

EVIDENCIAS DE MIGRACIÓN TERCIARIA DE HIDROCARBUROS EN EL DORSO DE LOS CHIHUIDOS, CUENCA NEUQUINA, ARGENTINA

Martín F. Cevallos¹, Adolfo E. Giusiano², Marta Franchini³, Ana Laura Rainoldi³, Ricardo S. Martínez⁴,
Osvaldo C. Carbone⁵, Andrea A. Alaimo⁶

1: Gabinete de Hidrocarburos-UNSJ. geogabinete@unsj-cuim.edu.ar

2: Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos, Prov. de Neuquén. agiusiano@neuquen.gov.ar

3: Conicet-Centro Patagónico de Estudios Metalogenéticos. analaurarl@hotmail.com, mfranchini@speedy.com.ar

4: Geólogo Consultor. ricardo_sebastian_martinez@yahoo.com.ar

5: Gas y Petróleo de Neuquén. ocarbone5@gmail.com

6: YPF. alaimoandreaagata@gmail.com

Palabras clave: Migración terciaria, bitumen, chimenea de gas, Cuenca Neuquina

ABSTRACT

Evidence of tertiary hydrocarbon migration in the Dorso de los Chihuidos Arch, Neuquén Basin, Argentina

Migration of hydrocarbon to surface is occurring today in many basins, and it is well known to have happen in the Neuquén Basin since its Neogene exhumation. First oil exploitation in the basin involved bitumen veins along the western ranges. Evidences of this process in the basin center gas province are identified in the Dorso de los Chihuidos Arch, a regional anticline structure with 100 km north-south axis. A 100 km long alteration front was mapped in its eastern flank, including mineral alteration and disseminated bitumen. Gas chimneys were identified on seismic in flanks and crest positions. These features appear in the Cuyo Group section and developed upwards until surface levels in correspondence with the mapped alteration front. Neogene inversion formed the Dorso de los Chihuidos Arch and induced failure of its Cretaceous seals. This tectonism occurred after critical moment, when local petroleum systems were mature to overmature, and it triggered migration to surface of vast gas and petroleum volumes. The lost hydrocarbons should be considered in any petroleum system modelling of the region.

INTRODUCCIÓN

El Dorso de los Chihuidos constituye una estructura regional de unos 2400 m de relieve estructural a nivel de las secuencias cretácicas y unos 100 km de extensión con eje norte-sur. Está ubicado en la parte centro-oeste de la Cuenca Neuquina (Figura 1). Si tomamos un cierre estructural general a nivel del techo de la Fm Quintuco, el área total supera los 500 km² (Figura 2). Sin embargo, sólo se han descubierto reservas principalmente gasíferas en su flanco oriental, mientras

su cresta aún representa recursos exploratorios no convencionales. Esta estructura regional fue explorada en etapas tempranas de la actividad petrolera en la Cuenca Neuquina. Los primeros pozos se perforaron a principios de 1960. En su flanco oriental se encuentran los yacimientos de gas Aguada Pichana (1970) y Sierra Chata (1978-1993), que producen gas y condensados de la Fm Mu-

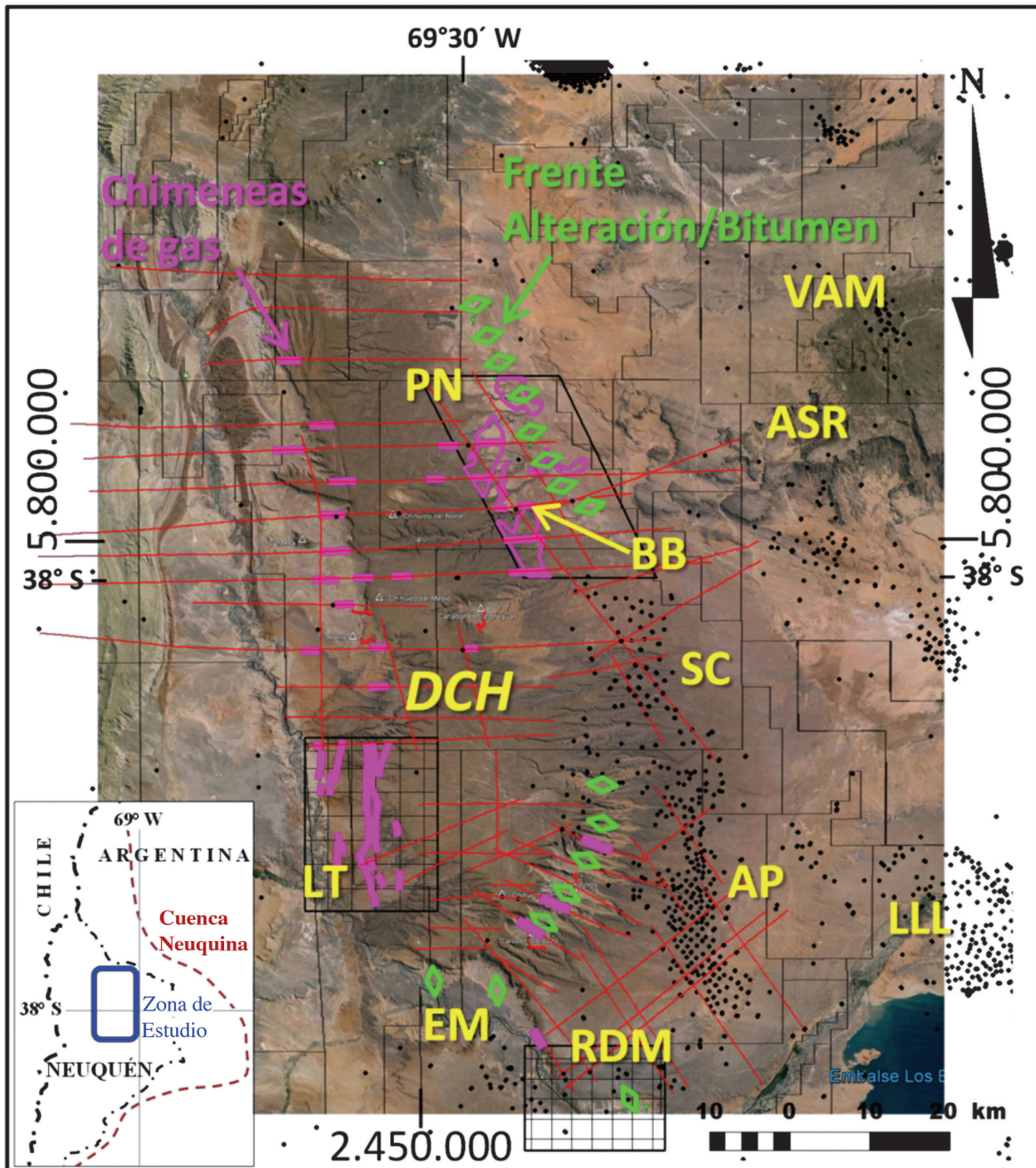


Figura 1. Mapa de ubicación general; Imagen satelital, líneas sísmicas 2D en rojo, sísmica 3D enmarcados en polígonos negros, chimeneas de gas en líneas fucsia, frente de alteración en areniscas y bitumen diseminado marcado con rombos verdes. Abreviaturas: DCH: Dorso de los Chihuidos, BB: Afloramientos de Borde Blanco, LT: Las Tacanas, PN: Parva Negra, AP: Aguada Pichana, SC: Sierra Chata, EM: El Mangrullo, RDM: Rincón del Mangrullo, LLL: Loma La Lata, ASR: Aguada San Roque, VAM: Volcán Auca Mahuida.

lichinco. Las posiciones crestales carecen de buenas condiciones de reservorios para esta unidad.

En este trabajo se presentan evidencias en superficie y subsuelo de procesos de migración terciaria de hidrocarburos en el Dorso de los Chihuidos (*DCH* en adelante). Con este propósito se analizan evidencias directas (bitumen) e indirectas (decoloración y alteración mineral) de la circulación de hidrocarburos en las unidades aflorantes, en especial la Fm Huincul. Se describen además patrones en subsuelo tipo nubes gaseosas o chimeneas de gas mediante sísmica 2D y 3D. El proceso de migración terciaria descripto provocó la fuga de grandes volúmenes de hidrocarburo a través de esta estructura durante su proceso de formación neógeno.

Las primeras manifestaciones de migración terciaria observadas en la cuenca corresponden a los depósitos de asfaltitas reconocidos por los primeros pobladores de la región y cuya explotación minera tuvo su apogeo entre 1940 y 1950 (Cobbold *et al.*, 2011). En el sector occidental de la cuenca, entre Ranquil Norte en Mendoza y el arroyo Pichi Neuquén, se han relevado más de 80 localidades con asfaltitas (Cobbold *et al.*, *op.cit.*). Estas manifestaciones están circunscriptas a la faja plegada, donde gran parte del sistema petrolero se encuentra exhumado. Se disponen en forma de vetas de hasta algunos metros de espesor y que han sido emplazadas en el Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior (Cobbold *et al.*, *op.cit.*), cuando la roca hospedante ya se encontraba en superficie.

Fuera de la zona mencionada, se han observado impregnaciones de bitumen y evidencias indirectas del paso de hidrocarburos. Por ejemplo, en una serie de trabajos recientes sobre depósitos de Cobre (Vanadio-Uranio) hospedados en rocas del Gr Neuquén (Giusiano *et al.*, 2006, 2008; Giusiano y Bouhier, 2009; Pons *et al.*, 2009 y Rainoldi *et al.*, 2012a) se describe como rasgo característico la decoloración de las areniscas rojas producto de la interacción agua-roca-hidrocarburos y la presencia de bitumen. El mismo fenómeno de decoloración fue reconocido en depósitos de hidrocarburos a nivel mundial como en la Navajo Sandstone-Utah (Chan *et al.* 2000; Garden *et al.* 2001; Beitler *et al.* 2003, 2005; Parry *et al.* 2004, 2009), en la Cuenca Central Europea de Alemania (Schöner y Gaupp, 2005), y en reservorios de hidrocarburos exhumados (Burden *et al.*, 2005, Simon y Witham, 1997, Beitler *et al.*, 2005).

MARCO GEOLÓGICO

La Cuenca Neuquina tiene una superficie aproximada de 124.000 km² y abarca gran parte de la provincia del Neuquén, el sector occidental de las provincias de Río Negro y de La Pampa y la porción suroccidental de la provincia de Mendoza (Figura 1). Su relleno consiste en 7.000 m de sedimentos marinos y continentales depositados en una cuenca de trasarco. La cuenca se constituye como tal en el Triásico Superior a partir de un sistema de rift y culminó en el Cretácico Superior- Paleoceno con el inicio de la orogenia andina, evolucionando a una cuenca de antepaís (Legarreta y Gulisano, 1989).

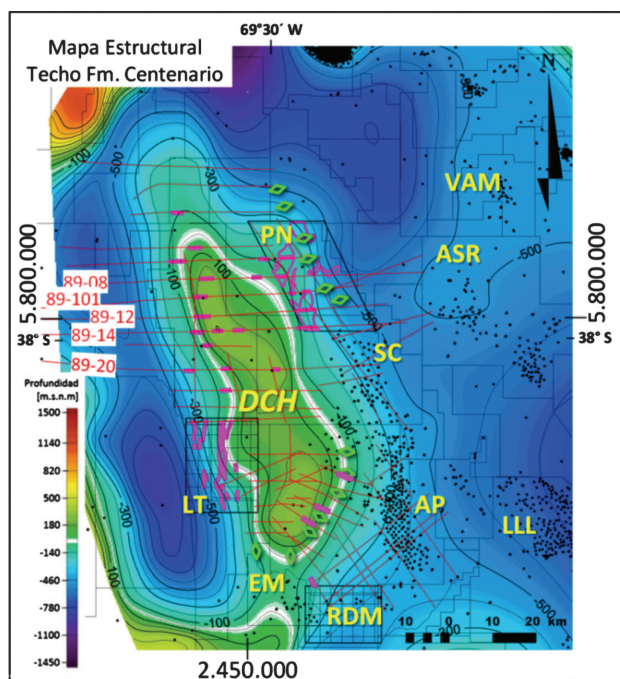


Figura 2. Mapa estructural del DCH referido a la Fm Centenario. Ver referencias en Figura 1.

El *DCH* es una estructura anticlinal regional que se extiende de norte a sur por unos 100 km (Figura 2). Según Cristallini *et al.*, (2005) el origen del *DCH* está ligado a la reactivación de hemigrábenes precuyanos, en tanto que Mosquera y Ramos (2005) lo relacionaron a una inversión del basamento caracterizada por una serie de anticlinales con vergencia oeste. La configuración actual se habría desarrollado principalmente en el Neógeno como producto de los últimos movimientos ándicos (Maretto y Pángaro, 2005), manteniéndose activa hasta el Cuaternario (Messager *et al.*, 2010).

La evolución mesozoica del *DCH* fue descrita por Maretto y Pángaro (2005).

Durante el Jurásico Inferior se constituyó

como un hemigraben con bloque hundido al este para la posición que hoy ocupa el *DCH*. Estos autores describen una primera inversión tectónica coetánea con la depositación de la sección basal de la Fm Quintuco (Berriasiano-Valanginiano Sup.) evidenciada por el apilamiento de “*downlaps*” sobre el ápice del *DCH*. Durante este episodio se presume que no ocurrió un evento erosivo sobre los terrenos levantados debido a su posición distal dentro de la rampa carbonática (Maretto y Pángaro, *op.cit.*). Cabe destacar que a partir de esta primera inversión existiría una estructura para las unidades pre-cretácicas que pudo tener un eje similar al actual (Figura 3).

La estructura del *DCH* se desarrolló fundamentalmente durante el Oligoceno Superior y el Mioceno, con un levantamiento de más de 1400 m y en una etapa anterior (Maastrichtiano-Oligoceno) en la que se levantó unos 1000 m (Zamora Valcarce *et al.*, 2009) (Figura 4). Este considerable relieve estructural produjo el afloramiento en su cresta de los niveles medios del Gr Rayoso. Zamora Valcarce *et al.*, (2009) asocian el inicio de la exhumación a la migración de la faja plegada del Agrio que avanzó sobre el *DCH* en el Cretácico Superior, luego de la depositación de gran parte del Gr Neuquén. Durante el Paleógeno el levantamiento fue gradual (Zamora Valcarce *et al.*, *op.cit.*), del orden de 300-400 m en unos 50 Ma. Durante el Oligoceno Superior-Mioceno se desarrollan los dos episodios de levantamiento de mayor envergadura, descriptos por los citados autores en base a depocentros sinorogénicos. Estos depocentros se desarrollaron en posiciones occidentales con respecto a la cresta y corresponden a las formaciones Puesto Burgos y Rincón Bayo (Leanza y Hugo, 2001). A estos depósitos se les asignan edades Oligoceno-Mioceno Inferior (25-20Ma) y Mioceno Medio (~14 Ma.) y su correspondencia con pulsos de levantamientos del orden

de los 600-700 m y 700-800 m, respectivamente (Zamora Valcarce *et al.*, *op.cit.*). El DCH alcanza su configuración actual y se constituye como potencial trampa a fines del Mioceno, a la vez que

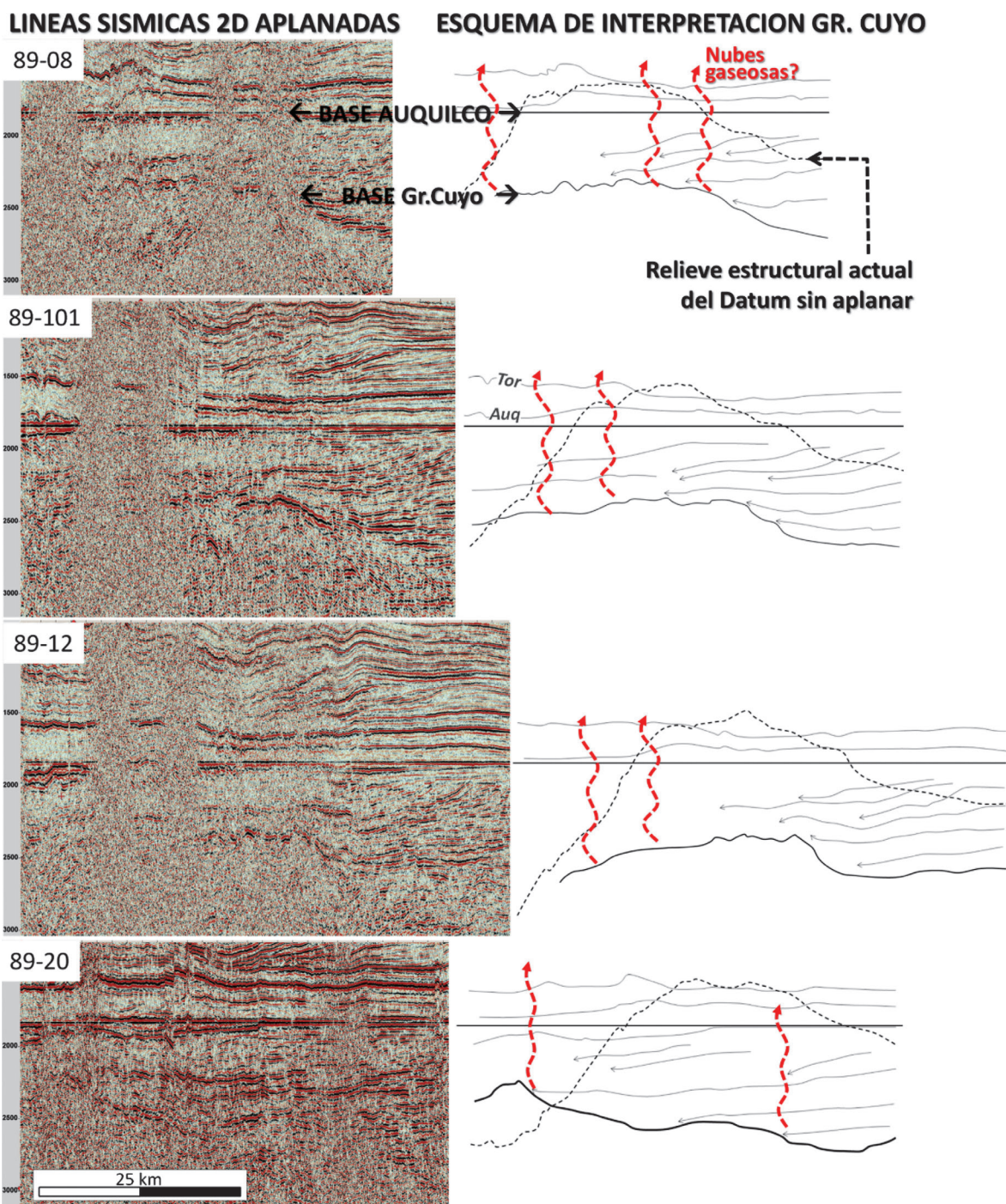


Figura 3. Líneas sísmicas oeste-este aplanadas a la base de Fm Auquileo. Ver ubicación de las líneas sísmicas en la Figura 2. La línea de trazo negra que muestra la geometría estructural actual del Datum permite comparar el eje del DCH con la posición de los altos de basamento a fines del Jurásico. En flechas en líneas de trazo rojas muestra la posición algunas de las anomalías catalogadas como “nubes gaseosas”. Nótese el adelgazamiento de Fm Auquileo (Auq) en el flanco oeste del DCH y el consecuente engrosamiento de Fm Tordillo (Tor).

se produce la exhumación de su cresta, exponiendo y erosionando al Gr Neuquén e incluso hasta niveles del techo del Gr Rayoso (Mb Rincón).

En el *DCH* de oeste a este afloran la Fm Rayoso (Barremiano-Aptiano, Mbs Rincón, Quili Malal, Pichi Neuquén y Cañadón de la Zorra; Leanza 2003) y el Subgrupo Río Limay (Cenomaniano-Turoniano) perteneciente a la base del Grupo Neuquén (Cretácico Superior) e integrado por las formaciones Candeleros, Huincul y Cerro Lisandro (Ramos 1981). La Fm Candeleros se apoya sobre el Mb Pichi Neuquén de la Fm Rayoso, a través de una discordancia regional (Intersenoniana). A continuación y de forma concordante se apoya la Fm Huincul que presenta sus mejores afloramientos en la cresta y flanco este del anticlinal. La columna de este subgrupo se completa con la Fm Cerro Lisandro que se ubica sobre las estribaciones del flanco este. En esta parte de la cuenca no se puede diferenciar con claridad el techo de la Fm Cerro Lisandro de la base de la Fm Portezuelo (Subgrupo Río Neuquén), por tal motivo se mapearon ambas unidades juntas (Figura 2 mapeo). En el flanco occidental del *DCH* afloran las formaciones Puesto Burgos y Rincón Bayo de edad miocena media-superior (Leanza y Hugo, 2001; Zamora Valcarce 2007). Estas unidades fueron interpretadas como sinorogénicas dado que se disponen de manera traslapante sobre el Gr Neuquén, con una angularidad de hasta 14° (Zamora Valcarce *et al.*, 2006).

PRODUCCIÓN DE HIDROCARBURO Y SISTEMAS PETROLEROS EN EL ÁREA DE ESTUDIO

El Dorso de los Chihuidos (*DCH*) presenta a la fecha acumulaciones comerciales en su flanco oriental y en su hundimiento sur. La región productiva por excelencia es su flanco oriental, donde se disponen dos grandes campos: Aguada Pichana y Sierra Chata, ambos productores de la Fm Mulichinco. Aportan un 10% del gas del país y producen con relaciones gas/petróleo (GOR) de 30.000 y 43.000 m³/m³ respectivamente (fuente IAPG). La Fm Mulichinco presenta un contacto gas / agua regional que comparten las acumulaciones del flanco oriental (Piovesanel *et al.*, 2008). Los líquidos producidos se vinculan genéticamente con la Fm Vaca Muerta (González *et al.*, 2005). Hacia el hundimiento sur se desarrolla el campo El Mangrullo, el cual produce predominantemente gas, actualmente un 83% de la Fm Mulichinco y un 17% de la Fm Tordillo.

Se considera que en el *DCH* se encuentran activas como roca madre la Fm Vaca Muerta y la Fm Los Molles (Chebli *et al.*, 2011). Los sondeos existentes muestran que al menos desde el eje del *DCH* y hacia el este la sección hauteriviana se encuentra en facies "Fm Centenario", correspondientes a un ambiente fluvio-deltaico con una alta relación arena/arcilla, reduciendo su potencial como roca madre más allá del flanco occidental. En cuanto a reservorios, hay una marcada preponderancia de la Fm Mulichinco, la cual se constituye localmente como la primera sección permeable por encima de la secuencia Quintuco/Vaca Muerta, y se encuentra sellada por

la sección transgresiva basal de la Fm Centenario. La Fm Tordillo, produce un gas mucho más seco y en volumen de reservas es actualmente un reservorio menor. Se mencionan además los filones cuaternarios intruidos en la Fm Vaca Muerta que se disponen ya fuera del ámbito del *DCH*, 60 km al este en el área San Roque. Un dato relevante son algunos filones intruidos en la Fm Los Molles y la base de Fm Lajas que producen gas seco en la misma región (Astesiano *et al.* 2008).

Mediante el análisis de los líquidos asociados en los campos de la Fm Mulichinco, se concluye una filiación con la Fm Vaca Muerta para estos hidrocarburos (González *et al.*, 2005). Sin embargo, no se descarta que parte de la fase gaseosa haya sido aportada por la Fm Los Molles.

La falta de participación de la Fm Los Molles en el aporte considerable de hidrocarburos al sistema, al menos en la fracción líquida, fue atribuida por Rooney *et al.*, (1999) a la presencia de 300 m de evaporitas de la Fm Auquilco, que actuó como sello de las secuencias pre-cretácica. Sin embargo, podría especularse que al menos parte de la producción de la Fm Tordillo en El Mangrullo haya sido generada en la Fm Los Molles, así como la producción de los filones intruidos la misma formación (Astesiano *et al.*, 2008).

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Las tareas de campo consistieron en el relevamiento geológico del Gr Neuquén, que es donde se documentaron las evidencias más notables de hidrocarburo en Superficie. Se levantaron perfiles columnares a escala 1:1000 del Subgrupo Río Limay, el mapeo de diaclasas, fracturas y tubos de bitumen, y el muestreo para el análisis petrográfico y geoquímico. Por medio de imágenes satelitales se mapearon los principales sistemas de fracturas y se delinearon las zonas alteradas.

Para el trabajo de subsuelo se contó con un *set* de datos limitado que consistió en 1500 km lineales de sísmica 2D, un cubo sísmico 3D de 200 km² ubicado en Las Tacanas y perfiles eléctricos básicos de unos 15 sondeos. Los datos fueron provistos por la Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de Neuquén e interpretados en el Gabinete de Hidrocarburos de la Universidad Nacional de San Juan.

En base a la interpretación de Sísmica 2D se realizó el mapeo estructural en dos niveles, uno somero, próximo al techo de la Fm Rayoso y uno intermedio al techo de la Fm Mulichinco. En el cubo 3D se interpretaron varios horizontes, desde el Gr Cuyo hasta la base del Gr Neuquén. Los horizontes sísmicos fueron asociados a límites de formaciones a partir del colgado sísmico de pozos claves. Para la identificación de anomalías tipo “chimenea de gas” se identificaron patrones en sísmica 2D y 3D.

A partir del análisis de Zamora Valcarce *et al.*, (2009) y de los datos del pozo *DCH.x-2*, se construyó un diagrama tiempo-profundidad (Método Lopatin, Figura 4) para el sector de cresta del *DCH*. El modelo se inicia desde la base de Fm Auquilco, donde se poseen datos en el pozo de

referencia. A su vez, a modo ilustrativo, se graficaron las isothermas para analizar la evolución térmica del Gr Cuyo Inferior y de la Fm Vaca Muerta. Se utilizó un gradiente geotérmico decreciente en el tiempo, desde 38°C/100 m en el Jurásico Superior hasta 30°C/100 m en la actualidad. Si bien es un modelo simple, se presenta para ilustrar el alto grado de exposición térmica que alcanzaron las secciones de roca madre y los momentos críticos de los sistemas petroleros, que se dieron entre los 115 y los 80 Ma.

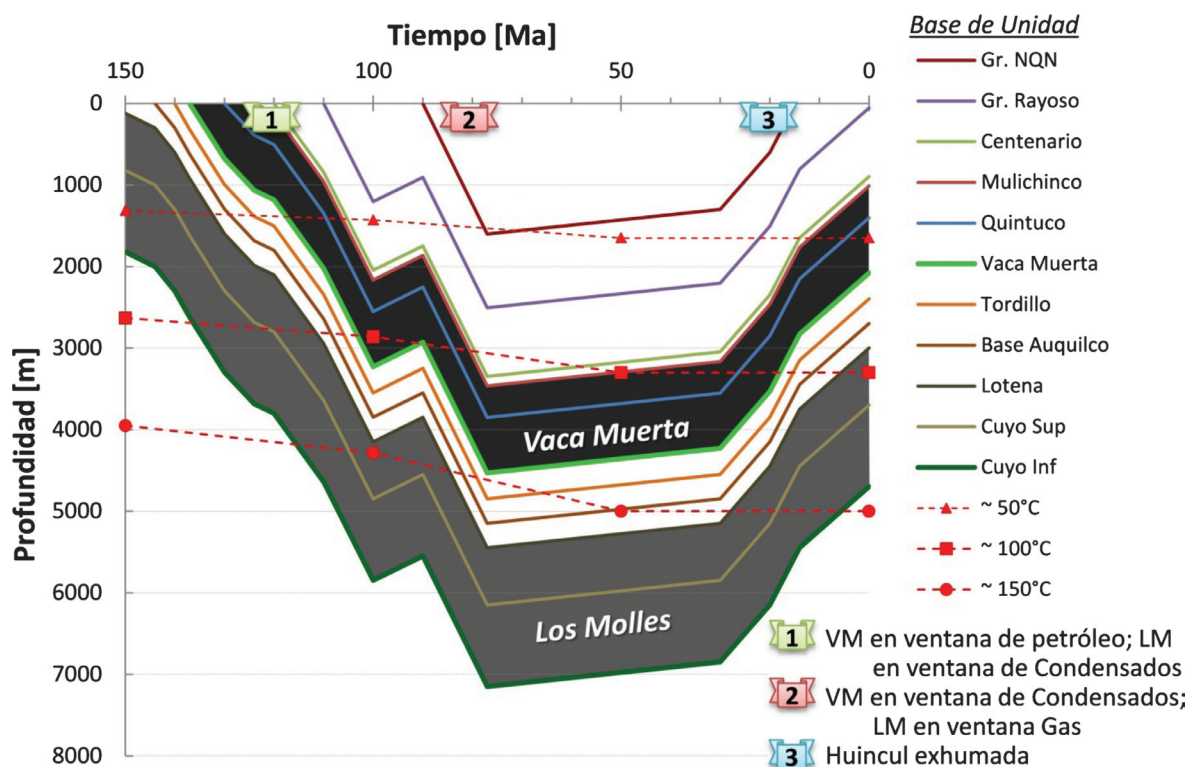


Figura 4. Diagrama de subsidencia 1D modificado de Zamora Valcarce *et al.*, (2009) en base al pozo DCh.x-2 y sísmica 2D.

EVIDENCIAS DE HIDROCARBURO EN SUPERFICIE EN EL DORSO DE LOS CHIHUIDOS

Las principales manifestaciones de bitumen en el *DCH* se encuentran estratigráficamente circunscriptas a la sección media de la Fm Huincul. Esta unidad comprende depósitos fluviales de areniscas rojas que en la zona de estudio se presentan decolorados y con impregnaciones de bitumen diseminadas a lo largo de una extensa región. El área abarca desde los afloramientos más australes del *DCH* en la costa del Río Neuquén (área El Mangrullo) hasta los afloramientos situados en los bloques exploratorios Parva Negra y Cerro de las Minas por el norte. Esto representa

un frente de alteración contaminado con hidrocarburos de más de 100 km de extensión sobre el flanco oriental del *DCH*.

La Fm Huincul (Cenomaniano tardío-Turoniano temprano, Legarreta y Gulisano, 1989) aflora en el flanco oriental del *DCH*. Se pueden diferenciar tres secciones con arreglo general grano-decreciente. La sección inferior presenta coloración rojiza dominante y se compone en más de un 80% de areniscas y conglomerados intercalados con delgados niveles de fangolitas rojas. La sección media está diferenciada fundamentalmente por un cambio cromático, presenta coloraciones blanquecinas y amarillentas en sus secciones clásticas gruesas. Se compone también de areniscas y conglomerados en niveles individuales más delgados. La sección superior es predominantemente fangolítica con intercalaciones de areniscas pardo rojizas. Se interpreta como una sucesión fluvial meandrosa con desarrollo de llanuras de inundación (Rainoldi *et al.*, 2012b). Según Rainoldi *et al.* (2014) las secciones clásticas gruesas corresponden a litoarenitas feldespáticas compuestas por 41% de fragmentos líticos, 30% de cuarzo, 29% de feldespato, con opacos, micas, zircón, rutilo y turmalina como accesorios. La matriz está ausente o es muy escasa (<5%) y en algunos niveles hay cemento carbonático con distribución heterogénea.

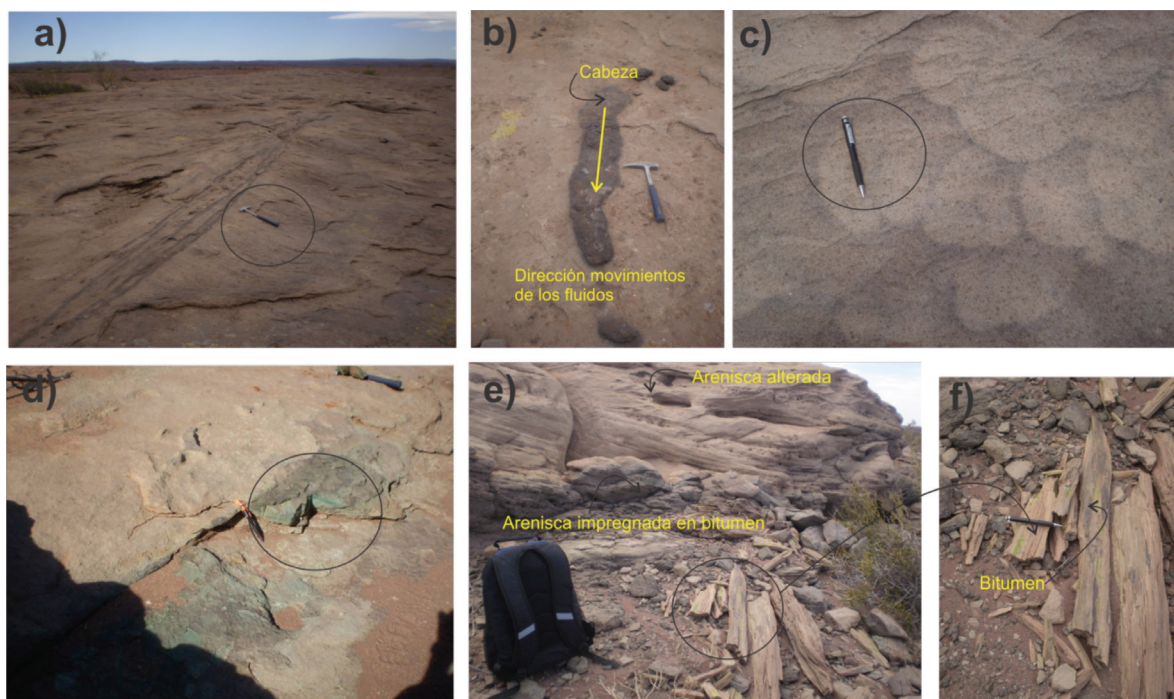


Figura 5. a) Bitumen en plano de estratificación; b) Tubo horizontal; c) Gotas de bitumen; d) Diaclasa con bitumen; e) Troncos fósiles con bitumen.

Las variaciones cromáticas de la Fm Huincul fueron interpretadas por Rainoldi *et al.*, (2014) como alteraciones de estratos rojos relacionadas a la migración de hidrocarburos. De acuerdo al cambio en la coloración y en los minerales autigénicos de estas areniscas, los autores reconocen

cuatro facies diagenéticas: facies de areniscas rojas, facies de areniscas grises, facies de areniscas marrones y facies de areniscas blancas. La facies de areniscas rojas es considerada como la original dentro de una sucesión sedimentaria de estratos rojos, mientras que las facies de areniscas grises, marrones y blancas son facies de alteración. Las facies de areniscas rojas y blancas presentan la mayor distribución areal, mientras que las facies de areniscas grises y marrones están subordinadas al contacto entre las dos anteriores. Las areniscas rojas se caracterizan por la presencia de hematita como recubrimiento (“*coating*”) de los castos y por parches de caolinita que rellenan los poros. Los feldespatos y los fragmentos líticos volcánicos están parcialmente alterados a clorita e illita. La porosidad puede llegar al 20% dependiendo de la cantidad de cemento carbonático. Las areniscas blancas carecen de los recubrimientos de hematita y se caracterizan por una intensa disolución de los clastos de feldespatos y de fragmentos volcánicos cuyo resultado es un notorio incremento en la porosidad de la roca. Tanto los detritos lábiles como la caolinita intergranular presentan una fuerte alteración y reemplazo por esmectita (montmorillonita). Se observa un cemento carbonático tardío que obtura parte de la porosidad secundaria y que presenta impregnaciones de bitumen recubriendo clastos y rellenando fracturas intragranulares. Las areniscas grises y marrones presentan los mismos fenómenos de disolución y alteración que las areniscas blancas pero con menor intensidad. Además contienen abundante esmectita (montmorillonita) $\pm$ interestratificado clorita/esmectita y hematita secundaria. Todos estos minerales están enriquecidos en vanadio. Cuando el interestratificado clorita/esmectita predomina las areniscas se vuelven de color pardo definiendo de este modo la facies de areniscas marrones.

Cabe mencionar también el notorio blanqueamiento que presenta la Fm Rayoso, más intenso en el contacto entre sus distintos miembros Pichi Neuquén, Quili Malal y Rincón. Estas alteraciones no serán descriptas en el presente trabajo, aunque la presencia de bitumen, cobre, uranio y vanadio (Rojas 2011), pueden al menos en parte provenir del mismo proceso que se infiere para la Fm Huincul.

El bitumen en superficie ha sido observado de varias maneras: diseminado, en “tubos” horizontales y verticales, como relleno de diaclasas, alrededor de restos leñosos fosilizados, en pelitas y limolitas alteradas.

Bitumen diseminado: como impregnación en los poros de las areniscas. En general las impregnaciones se concentran en los niveles más permeables (paleocanales) o en las heterogeneidades que presentan los sets de estratificación (Figura 5 a). En ocasiones se observa en forma de “gotas” aislada (Figura 5 b), es decir zonas donde la proporción de bitumen diseminado se incrementa notablemente.

Tubos horizontales y verticales: se los denomina de esta manera debido a su forma tubular (“*stringer*” en la acepción de England 1994). Cuando estas formas se disponen perpendiculares a los planos de estratificación (verticales) pueden presentar una zona más ancha (cabeza) por donde se produjo el ascenso de los hidrocarburos. En el sentido estratigráfico siguen cambios texturales

de las areniscas y/o cambios estructurales. El bitumen puede presentarse diseminado en altas proporciones dentro del tubo, o bien el tubo puede presentar una sección interna ahuecada por disolución y un borde definido por areniscas con bitumen. Por lo general en las zonas de tubos es donde mayor cantidad de bitumen se observa. Los tubos tienen longitudes de hasta 15 m y una orientación principal NO-SE y NE-SO, coincidentes con las orientaciones de diaclasas y de los principales elementos estructurales a nivel regional (Giusiano y Bouhier, 2009) (Figura 5 c).

Relleno de diaclasa: No es la forma más frecuente pero en ciertos casos el bitumen rellena diaclasas e impregna la arenisca en contacto (Figura 5 d).

Troncos fósiles: los restos leñosos fosilizados son frecuentes y presentan bitumen impregnando lo que fue su corteza externa y algunas estructuras fibrosas internas del tronco (Figura 5 e-f). Estos presentan una orientación preferencial NNO-SSE que coincide con la dirección principal de los paleocanales.

Limolitas y arcilitas alteradas: generalmente se observan en los contactos entre los niveles pelíticos y limosos con las areniscas permeables por las que se presume circularon hidrocarburos y agua. Se presenta principalmente como un blanqueamiento en ocasiones acompañado por la presencia de bitumen diseminado en diaclasas.

MIGRACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS ENTRAMPADOS EN SUBSUELO

El *DCH* se formó como tal con posterioridad al momento crítico de sus potenciales rocas madres, y luego fue parcialmente exhumado durante su formación. Un factor clave a tener en cuenta cuando analizamos la migración es que las acumulaciones descubiertas son predominantemente estratigráficas y se encuentran a más de 10 km al este de la cresta de la estructura. Además, se observa un fuerte predominio de gas sobre líquidos en la producción del tren. Si bien la fracción líquida ha sido vinculada a la Fm Vaca Muerta (González *et al.*, 2005), un volumen considerable de gas pudo provenir de la Fm Los Molles. Actualmente la Fm Vaca Muerta se encuentra en ventana de gas/condensado y gas seco en la región (Chebli *et al.*, 2011), mientras que la Fm Los Molles está en ventana de gas seco a sobremadura.

La Fm Vaca Muerta entró en ventana de generación aproximadamente a los 115 Ma. (Figura 4) y alcanzó su máxima madurez luego de la depositación del Gr Neuquén (~80-70 Ma.), incluso a niveles de ventana de gas seco. Durante este período se produjo la migración de hidrocarburos hacia el Este, aún desde posiciones al oeste del *DCH*, ya que este no estaba desarrollado como estructura notoria y continua para las unidades cretácicas (Figura 6). La principal vía fue la Fm Mulichinco, en muy buena posición para una carga vertical y luego una migración secundaria lateral hasta las posiciones de acuífero al este, hacia el actual Bajo de Añelo. Se postula que al estructurarse el *DCH* en el Neógeno, los hidrocarburos remigraron hacia el oeste dentro de la

misma vía. La Fm Mulichinco, actuó como “carrier” y como sello capilar en su transición de facies proximales-distales en el flanco oriental del DCH. Es decir, las acumulaciones del flanco oriental del DCH serían producto de hidrocarburos remigrados (Figura 6). El volcanismo de la región aportó CO₂ al sistema (Rooney *et al.*, 1999), en las posiciones al este del DCH más intensamente entre el Mioceno y el Pleistoceno (Vottero *et al.*, 2005; González *et al.*, 2005) y posiblemente más tempranos al oeste del DCH, desde incluso el Cretácico Superior (Zamora Valcarce *et al.*, 2009).

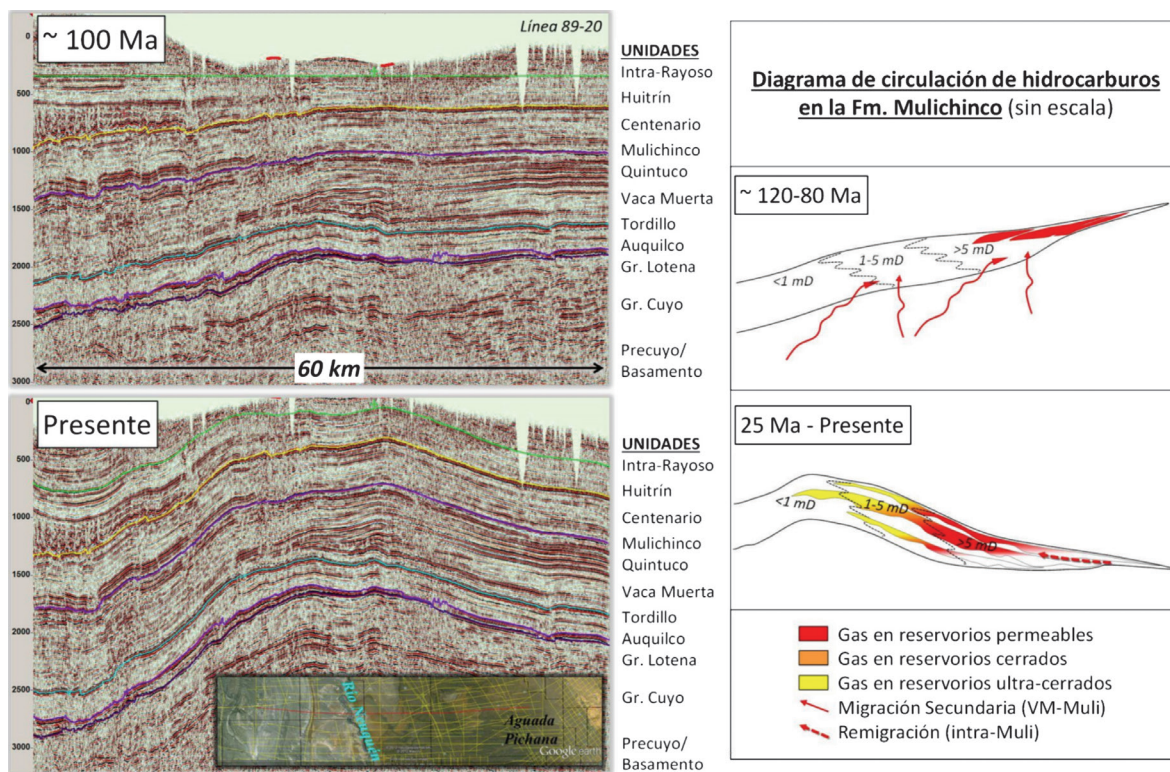


Figura 6. Sección sísmica oeste-este. Se muestra en la parte superior, aplanada a un reflector somero Intra-Rayoso para mostrar las paleo-geometrías a un tiempo próximo al momento crítico. En la parte inferior se muestra la disposición estructural actual del DCH. En el diagrama de la derecha se muestra un diagrama de la migración lateral de oeste a este en el momento crítico y la remigración hacia el oeste que se produjo al formarse el DCH.

La Fm Los Molles alcanzó la ventana de gas seco hace más de 90 Ma. A diferencia de posiciones más proximales de la cuenca, en el DCH las vías de migración lateral tradicionales, los Grupos Cuyo Superior y Lotena, están en facies distales con malas condiciones de permeabilidad. En el Gr Cuyo Superior casi no se distinguen facies “Lajas”, predominando las facies fangolíticas distales, y además la columna presenta un alto grado de diagénesis. En algunas localidades, tales como la Dorsal de Huincul, las fallas constituyen una conexión clave entre la roca madre cuyana y los reservorios suprayacentes, pero esta región presentaba un bajo grado de fallamiento al momento crítico. Otro factor importante es la presencia de una espesa sección de la Fm Auquilco, tal como se describe en Legarreta *et al.*, (2008), que fue una barrera para la migración a Fm Tordillo y

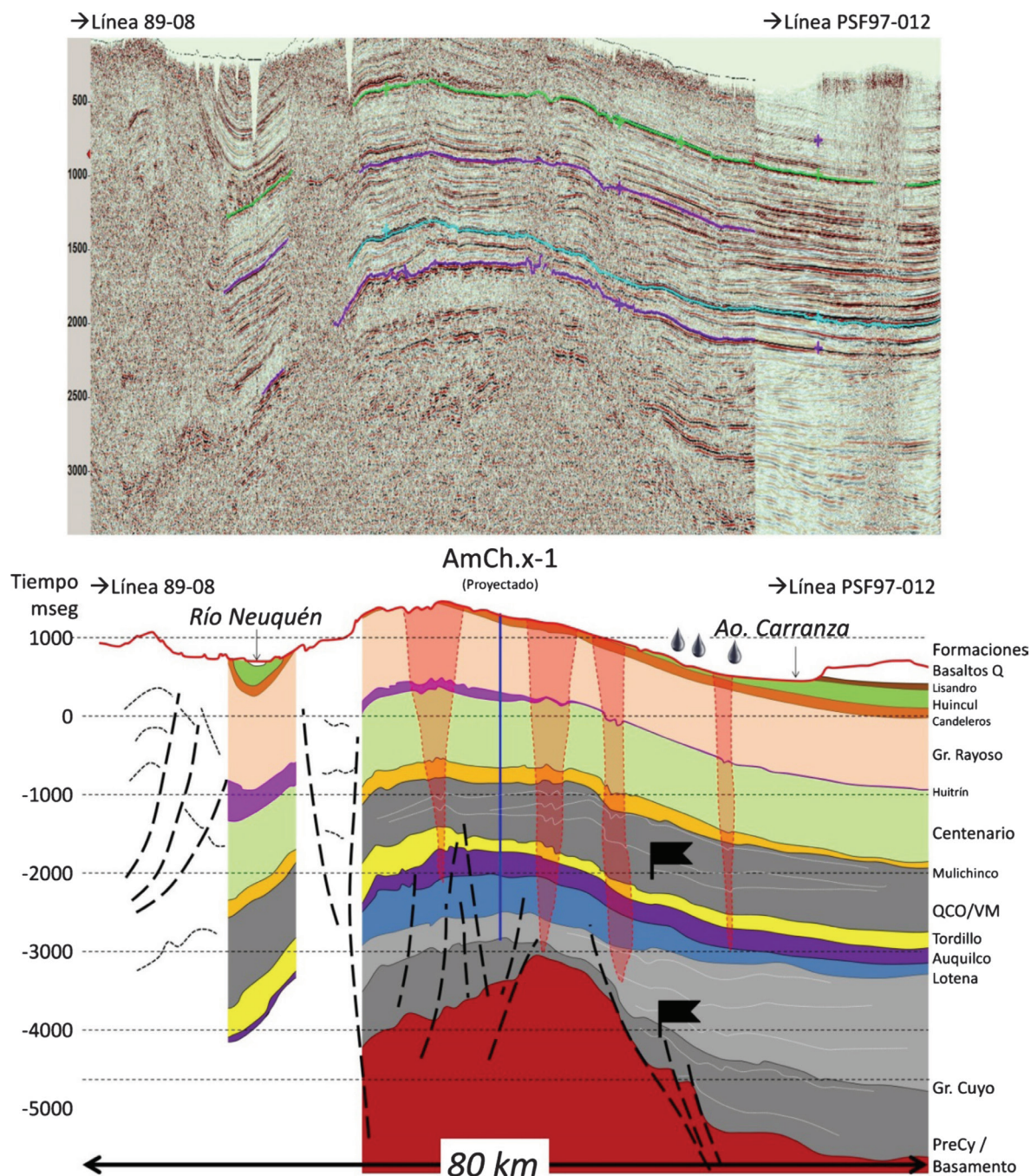


Figura 7. Sección sísmica en la parte superior y diagrama de interpretación en la parte inferior. En superficie se destacan los niveles de erosión actual que exponen la parte superior del Gr Rayoso y al Gr Neuquén. Se señalan con “gotas grises” la presencia de bitumen en superficie. En la línea sísmica se destacan las zonas de ruido interpretadas en el diagrama inferior como chimeneas de gas.

unidades superiores. Por ello, la mayor parte del gas generado en Fm Los Molles pudo permanecer *in situ* y en las secciones clásticas de baja permeabilidad del Jurásico Superior, en ambos casos con un nivel de sobrepresión considerable.

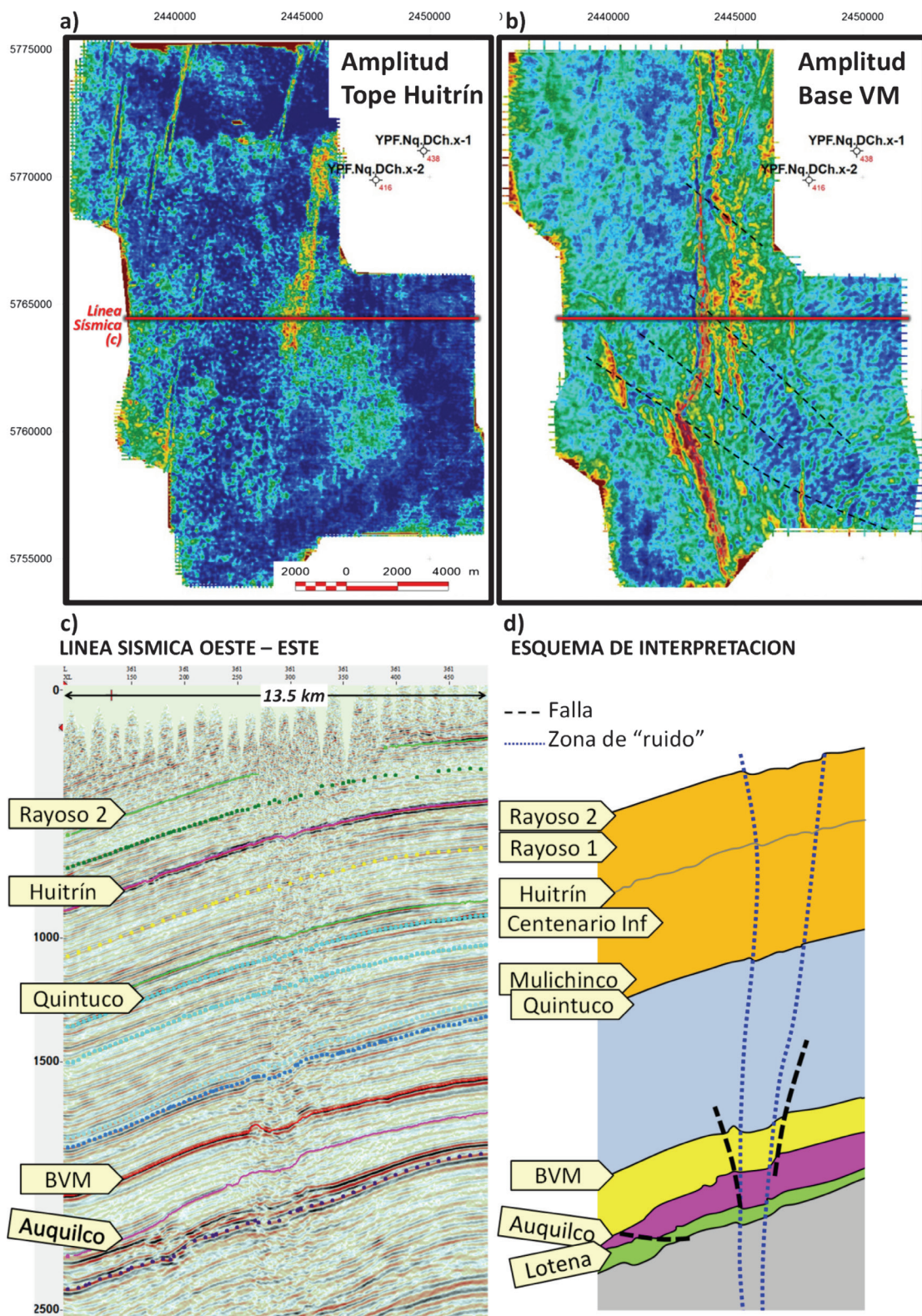


Figura 8. a) y b) mapas de amplitud sísmica a nivel de Fm Huitrín y base de Fm Vaca Muerta respectivamente. Se observan en colores cálidos las anomalías de amplitud que corresponden con las chimeneas de gas. c) y d) línea sísmica oeste-este y esquema de interpretación que muestran la zona de ruido interpretada como chimenea de gas y las bruscas variaciones de espesor de la Fm Auquilco y Fm Tordillo. Nótese deformación plástica y despegues en Fm Auquilco y la relación con la chimenea principal.

MIGRACIÓN DE HIDROCARBUROS A SUPERFICIE

A partir de la interpretación sísmica, se observan zonas de ruido que se disponen en franjas verticales y orientadas predominantemente en dirección N-S. En sísmica 2D han sido identificadas en varios sectores del *DCH*, tanto en los flancos como en posiciones de cresta (Figuras 1 y 7). Las más australes se encuentran en el hundimiento sur del área El Mangrullo. En el flanco occidental se identificaron en la sísmica 3D de Las Tacanas (Actualmente áreas Aguada de Castro / Santo Domingo I, Figura 8) y en sísmica 2D en el área Cerro Arena. En el flanco oriental fueron observadas en la sísmica 3D de Parva Negra y en sísmica 2D en el borde occidental del área Aguada Pichana (Figura 1). Figuras de este tipo han sido observadas en la Cuenca Neuquina en el área Agua del Cajón (Connolly, *et al.*, 2002) así como en otras zonas de la Dorsal de Huincul. A partir de la sísmica 2D se hace más difusa e incierta la detección, ya que algunos problemas de registración pueden resultar en anomalías similares. Sin embargo, estudios geoquímicos sobre algunas de las anomalías han mostrado la relación espacial entre éstas y las anomalías sísmicas.

En el cubo sísmico de Las Tacanas se pudieron describir las principales características y la geometría tridimensional de las anomalías (Figura 8). Se destacan por la falta de coherencia de los reflectores, lo cual oblitera casi por completo el carácter de los horizontes sísmicos guía, en general desde niveles del Gr Cuyo hasta superficie, y en algunos casos a partir de niveles basales de la Fm Auquilco hasta superficie. La zona de “ruido” se caracteriza por tener un ancho de centenas de metros hasta algunos kilómetros, en general con forma de embudo (Figura 7 y 8). Se extienden en sentido Norte-Sur entre pocos kilómetros hasta más de 20 km. Cuando se presentan algunos reflectores continuos, los mismos muestran una caída estructural aparente (“*velocity sag*”). Estas características permiten asociarlos a “chimeneas de gas”, las cuales debido a la alta saturación de gas localizada en la chimenea, producen una menor velocidad de tránsito de la onda sísmica y la consecuente “pseudo-depresión estructural” (Figura 7, 8c y 8d). En varios casos, se observan cambios de espesor de Fm Auquilco en las zonas de raíz de las “chimeneas de gas”, como evidencias de una respuesta plástica a la deformación y a la inclinación progresiva del *DCH*. Esto generó estructuras distensivas por encima de las zonas de transferencia de volumen de la Fm Auquilco (Figura 8). A la latitud de Aguada Pichana, hacia el oeste del campo y en posición de cresta, se desarrollan estructuras compresivas que despegan en la Fm Auquilco con 20 a 35° y tienden a verticalizarse (Brinkworth *et al.*, 2011). Este tipo de estructuras afectan toda la columna cretácica alcanzando niveles subsuperficiales. Estas estructuras jugaron un papel clave para la fuga a superficie, ya que ocasionaron eventuales fallas en la integridad como sello de la Fm Auquilco conectando al sistema cuyano con el Gr Mendoza y la superficie.

DISCUSIÓN

En los párrafos siguientes se analizan los tres elementos claves en el proceso de fuga a superficie de los hidrocarburos: ¿Cuál es la fuente principal de los hidrocarburos fugados?, ¿Qué disparó la fuga de los hidrocarburos?, ¿Pudo haberse formado una trampa de gas y petróleo en niveles del Gr Neuquén, previo a su exhumación?.

Debemos considerar a las dos fuentes activas, las formaciones Vaca Muerta y Los Molles. Ambas rocas madres atravesaron las ventanas de petróleo y gas/condensado antes de la formación del *DCH*. Inclusive la Fm Los Molles atravesó la ventana de gas y alcanzó condiciones de sobre-maduración en algunos sectores. Además, se considera la potencial presencia de acumulaciones tipo “tight gas” en los grupos Cuyo Superior y Lotena, por debajo de la Fm Auquilco, las cuales pudieron perder la integridad de sus sellos.

Las acumulaciones descubiertas en el flanco oriental no parecen mostrar indicios de fugas considerables, ya que los reservorios se encuentran en condiciones de sobrepresión. Se considera poco probable que acumulaciones en la Fm Mulichinco hayan perdido la integridad de su sello, al menos en una escala tal que sea la fuente principal de las manifestaciones de superficie. Otra alternativa es la ruptura de la Fm Vaca Muerta, un potencial “*shale gas*” en la región, que pudo alcanzar su condición máxima de sobrepresión y se comportó de manera predominantemente frágil al producirse el levantamiento del *DCH*. Varias de las “chimeneas de gas” observadas tienen aparentemente su raíz en niveles por debajo de Fm Vaca Muerta, por lo que si bien esta pudo aportar parte de los hidrocarburos fugados, tal vez no fue el aporte de mayor importancia.

Al analizar a la Fm Los Molles encontramos varios factores que pueden ser cruciales para el proceso de fuga a superficie. Se estima que alcanzó mayormente la ventana de gas tardía hace más de 90 Ma. Sin embargo, gran parte de los hidrocarburos generados pudo permanecer *in situ* debido al escaso desarrollo de “*carrier beds*” y la presencia de un sello de gran integridad en su techo. Esto pudo resultar en un nivel de sobrepresión considerable. Otro factor clave a tener en cuenta es que el nivel de soterramiento del Gr Cuyo Inferior fue de al menos 7 km, alcanzando un alto grado de consolidación y diagénesis atravesando incluso el límite dúctil-frágil en las secciones arcillosas (Corcorán *et al.*, 2002). Al producirse la exhumación, la presión litostática va disminuyendo, mientras que la presión poral permanece “encapsulada” generando sobrepresión. Cuando la presión poral está próxima a la presión litoestática se produce la fuga por fracturación hidráulica natural (“*hydraulic leakage*”, Corcorán *et al.*, 2002).

El inicio de las chimeneas se asocia a la deformación de las evaporitas de la Fm Auquilco junto a la fracturación hidráulica por sobrepresión del Gr Cuyo. Esto disparó fugas predominantemente de gas que circularon por zonas de fractura y las secciones de baja permeabilidad de las secuencias Vaca Muerta-Quintuco y Mulichinco para finalmente migrar por las secciones permeables de la Fm Agrio-Centenario y Gr Neuquén. El pasaje de estos fluidos a través de Vaca Muerta

pudo incorporar gases y líquidos, proveyendo de más hidrocarburos en fuga.

El levantamiento del *DCH* en el Oligoceno Superior-Mioceno disparó la migración a superficie. Tanto para el caso de Fm Vaca Muerta y principalmente para el caso de Fm Los Molles no se descarta que se haya producido brechamiento tectónico (“*tectonic breaching*”, descrito en Corcorán *et al.*, 2002). La sísmica estudiada muestra una mayor frecuencia de chimeneas en el flanco oeste, siendo este flanco el más inclinado y fallado, lo cual promueve este proceso. Además, se observa una considerable reducción de espesor de la Fm Auquilco en el flanco oeste del *DCH* (Figuras 3 y 8), el cual es compensado luego por un espesamiento de la Fm Tordillo. Si bien el conjunto Auquilco-Tordillo a través del *DCH* mantiene un espesor homogéneo, el brusco cambio de espesor de Fm Auquilco la hizo menos íntegra como sello y pudo también ser el disparador de fallas.

Cabe mencionar además la actividad magmática terciaria que acompañó la tectónica andina. Esta se extendió desde el Eoceno hasta el Pleistoceno. Los filones gábricos y sieníticos de Aguada San Roque, unos 40 km al este de la zona de estudio tienen edades de 1.2 – 2.4 Ma (González *et al.*, 2005). Esta actividad magmática es la principal responsable de la presencia de CO₂ (Rooney *et al.*, 1999), el cual va incrementando su concentración hacia el norte paulatinamente, tendencia que se mantiene incluso fuera del *DCH*. Los citados autores interpretan que el CO₂ ingresó a los reservorios de Fm Mulichinco con posterioridad al arribo de los hidrocarburos. Debe considerarse el aporte de gases mantélicos como potencial partícipe, y disparador en algunos sectores, del proceso de migración terciaria descrito.

El *DCH* a nivel de las formaciones Centenario y Mulichinco presenta entre 200 y 1000 km² de área de cierre, unos 200 m de cierre vertical mínimo. Al momento de las fugas, el Gr Neuquén se disponía con una geometría muy similar, poseía muy buenos reservorios (Fm Huincul) y potenciales sellos (Fm Cerro Lisandro). Sin embargo, estaba en el mejor de los casos a pocos centenas de metros, o bien exhumado. Esta situación pudo haber dificultado el entrapamiento, acumulación y preservación de las grandes columnas de gas que estaban migrando. De haber existido una “paleo-acumulación”, ésta fue exhumada en el mismo proceso neógeno descrito.

CONCLUSIONES

La presencia en superficie de bitumen en secuencias rojas decoloradas y su coexistencia con minerales de alteración ricos en cobre son evidencias de procesos de migración terciaria de los hidrocarburos.

El proceso de fuga se habría producido en el intervalo Oligoceno Superior-Mioceno, durante el pulso más intenso de levantamiento del *DCH* y la ruptura de sellos en distintas posiciones. La distribución de los residuos bituminosos (en tubos, parches, diseminados, etc.) revelan que la sección aflorante funcionó como una vía de migración vertical y lateral somera.

Las anomalías sísmicas, tipo nube gaseosa y chimeneas de gas, presentan raíces profundas desde niveles basales del Gr Cuyo. Estas figuras se conectan con evidencias de hidrocarburos en superficie, lo cual demuestra el proceso de migración terciaria.

La ruptura de sellos regionales (Fm Auquilco) conectó los niveles sobrepresionados del Gr Cuyo con el Gr Neuquén. Las fugas registradas corresponderían principalmente a hidrocarburos generados en Fm Los Molles, y es muy probable la incorporación de hidrocarburos del Gr Mendoza, tanto de Fm Vaca Muerta como de los reservorios de Fm Mulichinco.

La Fm Huincul actuó como “*carrier*” somero hacia el eje del *DCH*. Las posiciones de cresta se encuentran a unos 12-18 km al oeste de los afloramientos actuales del frente de alteración de la Fm Huincul. La parte más alta de la estructura a nivel de la Fm Huincul está actualmente erosionada, su exhumación habría tenido lugar en el Mioceno, entre los 25 y los 14 Ma. (Zamora Valcarce *et al.*, 2009). Se estima que al momento de la fuga, este conjunto “*carrier*”-sello estaban muy someros ó quizás exhumados como para formar una gran acumulación de gas en la cresta.

La extensión de más de 100 km del frente de alteración de la Fm Huincul y los más de 500 km² de cierre estructural del *DCH*, implican la circulación de grandes volúmenes de hidrocarburos. Si bien estos volúmenes fueron expulsados a superficie, deben ser considerados cuando modelamos la comarca.

AGRADECIMIENTOS

A la Subsecretaría de Minería e Hidrocarburos de la Provincia de Neuquén por la disponibilidad de los datos usados. A Silvia Tejada, Lucía Ruzzycki y Pablo Anci del Gabinete de Hidrocarburos de la UNSJ.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|--|---|
| <p>Astesiano, D., C. Bernhardt y A. Ortiz, 2008, Reservoir characterization of gas bearing Mulichinco Sandstone using NMR, VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, p. 225-244, IAPG, Mar del Plata, Argentina.</p> <p>Beitler, B., W. T. Parry y M. A. Chan, 2003, Bleaching of Jurassic Navajo Sandstone on Colorado Plateau Laramide highs: Evidence of exhumed hydrocarbon supergiants?, <i>Geology</i>, v. 31, p. 1041-1044.</p> | <p>Beitler, B., W. T. Parry y M. A. Chan, 2005, Fingerprints of fluid flow: Chemical diagenetic history of the Jurassic Navajo Sandstone, southern Utah, <i>Journal of Sedimentary Research</i>, v. 75, p. 457-561.</p> <p>Brinkworth, W., F.A. Pose y A. Gangui, 2011, Rasgos estructurales del subsuelo en el área Aguada Pichana, Provincia de Neuquén, VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, p. 619-628, IAPG, Mar del Plata, Argentina.</p> |
|--|---|

- Burden, E., E. Gillis y E. French, 2005, Tectonostratigraphy and exhumed Blow me Down Brook Formation hydrocarbon reservoir, Sluice Brook, Western Newfoundland. Current Research Newfoundland and Department of Natural Resources, Geological Survey Report 05-1. 63-71.
- Chan, M. A., W. T. Parry y J. R. Bowman, 2000, Diagenetic Hematite and Manganese Oxides and Fault-Related Fluid Flow in Jurassic Sandstones, Southeastern Utah, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 84, p. 1281-1310.
- Chebli, G., H. Mendiberri, A. Giusiano, G. Ibáñez y J. Alonso, 2011, El shale gas en la Provincia del Neuquén, VIII Congreso de exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, p. 669-692, Mar del Plata, Argentina.
- Cobbold, P., G. Ruffet, L. Leith, H. Loseth, N. Rodrigues, O. Galland y H. Leanza, 2011, Combustibles Sólidos, en H. A. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, J.C. Danieli y J. M. Vallés (eds.), Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino, p. 689-698, Neuquén, Argentina.
- Connolly, D., R. García, 2002, Tracking hydrocarbon seepage in Argentina's Neuquén Basin, World Oil Magazine, Junio 2002, p.101-104.
- Corcoran, D.V. y A.G. Doré, 2002, Depressurization of hydrocarbon-bearing reservoirs in exhumed basin settings: evidence from Atlantic margin and borderland basins, en A. G. Doré, J. A. Cartwright, M. S. Stoker, J. P. Turner N. y White (eds), Exhumation of the North Atlantic Margin: Timing, Mechanisms and Implications for Petroleum Exploration, Geological Society, London, Special Publications 196, p. 457-483.
- Cristallini, E.O., J. M. Martínez, E. Sánchez, S. Periale Gómez y A. Loncarich, 2005, Evaluación estructural del bloque Bandurria (Provincia del Neuquén, Argentina): YPF, (unpublished), p. 1-73.
- England, W., 1994, Secondary Migration and Accumulation of Hydrocarbons. The petroleum system, American Association of Petroleum Geologists Memoir 60, p. 211-217.
- Garden, I.R., S. C. Guscott, S. D. Burley, K. A. Foxford, J. J. Walsh, y J. Marshall, 2001, An exhumed palaeo-hydrocarbon migration fairway in a faulted carrier system, Entrada Sandstone of SE Utah, USA, Geofluids, v. 1, p. 195-213.
- González, R., F. Achilli y A. Chiappero, 2005, Entrampamiento en rocas ígneas en el centro de la Cuenca Neuquina, Simposio "Las Trampas de Hidrocarburos en las Cuencas Productivas de Argentina", VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, IAPG, N°p., Mar del Plata, Argentina.
- Giusiano, A., y E. Bouhier, 2009, Mineralización de Cu en el Grupo Neuquén vinculada a la migración de hidrocarburos. Dorso de los Chihuidos, Neuquén, Argentina, Boletín de Informaciones Petroleras, Cuarta Época, Año 5, N°11, p. 6-18.
- Giusiano, A., M. Franchini, A. Impicini y S. O'Leary, 2006, Mineralización de Cu asociada a bitumen en las areniscas cretácicas, prospecto Barda González, Neuquén, Argentina, XI Congreso Geológico Chileno, Actas 2, p. 255-258.
- Giusiano, A., M. B. Franchini, A. Impicini, y M. J. Pons, 2008, Mineralización de Cu en sedimentitas Mesozoicas del Grupo Neuquén y hábitat de los hidrocarburos en la Dorsal de Huincul, Neuquén, XVII Congreso Geológico Argentino, Actas 2, p. 769-770, Jujuy, Argentina.
- Leanza, H., 2003, Las sedimentitas Huitrinianas y Rayosianas (Cretácico Inferior) en el ámbito central y meridional de la Cuenca Neuquina, Argentina, Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas, Geología 2, p. 1-31, Buenos Aires.

- Leanza, H., y C. Hugo, 2001, Cretaceous beds from southern Neuquén Basin (Argentina): age, distribution and stratigraphic discontinuities, VII International Symposium on Mesozoic Terrestrial Ecosystems, Asociación Paleontológica Argentina, Special Publication 7, p. 117-122.
- Legarreta, L. y C. Gulisano, 1989, Análisis estratigráfico secuencial de la cuenca neuquina (Triásico superior- Terciario Inferior), en Chebli G. A. y L. A. Spalletti (eds.), Cuencas sedimentarias argentinas, Serie correlación geológica N° 6, p. 221-243, Instituto Superior de correlación geológica, Universidad Nacional de Tucumán.
- Maretto, H. y F. Pángaro, 2005, Edad de formación de algunas de las grandes estructuras del engolfamiento de la Cuenca Neuquina: Actividad tectónica durante la depositación de la Fm Quintuco, VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos, IAPG, N°p., Mar del Plata, Argentina.
- Messenger, G., B. Nievère, J. Martinod, P. Lacan y J.P. Xavier, 2010, Geomorphic evidence for Plio-Quaternary compression in the Andean foothills of the southern Neuquén Basin, Argentina, *Tectonics*, v. 29, TC4003, doi:10.1029/2009TC002609.
- Mosquera, A., y V. A. Ramos, 2006, Intraplate deformation in the Neuquén Embayment, en S. M. Kay y V. A. Ramos (eds.), Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat), Geological Society of America, Special Paper 407, p. 97-123.
- Parry, W. T., M. A. Chan y B. Beitler, 2004, Chemical bleaching indicates episodes of fluid flow in deformation bands in sandstone, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 88, N°2, p. 175-191.
- Parry, W. T., M. A. Chan y B. P. Nash, 2009, Diagenetic characteristics of the Jurassic Navajo Sandstone in the Covenant oil field, central Utah thrust belt, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 93, N°8, p. 1039-1061.
- Piovesanel, E., G. Godino, D. Coulon y M. Sainz-Trápaga, 2008, Use of acoustic impedance in the exploration and development of a gas field: Aguada Pichana Norte case study, VII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos p. 75-88, IAPG, Mar del Plata, Argentina.
- Pons, M. J., M. B. Franchini, A. Giusiano, A. Impiccini, y M. Godeas, 2009, Alteraciones, mineralización de Cu y Bitumen en areniscas Cretácicas del Prospecto Barda González, Neuquén, Argentina, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, v. 64:3, p. 321-333.
- Rooney, M., S. Valente, A. Vuletich y C. Rennison, 1999, CO2 origin and reservoir compartmentalization in the Sierra Chata Field, Neuquen Basin, Argentina, AAPG Hedberg Research Conference, "Natural Gas Formation and Occurrence", June 6-10, 1999, Durango, Colorado.
- Rainoldi, A. L., M. B. Franchini, N. N. Cesaretti, A. Impiccini, y M. J. Pons, 2012a, Alteración y decoloración de areniscas rojas, Formación Huincul (Grupo Neuquén). Evidencias de la circulación de hidrocarburos en el Dorso de los Chihuidos (Resumen), XIII Reunión Argentina de Sedimentología, p. 183-184, Salta, Argentina.
- Rainoldi, A., C. Limarino, A. Giusiano y E. Bohuier, 2012b, Análisis estratigráfico de la Formación Huincul (Grupo Neuquén) en el prospecto Sapo Sur (37°47'S-69°27'O), Dorso de los Chihuidos, Provincia de Neuquén (Resumen), XIII Reunión Argentina de Sedimentología, p. 185-186, Salta, Argentina.

- Rainoldi, A., M. Franchini, D. Beaufort, P. Patrier, A. Giusiano, A. Impiccini y M. J. Pons, 2014, Large-scale bleaching of red beds related to upward migration of hydrocarbons: Los Chihuidos High, Neuquén Basin, Argentina, *Journal of Sedimentary Research*, 2014, v. 84, p. 373–393. DOI: <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.2014.31>
- Rojas, G., 2011, Recursos nucleares, H. Leanza, en H. A. Leanza, C. Arregui, O. Carbone, J.C. Danieli y J. M. Vallés (eds.), *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén, Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino*, p. 821–824, Neuquén, Argentina.
- Ronney, M., S. Valente, A. Vuletich y Ch. Rennison, 1999, CO₂ origin and reservoir compartmentalization in the Sierra Chata Field, Neuquén Basin, Argentina, AAPG Hedberg Research Conference, Natural Gas Formation and Occurrence, 3p, Durango, Colorado.
- Schöner, R., y R. Gaupp, 2005, Contrasting red bed diagenesis: the southern and northern margin of the Central European Basin, *International Journal of Earth Sciences*, v. 94, p. 897–916.
- Simon, P. y A. Whitham, 1997, Exhumed Hydrocarbon Traps in East Greenland: Analogs for the Lower-Middle Jurassic Play of Northwest Europe. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 81, N°. 2, p. 196–221.
- Zamora Valcarce, G., T. Zapata, D. del Pino y A. Ansa, 2006, Structural evolution and magmatic characteristics of the Agrio fold-and thrust belt, en S. M. Kay y V. A. Ramos (eds.), *Evolution of an Andean margin: A tectonic and magmatic view from the Andes to the Neuquén Basin (35°-39°S lat)*, Geological Society of America, Special Paper 407, p. 125-145.
- Zamora Valcarce, G., A.E. Rapalini y C.M. Spagnuolo, 2007, Reactivación de estructuras cretácicas durante la deformación miocena, Faja plegada del Agrio, Neuquén, *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62(2), p. 299-307.
- Zamora Valcarce, G., T. Zapata, V. Ramos, F. Rodríguez y L. Bernardo, 2009, Evolución tectónica del frente andino en Neuquén, *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (1), p. 192-203.