vergani, 2005. Cuenca Neuquina. Simposio de Fronteras Exploratorias en este Congreso.
- Magoon L.B. y W.G. Dow, 1994. The Petroleum System. En: L.B. Magoon y W.G. Dow (eds.) The Petroleum System-from source to trap. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 60:3-24, Tulsa.
- Malone, P., C.Saavedra, G. Vergani, J.C. Ferrero, M. Limeres y M. Schiuma, 2002. Los reservorios del Grupo Cuyo Superior. En: Schiuma M, G. Hinterwimmer y G. Vergani (eds.). Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de Argentina: 277-302, Simposio del V Congreso de Exploración de Hidrocarburos, IAPG. Mar del Plata.
- Maretto, H., O. Carbone, C. Gazzera y M. Schiuma, 2002. Los reservorios de la Formación Tordillo. En: Schiuma M, G. Hinterwimmer y G. Vergani (eds.). Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de Argentina: 335-358, Simposio del V Congreso de Exploración de Hidrocarburos, IAPG. Mar del Plata.
- Mosquera A., H.J. Villar y G. Laffitte, 2004. Oil Play in the Pre-Cuyo "Basement" of the Huincul High, Los Bastos Block, Southern Neuquén Basin. Argentina. American Association of Petroleum Geologists Annual Meeting. Abstract.. Dallas, USA.
- Mosquera A., 2002. Inversión tectónica Jurásico Inferior en el sector central de la Dorsal de Huincul, Área Los Bastos. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas-CD-ROM. Mar del Plata.



- Pando, G.A., S. del Vó, G.A. Laffitte y M. Arguijo, 1984. Posibilidades oleogénicas, migración y entrapamiento en las sedimentitas jurásicas (Lías-Dogger) de la región centro-meridional de la Cuenca Neuquina. IX Congreso Geológico Argentino, Actas VII: 52-67. BsAs.
- Uliana, M.A. y L. Legarreta, 1993. Hydrocarbon habitat in a Triassic-to-Cretaceous Sub-Andean setting: Neuquén Basin, Argentina. *Journal of Petroleum Geology*, v.16(4): 397-420. Londres.
- Uliana, M.A., L. Legarreta, G.A. Laffitte y H.J. Villar, 1999. Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras en las cuencas petrolíferas de Argentina. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Tomo I: 1-91. Mar del Plata.
- Urien, C.M. y J.J. Zambrano, 1994. Petroleum Systems in the Neuquén Basin, Argentina. En: L.B.Magoon y W.G.Dow (eds.) *The Petroleum System-from source to trap*. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 60: 513-534. Tulsa.
- Veiga, R.D., H. Verzi y H. Mareto, 2001a. 2-D Modeling in the central portion of the Neuquén Basin: New ideas in the origin of the Loma La Lata gas field. Argentina. AAPG Hedberg Conference, New Technologies and New Play Concepts in Latin America: 114-115, Mendoza, Argentina.
- Veiga, R., J. Hechem, N. Bolatti, P.Agraz, E. Sánchez, C. Saavedra, F. Pángaro, D. García y E.Moreira, 2001b. Syn-rift deposits as a new play concept in the central portion of the Neuquén Basin, Argentina: future perspectives from the analysis of physical-chemical models. AAPG Hedberg Conference, New Technologies and New Play Concepts in Latin America: 23-24, Mendoza, Argentina.
- Veiga, R. H. Verzi y H. Mareto, 2001c. Modelado bidimensional en el ámbito central de la Cuenca Neuquina (Argentina). *Boletín de Informaciones Petroleras*, 3º Época Año XVIII, N° 67: 50-63.
- Veiga, R., F. Pángaro y M. Fernández, 2002. Modelado bidimensional y migración de hidrocarburos en el ámbito occidental de la Dorsal de Huíncul, Cuenca Neuquina-Argentina. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Actas-CD-ROM .Mar del Plata.
- Vela, M., 1997. Los Molles – Lajas petroleum systems, Neuquén Basin, Argentina. Unpublished Master of Science Thesis, University of South Carolina.
- Villar, H.J., C. Barcat, S. Talukdar y W. Dow, 1993. Facies generadora de hidrocarburos, correlación petróleo-roca madre y sistema petrolero en el área sudoriental del Engolfamiento Neuquino. XII Congreso Geológico Argentino, Actas I: 382-394. Buenos Aires.
- Villar, H.J. y S. Talukdar, 1994. The Vaca Muerta-Sierras Blancas (!) petroleum system in the southeastern area of the Neuquén Embayment, Neuquén Basin, Argentina. AAPG Hedberg Research Conference - Geologic Aspects of Petroleum Systems, pp. 1/6-6/6, Mexico.
- Wavrek, D.A., J.C. Quick J.C., J.W. Collister, N.F. Dahdah, G. Laffitte y S. Del Vó, 1994. Neuquén Basin, Argentina. An integrated geochemical study. v: 2, Organic Geochemistry. ESRI Technical Report 94-08-422.
- Zumberge J.E. 1993. Organic Geochemistry of Estancia Vieja Oils, Río Negro Norte Block. Correlation with other Neuquén Basin, Argentina, Oils. En: M.H. Engel y S.A. Macko (eds.) *Organic Geochemistry. Principles and Applications*: 461-471, Plenum Press.