

SISTEMA DE PETRÓLEO NO CONVENCIONAL RELACIONADO CON LACOLITOS EOCENOS DE INTRAPLACA. ÁREA ALTIPLANICIE DEL PAYÚN, CUENCA NEUQUINA

Daniel Delpino¹, Adriana Bermúdez², Néstor Vitulli³, Christian Loscerbo⁴

1: daniel.delpino@ypf.com

2: delpinus3@speedy.com.ar

3: nvitulli@unsa.edu.ar

4: estudiosgeologicos@speedy.com.ar

Keywords: laccoliths, hydrocarbons, fractures, alkaline, intraplate

ABSTRACT

Unconventional petroleum system related with eocene intraplate laccoliths

In this paper the elements and processes of a non-conventional petroleum system is described. This system includes participation of a set of laccoliths, forming the “Altiplanicie del Payún” field in the Neuquén Basin platform region.

By using 3D seismic interpretation we identify, for the first time, the domical structures generated by laccoliths and the syn-intrusive complex fracture system, which include radial, concentric and polygonal fractures. Intrusive bodies are classified according to their diameter to height ratio, as “low laccoliths” (high diameter / height ratio) and “high laccoliths” (low diameter / height ratio).

Their geochemical composition is coherent with types of laccoliths: low laccoliths are trachytic (60% SiO₂) and the high laccoliths are rhyolitic (73% SiO₂). Trace and rare earth elements contents classify these rocks as alkaline rocks, generated by an intraplate environment. The age of the magmatic event was determined by dating rocks with ⁴⁰Ar/³⁹Ar as 46-49 Ma that is Eocene age.

The emplacement control was transtensional areas related to high order transcurrent faults.

Petroleum System includes generation by heat transfer from laccoliths towards black shales on Vaca Muerta and Agrio Formations, immature in Eocene times.

Syn-intrusive radial fracturing systems favored primary and secondary migration outward from the intrusive bodies. Hydrothermal convective cells and concentric faults facilitated the return of hydrocarbons to sectors in laccoliths with porosity and permeability to act as reservoirs in the last stages of cooling.

INTRODUCCIÓN

La geología de superficie de la plataforma del sector mendocino de la Cuenca Neuquina, incluye Centros Volcánicos de edad terciaria. Entre los productos asociados a estos centros, predominan los conjuntos de coladas de composición básica que superan en ocasiones los 300 m de potencia. Estos afloramientos forman la unidad morfológica conocida como Altiplanicie del

Payún y su límite occidental Bordo Alto del Payún, (Figura 1).

En subsuelo, por debajo de las rocas volcánicas terciarias se encuentra la clásica columna estratigráfica que incluye las unidades del relleno jurásico – cretácico de la Cuenca Neuquina pero intruídas en distintos niveles por rocas ígneas (Figura 2).

La asociación de cuerpos ígneos intrusivos en forma de lacolitos que generan estructuras dómicas que alojan hidrocarburos en volúmenes comerciales, es conocida en cuencas sedimentarias localizadas en distintos ambientes geotectónicos. Destaca, por su producción de gas, una estructura que ha producido 7,3 TCF en Lousiana, EEUU (Zimmerman y Sassen, 1993) y el campo Casiano, México, dónde el flanco de una estructura dómica acumuló 34 Mbbl de petróleo (Ordóñez, 1915).

En Argentina la primera mención de producción de gas en una estructura generada por un lacolito, la cual acumuló 9 BCF de gas, corresponde a la Cuenca del Golfo San Jorge, Ugarte (1966). El lacolito de Chihuido de la Sierra Negra (Estudios Geológicos, 2001; Comeron *et al.*, 2002) lleva acumulado desde 1993 hasta el presente 8 Mbbl de petróleo.

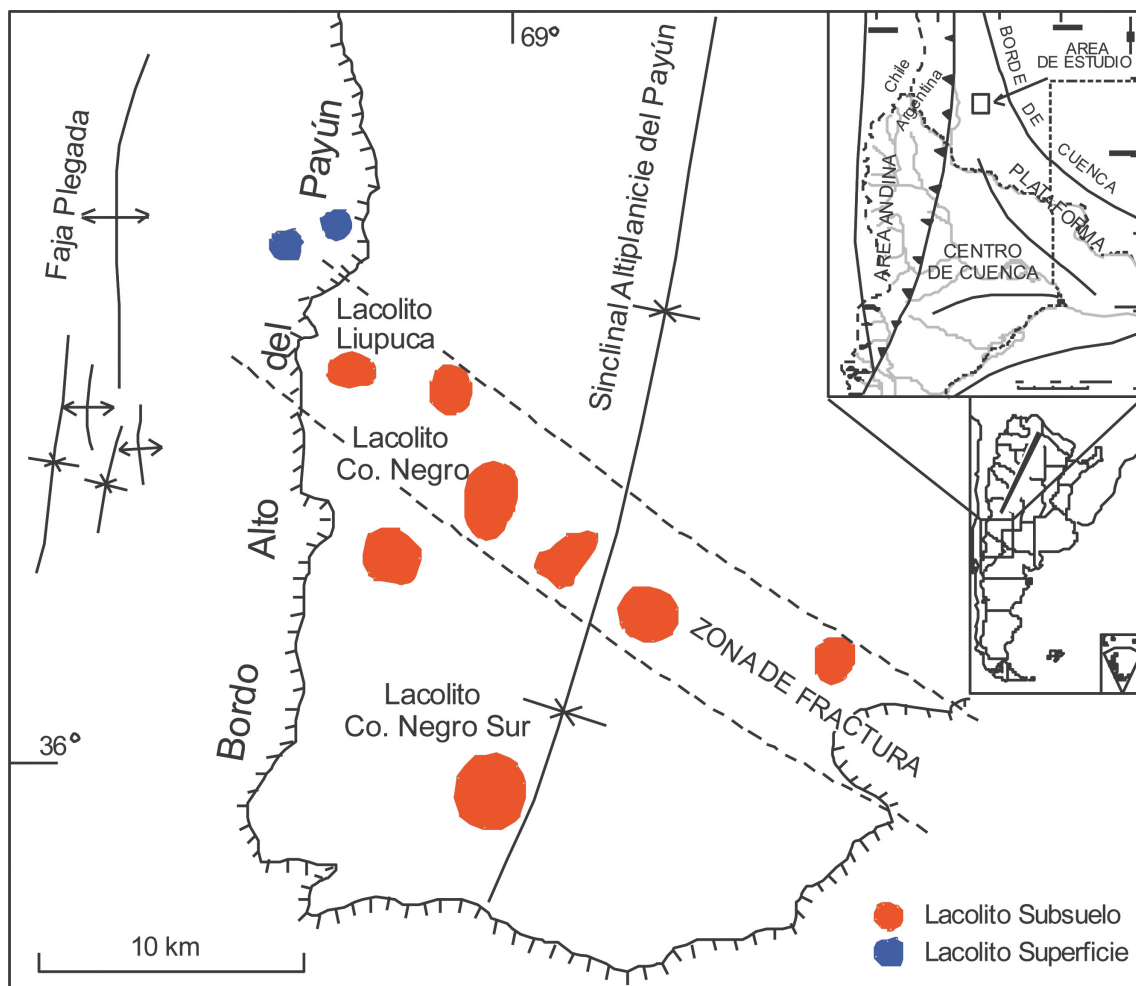


Figura 1. Mapa de ubicación del área y de los lacolitos estudiados en superficie y subsuelo.

En este trabajo se describen un conjunto de lacolitos de edad Eocena intruidos en unidades del Cretácico Inferior en el sector denominado Altiplanicie del Payún (Figura 1). Estos han acumulado hasta la actualidad, aproximadamente 3 Mbbl de petróleo formando sistemas de petróleo no convencionales. Se definen los elementos de estos sistemas de petróleo y los procesos relacio-

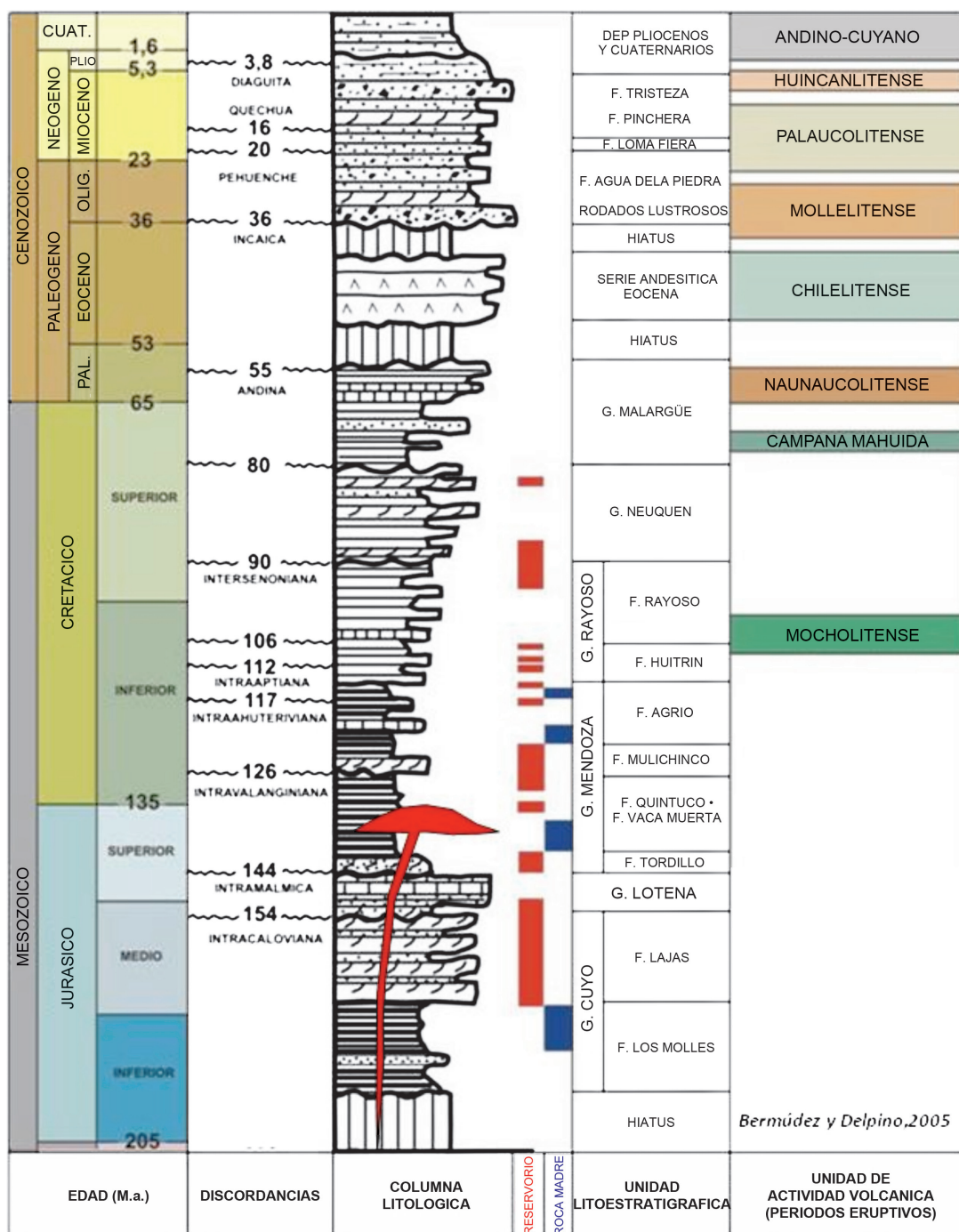


Figura 2. Cuadro estratigráfico mostrando las unidades que componen la columna sedimentaria, el nivel de intrusión de los lacolitos y los distintos Períodos Eruptivos desarrollados en la Cuenca Neuquina. El evento ígneo en el Área Altiplanicie del Payún formaría parte del Período Eruptivo Chilelítico (Modificado de Bermúdez y Delpino, 2005).

nados con la generación, migración y entrapamiento.

Se describe y clasifica a los lacolitos de acuerdo a su morfología. A su vez, se describen por primera vez las estructuras generadas y los complejos sistemas de fracturación sin-intrusivos utilizando sismica 3D.

Se analiza su formación y localización en el contexto regional utilizando geoquímica de roca de alta precisión. Especialmente, se data radimétricamente el evento magmático-tectónico que favoreció su generación y emplazamiento.

Además se caracteriza la influencia de su composición lito-geoquímica en las distintas morfologías de los cuerpos.

CARACTERÍSTICAS DE LOS LACOLITOS

Originalmente los lacolitos han sido definidos como cuerpos intrusivos que han deformado en forma de domo los estratos entre los cuales se ha insertado (Gilbert, 1880). La base es generalmente plana (Figura 3). En planta tienen forma circular o elíptica. Los conductos de alimentación tienen forma tabular o diqueforme.

Son cuerpos intrusivos de “niveles altos de la corteza”, es decir que sus paleo-profundidades de intrusión varían desde pocos metros por debajo de la superficie hasta generalmente profundidades menores a los 5000 m. Estas profundidades se corresponden en general con aquellas de las Cuencas Sedimentarias.

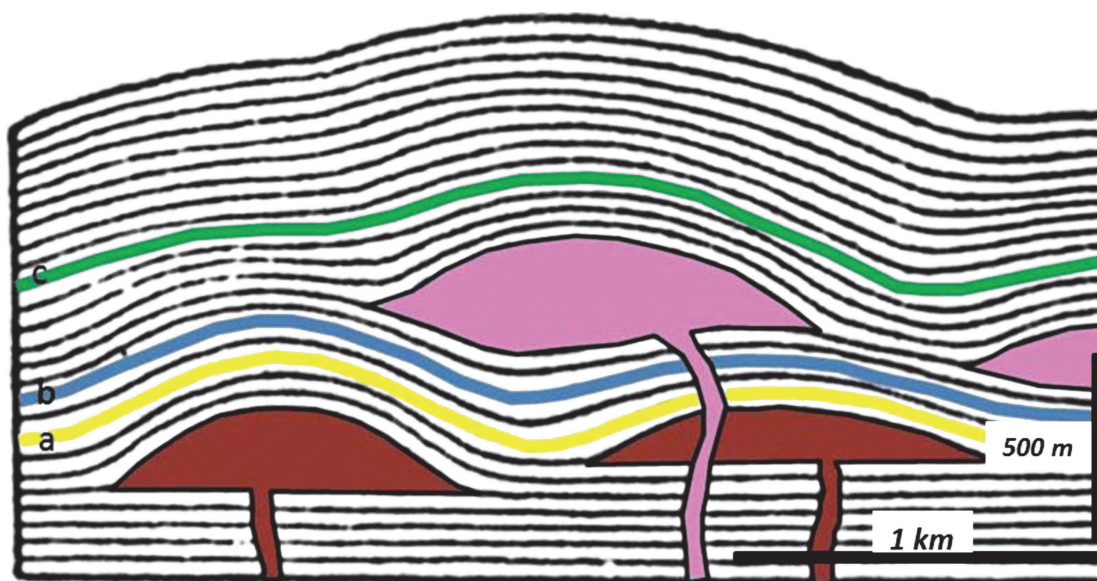


Figura 3. Conjunto de lacolitos intrusivos en dos fases tal como fueron originalmente definidos por Gilbert; (1880). Se han resaltado las superficies estructurales a, b y c de las unidades localizadas por sobre el techo de los mismos para visualizar las variaciones laterales en trechos cortos y la generación de estructuras sin-intrusivas donde a los sinclinales de la superficies a y b se superpone un anticlinal de la superficie estructural c. Las escalas son aproximadas.

Este tipo de cuerpos ígneos se caracterizan por generar su propio espacio deformando las rocas de caja. En ocasiones son sin-volcánicos es decir, se intruyen en el mismo ciclo eruptivo que genera actividad volcánica en superficie.

La viscosidad, y por consiguiente la composición química del magma, influye directamente en el diámetro y la altura que alcanzan.

Los magmas ácidos y mesosilícicos por su relativamente alta viscosidad original son los que al alcanzar su nivel de intrusión tienden a formar lacolitos.

La relación diámetro/altura se utiliza en este trabajo para la clasificación morfológica en dos tipos: 1) lacolitos “bajos”, con alta relación diámetro/altura, frecuentemente entre 5 y 10 o mayores; y 2) lacolitos “altos” con bajas relaciones diámetro/altura usualmente menores a 5. Los lacolitos “altos” se corresponden con los “*punched*” lacolitos de Gilbert; (1880) y los “bismalitos” de Iddings; (1898). En la Figura 4 se han graficado los tipos identificados en el campo de lacolitos Altiplanicie del Payún.

EXPRESIÓN SÍSMICA

La geometría de los lacolitos no puede ser reconstruida fácilmente utilizando la interpretación sísmica 3D. La expresión sísmica de los cuerpos lacolíticos generalmente es una zona de “ruido” caracterizada por reflectores difusos con inclinaciones variables y poca continuidad. Los con-

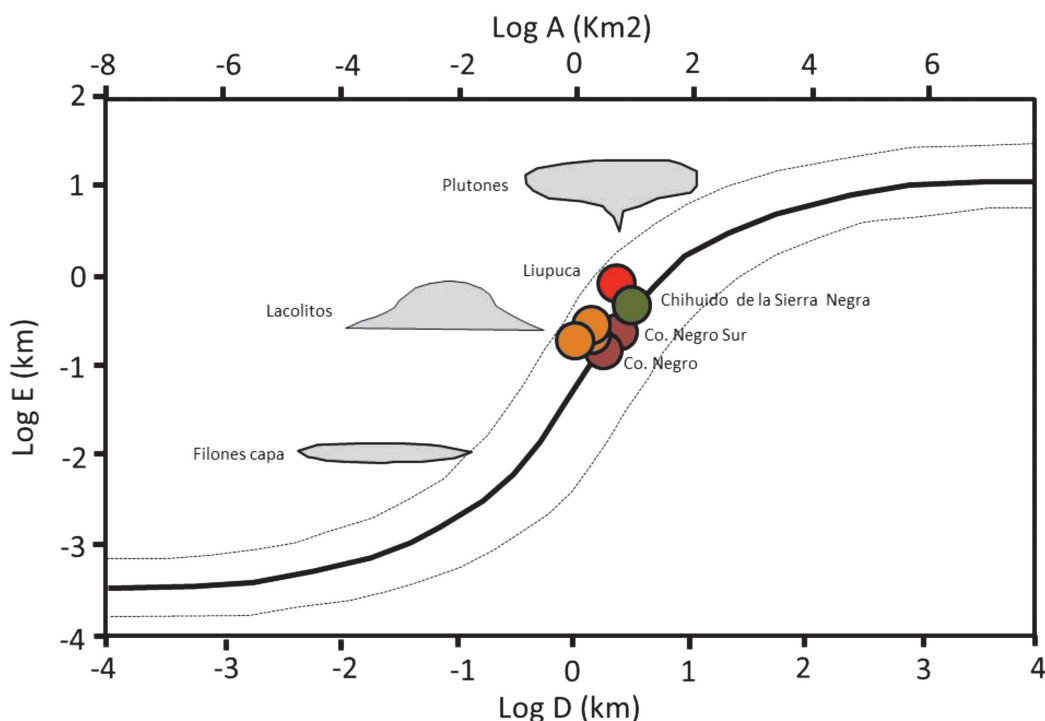


Figura 4. Relación Diámetro/Altura y Área de los distintos tipos de cuerpos intrusivos. El lacolito “alto” Liupuca (Círculo rojo) tiene 1,5 km de diámetro y 650 m de altura ($D/A = 2,31$). Los lacolitos “bajos” Co. Negro (Círculos marrones) y otros identificados (Círculos naranjas) poseen en promedio relaciones $D/A = 12$. Como referencia se ha incluido el Lacolito Chihuido de la Sierra Negra (Círculos verdes) ($D/A = 10$).

ductos de alimentación o “*feeders*” localizados por debajo de la base tampoco son identificables debido a que se expresan también por una zona con ruido (Figura 5).

En consecuencia, la visualización de cuerpos intrusivos en forma de lacolitos puede realizarse solamente en forma indirecta por el sistema de fracturación asociado y la estructura dómica que se genera en los estratos suprayacentes (Figura 6). En algunos casos el piso es reconocible cuando los reflectores vuelven a tomar la posición estructural anterior a la intrusión.

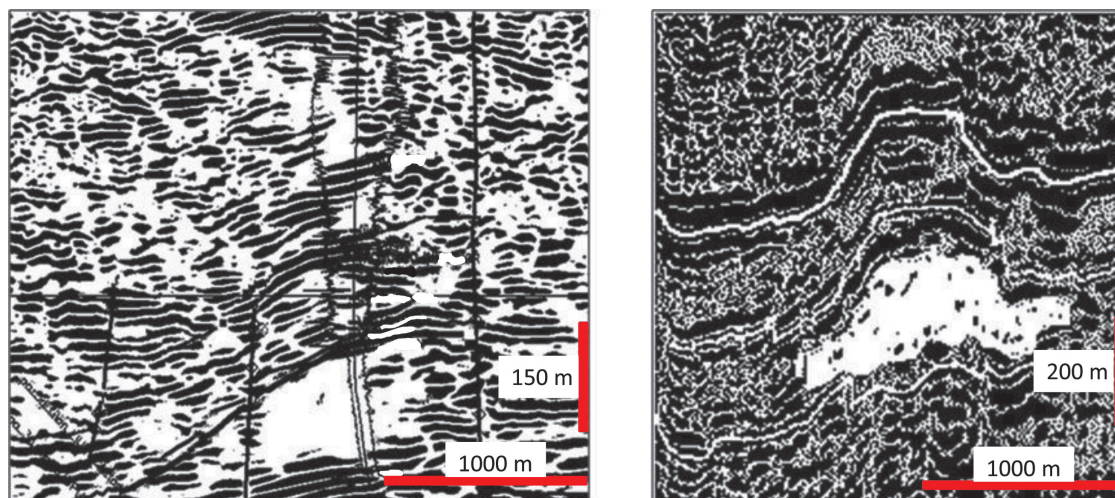


Figura 5. La posición de los lacolitos se reconoce por una zona de ruido sísmico y el arqueamiento de los reflectores localizados por encima del techo.

SISTEMAS DE FRACTURACIÓN SIN-INTRUSIVOS

Los sistemas de fracturación sin-intrusivos relacionados con lacolitos “altos” o “*punched*” fueron reconocidos tempranamente en afloramientos y es una característica que forma parte de la definición, esto es, desplazan por empuje en el techo y falla en los laterales las unidades en las cuales se han intruído. Los sistemas de fracturas sin-intrusivas relacionados con lacolitos “bajos” no han sido descriptas en afloramiento debido a que generalmente la observación del lacolito solo es posible cuando la cubierta de la roca de caja ha sido eliminada casi completamente por erosión particularmente sobre el techo del cuerpo intrusivo. Incluso la “ausencia de fallas” asociadas con los lacolitos “bajos” es sugerida en las clasificaciones clásicas de lacolitos (Corry; 1988).

Las estructuras generadas por los lacolitos en Altiplanicie del Payún fueron identificadas por primera vez por uno de los autores, (Vitulli; 2000 y Gavarrino *et al*; 2005). Con la utilización de la sísmica 3D se produce un verdadero “*plot point*” en la caracterización de los sistemas de fracturas sin-intrusivas asociadas con lacolitos “bajos”, al poder visualizar las secuencias suprayacentes conservadas.

Los sistemas de fracturas identificados en el campo de lacolitos Altiplanicie del Payún son similares a los modelos experimentales obtenidos en laboratorio para cuerpos ígneos que se intru-

yen a profundidades equivalentes (Walter y Troll; 2001), y son análogos también a los sistemas de fracturas generados por encima del techo de diapiros de sal activos (Hongwei y Groshong; 2007).

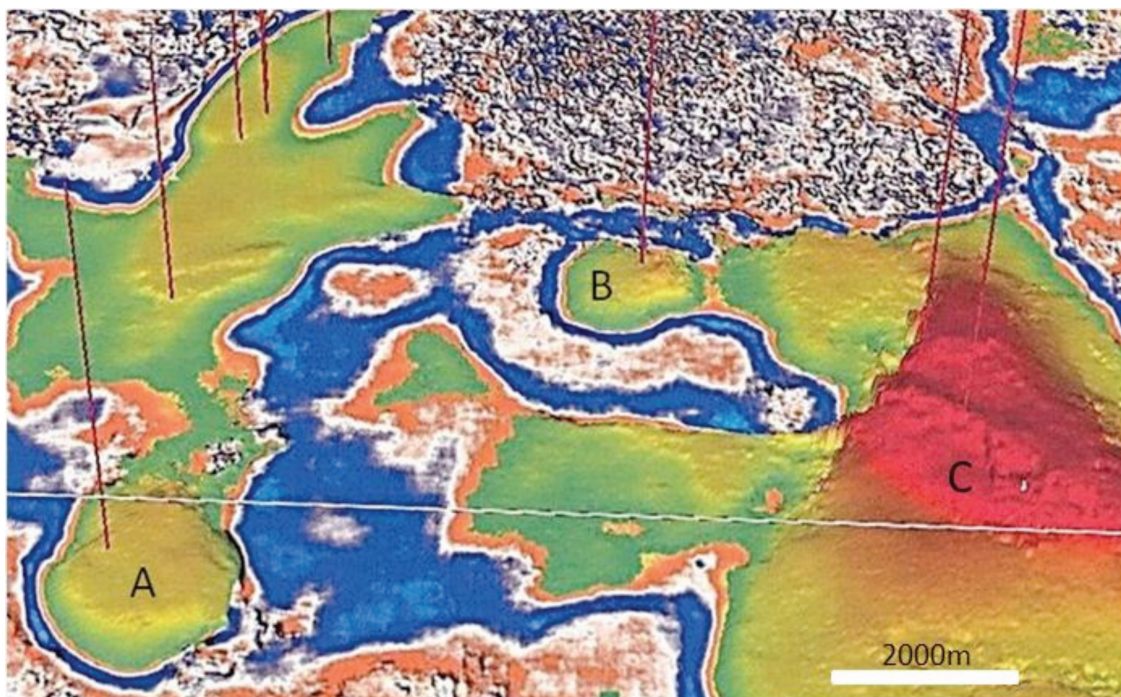


Figura 6. Superficie estructural al techo de una unidad suprayacente a los cuerpos lacolíticos combinada con un “time slice” del cubo sísmico mostrando el atributo amplitud+semblanza. Esta combinación permite visualizar las estructuras dómicas generadas por lacolitos intruidos en niveles estratigráficos inferiores. A y B lacolitos “bajos”; y C lacolito “alto”.

La secuencia espacial y los tipos de fracturas y fallas asociados con los lacolitos “bajos” del Campo Altiplanicie del Payún, se corresponden con los resultados experimentales obtenidos cuando se modela un cuerpo intrusivo que se expande durante la intrusión y que luego pierde volumen por enfriamiento o por el retiro parcial del magma originando una subsidencia leve del techo (Figura 7).

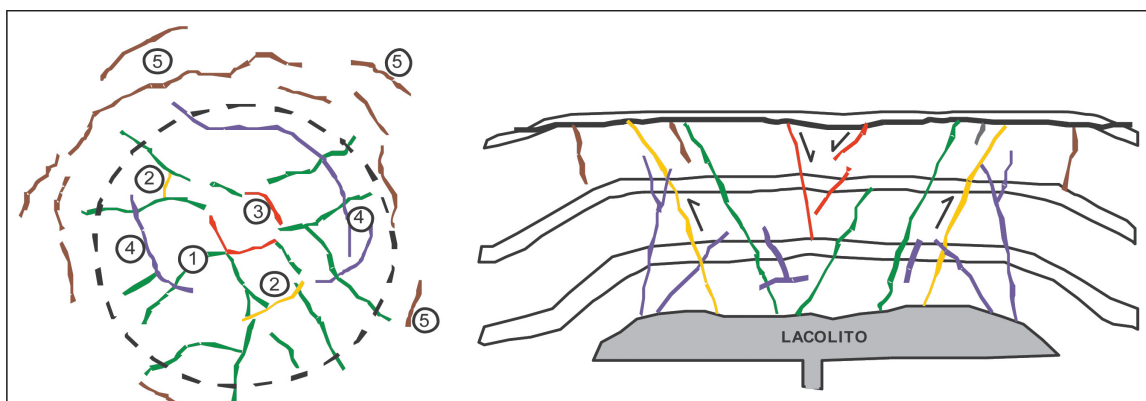


Figura 7. Sistemas de fracturas generadas a partir de la intrusión de un cuerpo en forma de lacolito con una leve subsidencia posterior, modificado y simplificado de Walter y Troll; (2007). Los números indican el orden cronológico de formación de las fracturas durante la intrusión. 1 (verde): Fracturas radiales; 2 (rosas): Fallas concéntricas inversas; y 3 (rojas): Fracturas en forma de “herradura” formando un graben apical. Durante la subsidencia se generan fracturas concéntricas de dos tipos: 4 (azules): en forma de campana y 5 (violeta): periféricas en “echelon” con inclinaciones variables.

Durante el primer estadio de domamiento magmático-estructural se produce la deformación de las superficies de las capas localizadas por encima de la parte apical del lacolito, generándose un sistema discontinuo de grietas sin-intrusivas que se propagan en forma divergente desde la parte central del cuerpo intrusivo hacia niveles estratigráficos superiores. En conjunto, conforman en planta, un sistema radial de fracturas discontinuas generado a partir de la zona más elevada del lacolito (Figura 7). Estas fracturas se propagan paralelamente al mayor esfuerzo compresivo y los desplazamientos son esencialmente normales a la superficie de ruptura dando lugar a fracturas tipo Modo I. La particularidad de este sistema es que a distancias diferentes del lacolito varían su diseño conformando en la vertical un sistema similar al “echelón”. Este sistema de fracturas que se genera en forma diferente en los distintos niveles estratigráficos, tiene en consecuencia variaciones temporales y espaciales (Figura 8).

Como resultado del “domamiento” causado por la intrusión, se han identificado aisladamente fracturas que combinan componentes extensionales con cizalla. Por sectores se reconocen como fallas inversas. Estas fracturas en planta se identifican por ser perpendiculares a las que componen el sistema radial formando un sistema concéntrico discontinuo (Figuras 8 y 9).

Este domamiento produce también una estructura de graben en la zona del ápice limitada por fallas normales de alto ángulo. En planta, el conjunto de fallas tiene forma poligonal o de “herradura” (Figura 9). Los diámetros de estas estructuras son siempre mucho menores al de los cuerpos intrusivos.

Cuando el cuerpo se enfría y/o se retira parcialmente el magma se origina una pérdida de volumen y se puede producir una subsidencia suave. Los distintos tipos de fracturas anulares con diseños concéntricos en planta se interpretan como relacionadas con estos procesos.

Los sistemas concéntricos son periféricos, discontinuos, de forma general en planta aproximadamente circulares (Figura 10). El de mayor diámetro puede exceder el diámetro del lacolito, y las fracturas poseen inclinaciones variables.

Los sistemas de fracturas sin-intrusivas descriptos se superponen arealmente, y se forman durante procesos esencialmente continuos que se desarrollaron desde el momento inicial de la intrusión finalizando cuando los lacolitos alcanzan el equilibrio térmico con las rocas de caja. En consecuencia, se genera una zona compleja de fallas y fracturas que destacan sobre las zonas adyacentes donde los reflectores son continuos y permiten reconocer la sucesión de unidades sedimentarias (Figuras 8, 9 y 10).

LITOLOGÍA

Del estudio y posterior comparación petrográfica y geoquímica de los lacolitos “bajos” Cerro Negro Sur, Cerro Negro, Cerro Negro Norte y el lacolito “alto” Liupuca (Estudios Geológicos,

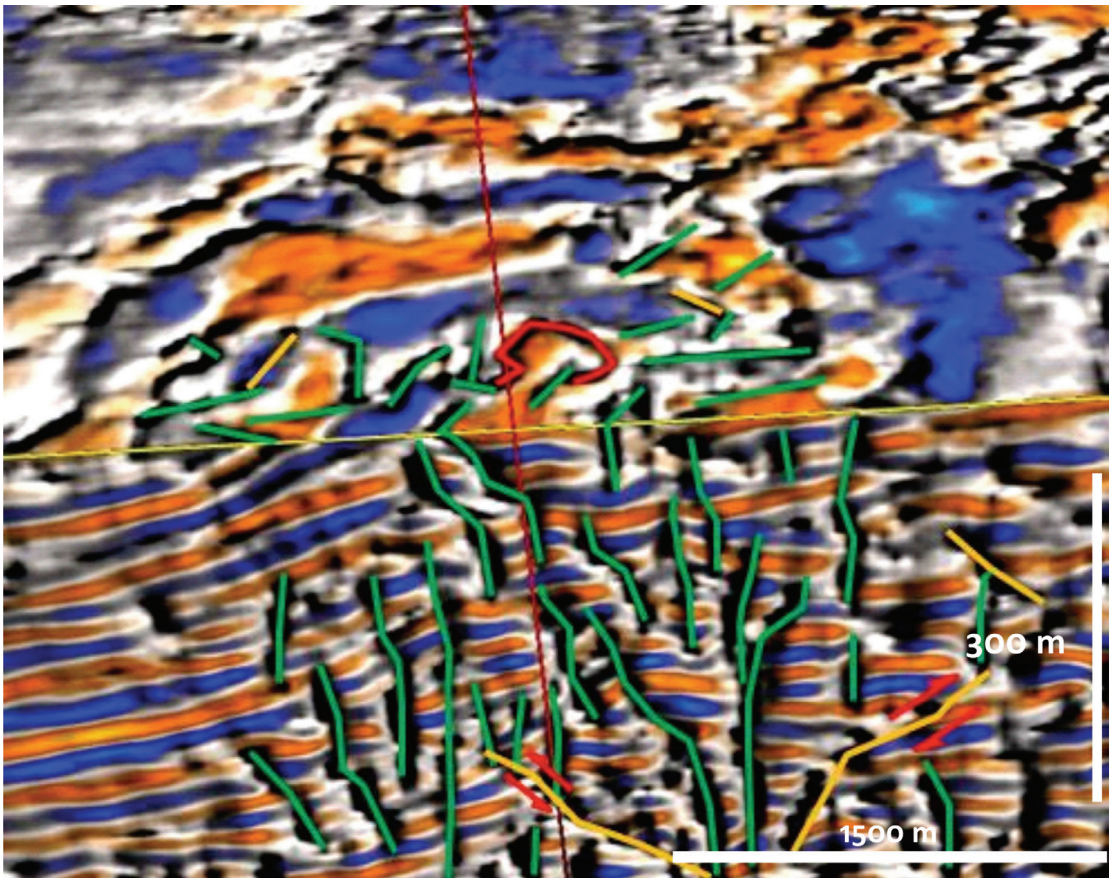


Figura 8. Detalle de bloque sísmico en horizontal y vertical que muestra el sistema radial de fracturas sin-intrusivas generado en la zona ubicada inmediatamente por encima del techo del lacolito (fracturas en verde). También se identifican fracturas-fallas (fracturas en naranja) y el desarrollo incipiente de las fracturas del graben apical (fracturas en rojo).

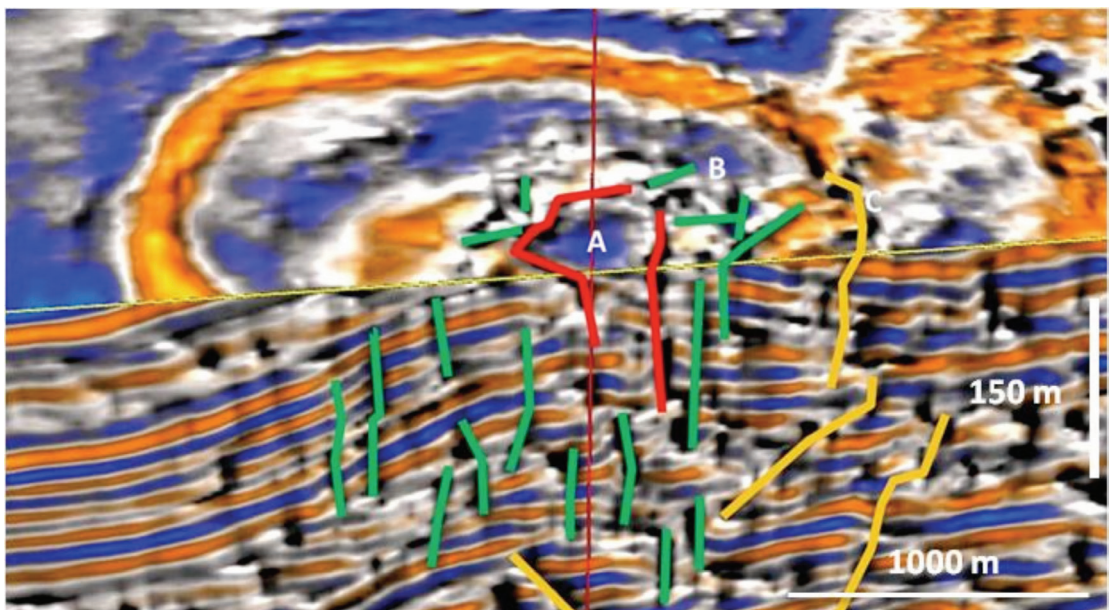


Figura 9. Aproximadamente 600 metros por encima del techo del lacolito se define claramente la estructura del graben apical (A). Se destaca la forma de herradura en planta por la combinación de las fracturas subverticales que lo rodean (rojo). (B) El sistema radial muestra menor densidad de fracturas (verde). Se identifican fracturas - fallas del sistema concentrico (naranja).

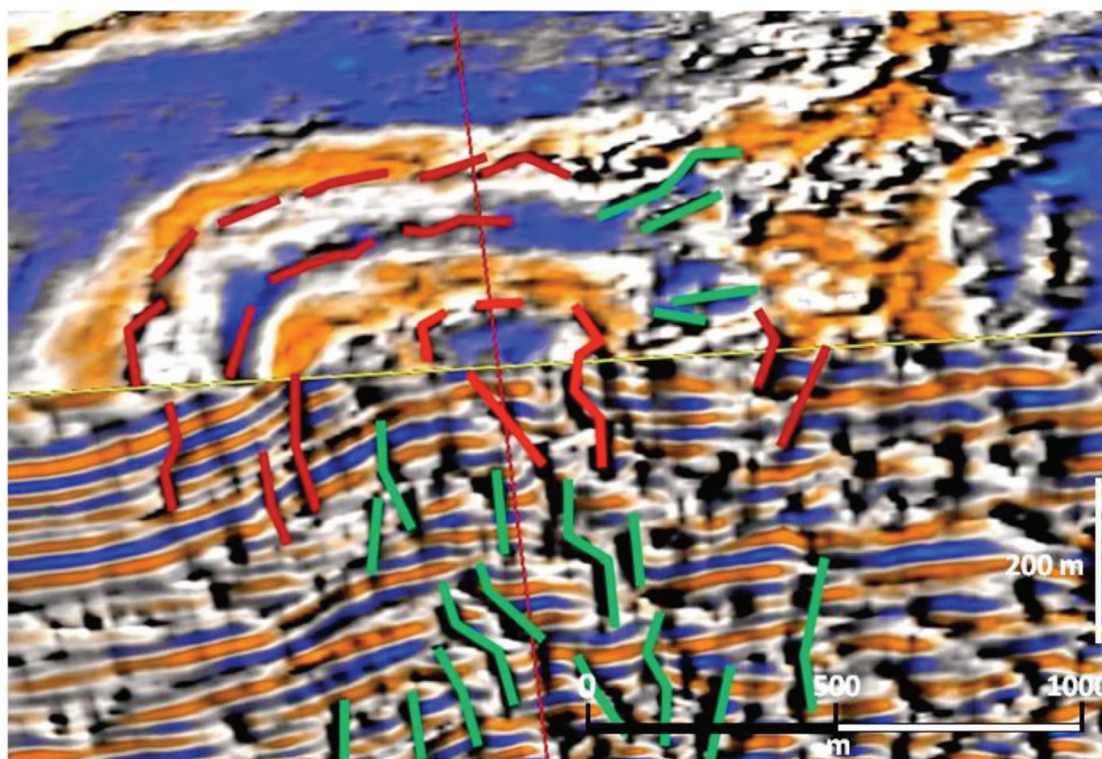


Figura 10. Sistema de fracturas concéntricas (marrón) El diseño es en “echelón” y el sistema más externo supera el diámetro del lacolito. Este tipo de fracturas se desarrolla aproximadamente 400 m. por encima del techo del lacolito. A esta distancia el desarrollo del graben apical es incipiente y el sistema radial presenta relativamente baja densidad de fracturas.

2002 a, 2002 b y 2006), se concluye que los tres primeros cuerpos intrusivos comparten características petrográficas similares en tanto que las rocas pertenecientes al “lacolito alto” Liupuca son ligeramente diferentes.

Los cuerpos lacolíticos Cerro Negro Norte y Sur poseen texturas holocristalinas porfíricas con algunos cristales de mayor tamaño, menores al 5% del volumen total de la roca. Los cristales de mayor tamaño son de feldespato potásico.

En algunos sectores de estos cuerpos, particularmente hacia los bordes, los cristales de feldespato tienen textura radial semejanado una textura esferulítica y en otros se acomodan resultando líneas de pseudo-fluidalidad que le da a las rocas aspecto “traquítico”.

Entre los cristales de mayor tamaño también se observan anfíboles subhedrales que en ocasiones presentan resorción marginal con bordes de opacos y biotitas subhedrales, primarias, frescas o parcialmente reemplazadas por cloritas. Entre los microgránulos se encuentra un mineral de color de interferencia de primer orden anhedral que ocupa espacios intercristalinos que por sus características ópticas se define como un feldespatoide. Las rocas pertenecientes a estos lacolitos clasifican petrográficamente como Traquitas.

Diferentes características exhiben las rocas pertenecientes al lacolito “alto” Liupuca.

Las rocas en este cuerpo tienen textura porfírica con escasos fenocristales (< 5%) de feldespato

potásico (anortoclasa) + cuarzo + anfíboles siendo la pasta un agregado de cuarzo y feldespato alcalino formando una textura felsítica.

En los sectores centrales del cuerpo los cristales de cuarzo pueden formar en promedio el 3 % del total de la roca y el tamaño más frecuente de sus ejes mayores es de 1,5 a 2 mm. Cuando está presente el anfíbol, representa menos del 1% del total de la roca y tiene un color de interferencia marrón claro consistente con un anfíbol alcalino rico en sodio. Además componen la pasta pequeñas hojuelas de micas, biotitas, y escasos minerales opacos.

Las características petrográficas permiten clasificarlas como Riolitas con afinidades alcalinas.

GEOQUÍMICA

Las muestras fueron analizadas químicamente determinándose la composición en cuanto a los elementos mayoritarios, minoritarios, trazas y Elementos de las Tierras Raras, El método para el análisis de las muestras fue Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (ICP– MS), en laboratorio certificado con norma ISO 9002.

Considerando sus composiciones en elementos mayoritarios las rocas clasifican como Traquitas y Fonolitas (Lacolitos “bajos”) y Riolitas (Lacolitos “altos”) en el diagrama TAS (Le Bas *et al*; 1986, Figura 11)

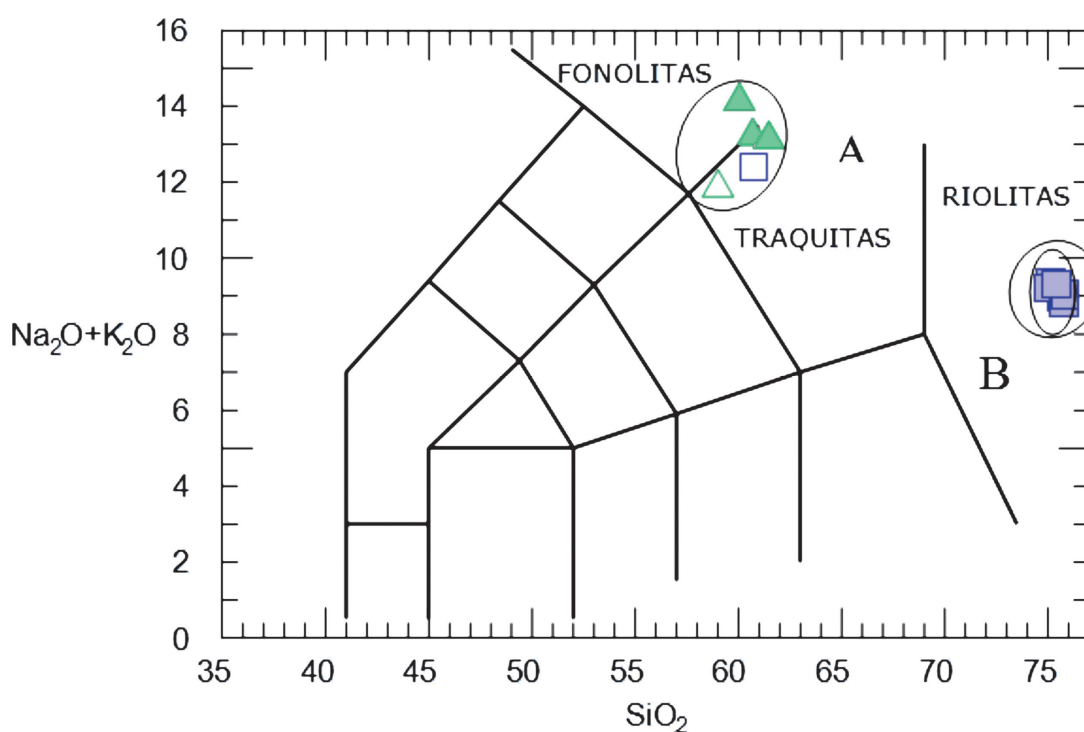


Figura 11. Diagrama clasificatorio. En el campo A se agruparon los lacolitos “bajos” cuya composición química corresponde a Traquitas y Fonolitas. En el B a los lacolitos “altos” de composición Riolítica. Los óxidos están expresados en porcentaje.

Cuando se analizan las relaciones entre elementos considerados inmóviles ante los procesos de alteración como por ejemplo la relación Nb/Y que es una medida de la alcalinidad, tanto las traquitas/fonolitas como las riolitas tienen una relación Nb/Y mayor a 0,7 clasificando como rocas de la serie alcalina.

Los Elementos de Tierras Raras (REE) analizados en partes por millón (ppm) desde el Lantano (La) hasta el Lutecio (Lu) son una muy importante herramienta de correlación (Figura 12). Estos elementos actúan en forma similar a un “ADN” de las rocas. Adicionalmente, no se ven afectados por los procesos de alteración desarrollados sobre las rocas posteriormente a su formación y representan de este modo la composición original.

En la normalización según Sun y McDonough, (1989) el diseño de las rocas del lacolito “alto” Liupuca exhibe menor enriquecimiento relativo de las Tierras Raras Livianas desde el La hasta el Samario (Sm), con un valor $\text{La}/\text{Smn}=2,33$. Se distingue por una marcada anomalía negativa en Eu, que indica cristalización de plagioclasa en condiciones de baja presión, y posterior fraccionamiento o sustracción y un diseño aproximadamente plano en las Tierras Raras Medianas y Pesadas con relaciones Gdn/Lun cercanos a 1 (Figura 12).

El alto grado de diferenciación es coherente con una mayor viscosidad del magma lo que a su vez es concordante con el mayor espesor del lacolito Liupuca (Figura 12).

En el caso de los lacolitos “bajos” Cerro Negro Sur y Cerro Negro el diseño muestra un fuerte enriquecimiento y fraccionamiento en Tierras Raras Livianas desde el La (Relación $\text{La}/\text{Smn}=8$ -

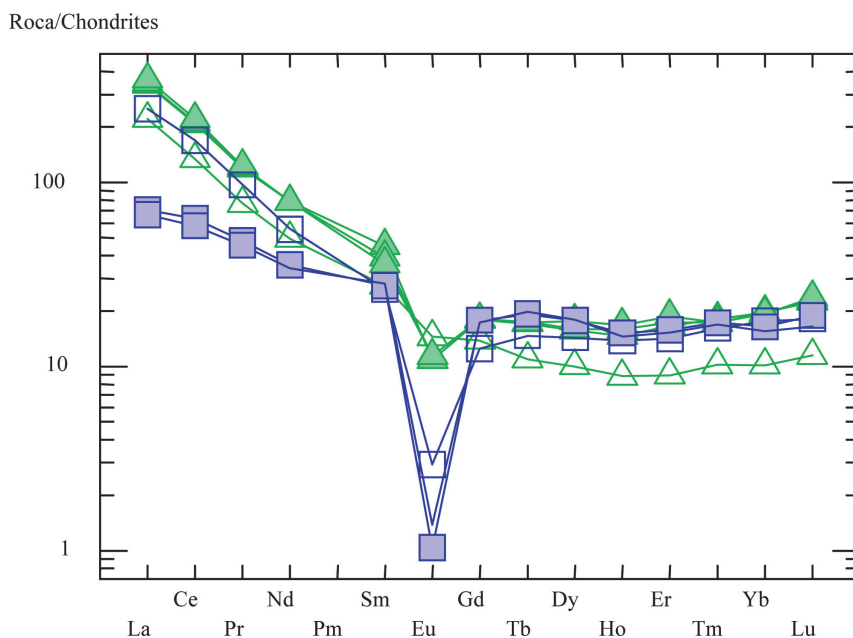


Figura 12. Las concentraciones de cada uno de los Elementos de Tierras Raras para facilitar la comparación se normalizan al “Chondrite” (meteoritos pétreos). Los meteoritos pétreos son representativos de muestras originales (sin fraccionamiento) del sistema solar. Los gráficos se grafican a escala logarítmica para obtener los diseños tipo “spider”, que son característicos para cada tipo litológico. Normalización según Sun y McDonough; (1989). Las muestras del lacolito “alto” Liupuca (cuadrados azules rellenos) se diferencian por su diseño de las Tierras Raras Livianas y anomalías negativas de Europio (Eu), de los lacolitos “bajos” (Triángulos verdes y triángulos transparentes).

10). La anomalía de Eu es poco marcada indicando que el fraccionamiento de plagioclasa fue incipiente. El diseño de las Tierras Raras Medianas y Pesadas desde el Gadolinio (Gd) hasta el Lu, es aproximadamente plano con valores cercanos a 1 similares a los del lacolito Liupuca (Figura 12).

La normalización a un Basalto de Cordillera Medio-Océánicas (MORB, Pearce; 1983) que se considera diagnóstico para la identificación de los ambientes tectónicos de emplazamiento a partir de las condiciones de generación muestra un diseño sin anomalía negativa de Niobio (Nb)-Tantalio (Ta) respecto a Torio (Th) y Cerio (Ce) y anomalías positivas de Circonio (Zr) y el Hafnio (Hf). Ambos tipos de anomalías son propias de las rocas pertenecientes a la serie alcalina formadas en ambientes de Intraplaca sobre corteza continental (Figura 13).

Las anomalías negativas de los elementos más compatibles Estroncio (Sr), Rubidio (Rb), Bario (Ba), se explican por procesos petrológicos de diversificación magmática que involucran fraccionamiento cristalino de plagioclasa y feldespato alcalino. Las anomalías de Fósforo (P) y Titanio (Ti) por la sustracción de fases cristalinas de minerales accesorios como la Titanita y la Magnetita (Figura 13).

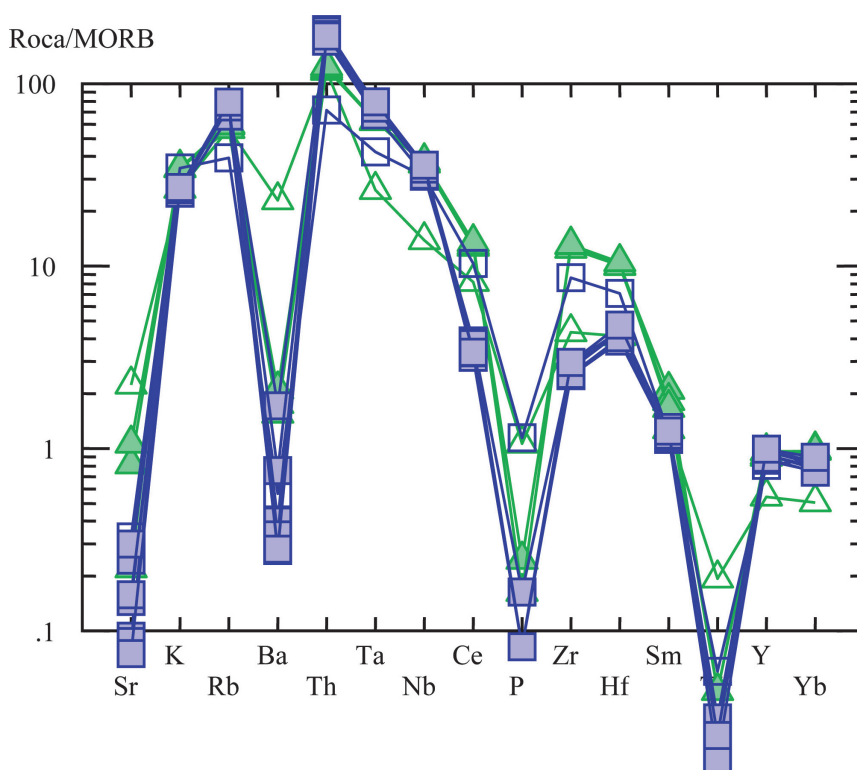


Figura 13. Normalización a un Basalto de Cordillera Medio-Océánica (MORB) (Pearce; 1983) Los elementos están ordenados de acuerdo a su nivel de incompatibilidad relativa la cual aumenta desde el Estroncio (Sr) hasta el Iterbio (Yb) que es el elemento más incompatible en este Diagrama. Los contenidos de elementos trazas y minoritarios de un MORB, son valores útiles para normalizar porque representan la composición de un magma originado en el manto, que no ha tenido procesos petrológicos complejos y sin contaminación con la corteza continental. Los diseños de los lacolitos “altos” (cuadrados azules) y “bajos” (triángulos verdes y cuadrados azules sin relleno) muestran diseños similares, pero los “altos” de composición riolítica se diferencian por sus anomalías negativas más marcadas debido a su carácter más evolucionado relacionado con procesos de diversificación magmática (fraccionamiento cristalino).

Los valores normalizados de Itrio (Y) e Yterbio (Yb) cercanos a 1, coincidentes con los del basalto de Dorsal Medio Oceánica indican que la fuente de origen fueron rocas básicas del manto, (Figura 13).

El diseño de las riolitas del lacolito “alto” exhibe las anomalías negativas más marcadas de TiO_2 que se corresponden con las rocas más diferenciadas de la serie alcalina.

Para establecer, a través de la geoquímica, el ambiente geotectónico se utilizaron los diagramas de Pearce *et al* (1984). Estos diagramas relacionan dos elementos incompatibles como el Nb vs el Y y el Ta vs Yb. En ambos diagramas todas las rocas analizadas caen en el campo de las asociaciones de rocas generadas en ambientes de Intraplaca (Figura 14 a y 14 b).

El ambiente geotectónico determinado por la composición geoquímica es compatible con el desarrollo de un evento tectónico-magmático eoceno en el ámbito de plataforma de la Cuenca Neuquina. Específicamente, el emplazamiento del campo de lacolitos Altiplanicie del Payún podría haber sido controlado por una zona transtensiva generada por fallas transcurrentes de orden mayor.

EDADES RADIMÉTRICAS

Se dataron dos muestras de lacolitos por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Estudios Geológicos, 2002 a y 2006).

La muestra datada del lacolito “alto” Liupuca intruído en la Formación Vaca Muerta se realizó sobre cutting. Se separaron 13,40 miligramos de pasta de la roca. La muestra fue calentada en 10 pasos sucesivos con temperaturas variables entre 675°C y 1400°C , durante un tiempo mínimo de 12 minutos.

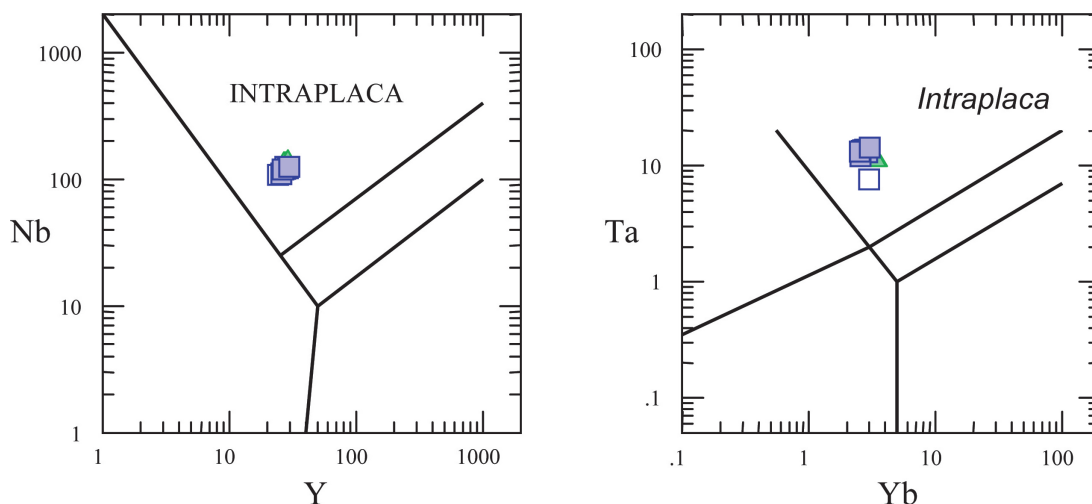


Figura 14 a y b. Diagramas discriminantes del ambiente geotectónico para rocas ácidas. Todas las muestras de los lacolitos caen dentro del campo de las rocas de Intraplaca. (Pearce *et al.*; 1984) Los valores de los elementos (Nb, Y e Yb) están expresados en partes por millón (ppm).

Los pasos sucesivos de calentamiento que liberan mayor cantidad de ^{39}Ar radiogénico determinan una edad para esta roca de $46 \pm 0,15$ Ma. (Eoceno, Lutetiano).

En el caso del lacolito “bajo” Cerro Negro también intruido en la Formación Vaca Muerta, se dató un fragmento de corona. La datación se realizó sobre Biotita en 5,20 miligramos de mineral separado, calentada en 12 pasos sucesivos con temperaturas variables entre 650°C y 1400°C durante un tiempo mínimo de 12 minutos.

Estos pasos de calentamiento para la muestra dieron un espectro de edades concordantes entre sí, pudiéndose definir una isócrona estadísticamente válida y resultando una edad de $49,36 \pm 0,10$ Ma. (Eoceno, Ypresiano).

Las edades obtenidas confirman que los dos tipos de lacolitos pertenecen a un mismo ciclo ígneo, desarrollado en un tiempo aproximado de 3 Ma.

MODELO GEOLÓGICO Y SISTEMA DE PETRÓLEO

Los sistemas de petróleo relacionados con el campo de lacolitos Altiplanicie del Payún, incluyen elementos y procesos de los Tipos I y II propuestos en la clasificación de Delpino y Bermúdez, (2009). Como los lacolitos “bajos” se intruyeron en el momento en que las lutitas negras de la Fm Vaca Muerta se encontraban inmaduras o muy cercana a la ventana de petróleo corresponden al Tipo I, subtipo A (Figura 15). Este tipo de sistemas es el que tiene mayor capacidad potencial de generar hidrocarburos en volúmenes comerciales.

Los lacolitos “altos” intruyen simultáneamente las lutitas negras de las formaciones Vaca Muerta y Agrio y el paquete las rocas sedimentarias clásticas que normalmente actúan como reservorios en la Cuenca Neuquina, y entonces en estos sectores, es posible clasificar al sistema de petróleo como de Tipo II, subtipo A, (Figura 15).

Los elementos básicos de estos sistemas de petróleo atípicos incluyen, a diferencia de los clásicos, dos rocas madre: las lutitas negras agrupadas en las formaciones Vaca Muerta y Agrio. Las potenciales rocas madres al tiempo de emplazamiento de los lacolitos en el Eoceno, se encontraban de acuerdo al mapa de tendencia de madurez de Legarreta *et al*, (2004), con baja madurez termal por soterramiento. Concordantemente los valores de reflectancia de la vitrinita variaban entre 0,4 y 0,6 % (Rodríguez *et al*, 2009). La transferencia de calor provocada por los intrusivos sustituye entonces el soterramiento requerido para alcanzar la madurez termal.

Los reservorios son las conocidas rocas clásticas agrupadas en los grupos Mendoza, Rayoso y Neuquén a los que se agregan los propios lacolitos que poseen porosidad primaria en sectores cercanos al techo y los laterales, generada durante el proceso de emplazamiento y enfriamiento; y porosidad secundaria de origen tectónico (Delpino y Bermúdez; 2009).

Los sellos son las secuencias pelíticas y niveles de evaporitas con muy baja permeabilidad

de las unidades antes mencionadas y sectores de los cuerpos intrusivos con baja porosidad y permeabilidad. Se define de este modo una característica del sistema de petróleo relacionado con los lacolitos, la cual es que pueden actuar como reservorio y sello al mismo tiempo.

Los procesos son también particulares y específicos. Las trampas son de tipo magmático-estructurales. Las estructuras dómicas son consecuencia de la generación del espacio de intrusión que arquea los estratos localizados por sobre el techo de los lacolitos. Otros componentes de las trampas son los sistemas de fallas y fracturas sin-intrusivas (Figura 15).

La generación se produce por la maduración en distintos grados relativos debido a la transferencia de calor provocada por la diferencia entre la temperatura de intrusión (Entre 900 y 1000° C) y la paleotemperatura de la roca de caja (Entre 70 y 80° C). El proceso de generación ha sido modelado y estimado en 129 Mbbl (Rodríguez *et al*; 2009).

Los caminos de migración son un elemento distintivo y diferente a las vías de migración tradicional debido a que involucran varios eventos de migración en múltiples direcciones en distancias relativamente cortas (Figura 15).

El camino de migración primaria, dentro de la roca madre, es a través de planos de laminación, microfracturas y microbrechas dentro de un sistema sobrepresionado.

Las sobrepresiones se generan por las altas temperaturas interactuando con distintos tipos de fluidos. Principalmente los presentes en las rocas de caja (H_2O), a los que se adicionan los generados en las reacciones metamórficas de contacto ($H_2O + CO_2$) y con los liberados por el magma durante el proceso de intrusión ($CO_2 + SH_2$).

El alto porcentaje de dióxido de carbono (CO_2) encontrado en el entorno de los lacolitos, asociado con estas acumulaciones provendría de las fuentes mencionadas.

Las fracturas sin-intrusivas extensionales que conforman el sistema radial, generadas en la primera etapa, son simultáneas con la mayor transferencia de calor hacia la roca de caja. La mayor densidad de este tipo de fracturas se produce en las cercanías del techo del intrusivo (Figura 8). Al ser fracturas Modo I pueden actuar como vías de migración primaria cuando los hidrocarburos se alejan del lacolito.

La migración secundaria incluye dos fases, las dos a través de las fracturas extensionales sin-intrusivas mayores. En la primer fase los caminos de migración son las fracturas extensionales del sistema radial y del sistema de graben apical que afectan las unidades localizadas en niveles estratigráficos superiores, por encima de las rocas madres. Este camino de migración aleja los hidrocarburos generados en el entorno del cuerpo intrusivo hasta alcanzar un nivel potencial de reservorio (Figura 15).

La segunda fase de migración secundaria se inicia en las últimas etapas de enfriamiento de los intrusivos cuando se genera por pérdida de volumen una caída de presión en el entorno y dentro del lacolito. Esta situación favorece un camino de migración de retorno hacia las zonas más cercanas al intrusivo. Este proceso es favorecido por el desarrollo de celdas convectivas hidrotermales

calientes que favorecen el traslado de los hidrocarburos. Los sistemas de fracturas concéntricas que se forman en relación con el colapso del cuerpo intrusivo pueden favorecer esta migración secundaria (Figuras 7 y 15).

Este sistema de petróleo tiene características estratigráficas particulares dentro de una distribución areal y extensión temporal específica.

La extensión temporal es relativamente larga debido a que hay “gaps” de tiempo entre los componentes estratigráficos y el momento de la intrusión. En este caso en particular la extensión temporal abarca desde el cretácico inferior, momento en que terminaron depositarse las pelitas negras agrupadas en la Fm Agrio hasta el Eoceno (46 Ma) el momento de intrusión de los lacolitos.

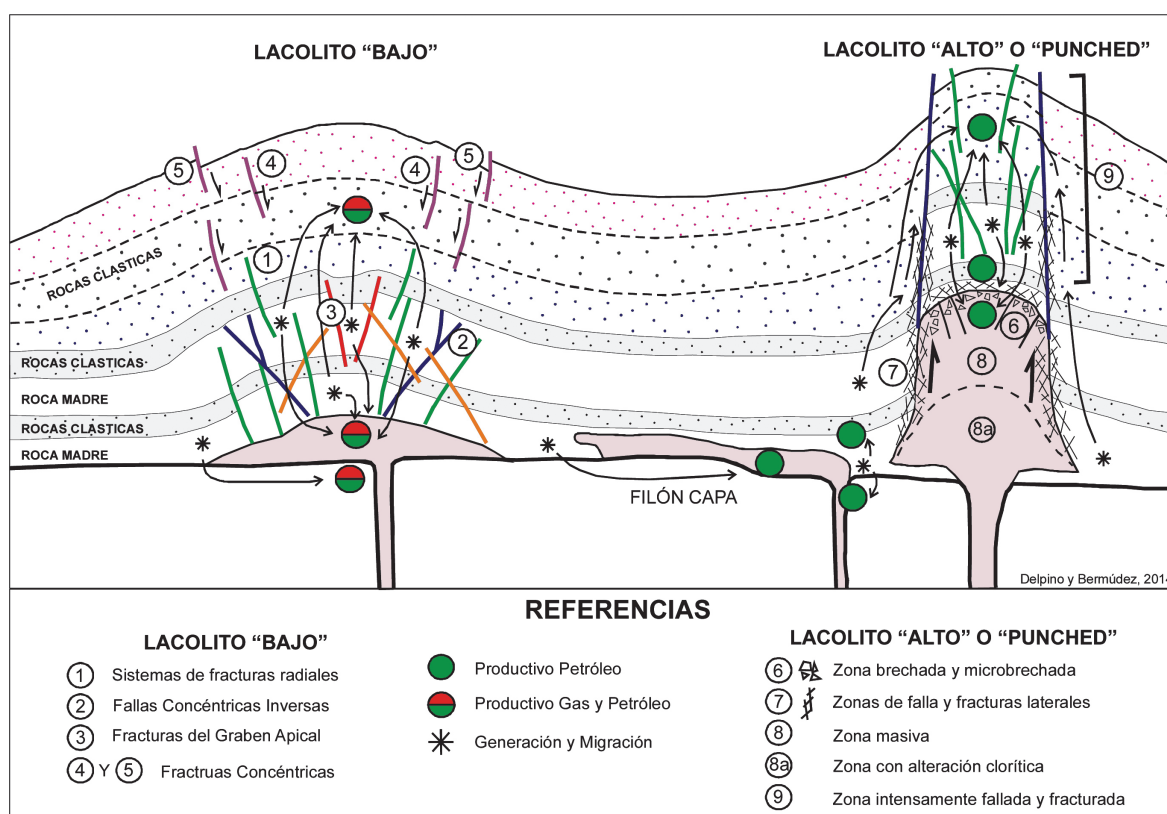


Figura 15. Elementos del modelo geológico y sistema de petróleo asociado con lacolitos “altos” y “bajos”.

La extensión areal o distribución geográfica del sistema está acotada al entorno de los lacolitos y a la distribución en el espacio del sistema de fallas y fracturas sin-intrusivas que actúan como límites del sistema, conformando un sistema cerrado (Figura 15). Aunque no puede descartarse que una parte de los hidrocarburos generados podrían haber migrado en un sistema abierto incorporándose a los sistemas de petróleo convencionales.

CONCLUSIONES

El campo de lacolitos de la Altiplanicie del Payún, generado por un evento ígneo de edad Eocena (46-49 Ma) en el sector de plataforma de la Cuenca Neuquina, ha provocado la creación de un sistema de petróleo no convencional con producciones económicas de hidrocarburos.

Se diferenciaron dos tipos de lacolitos: 1) “bajos”, de composición traquítica/fonolítica, con relaciones Diámetro/Altura mayores a 10 y 2) “altos” de composición riolítica y relaciones menores a 5. Ambos tipos y cada uno de los lacolitos generaron estructuras dómicas independientes de la tectónica regional.

Estos cuerpos ígneos han influido en todos los elementos y procesos del sistema de petróleo determinando marcadas diferencias con los sistemas tradicionales.

Por primera vez, utilizando sísmica 3D, se identificaron y caracterizaron los complejos sistemas de fracturas sin-intrusivas (radiales, poligonales y concéntricas) las cuales favorecen las migraciones primaria y secundaria y forman parte de las trampas.

Este sistema no convencional incluye generación simultánea a partir de dos rocas madres: las lutitas negras agrupadas en las formaciones Vaca Muerta y Agrio. La generación se produjo a partir del calor transferido desde los cuerpos ígneos hacia las potenciales rocas madres que se encontraban inmaduras en el momento de la intrusión. En consecuencia este calor ayudó a alcanzar la madurez termal reemplazando parcialmente a la columna sedimentaria de soterramiento.

Los cuerpos ígneos especialmente en el techo y en los laterales poseen porosidad primaria adquirida durante el proceso de emplazamiento y enfriamiento; y secundaria por fracturas generadas por eventos tectónicos posteriores. En consecuencia reúnen condiciones para actuar como reservorios. En algunos casos actúan como reservorio y sello al mismo tiempo.

Las correlaciones efectuadas utilizando geoquímica de roca de alta precisión permitieron definir los tipos litológicos como traquitas/fonolitas y riolitas pertenecientes a la serie alcalina. En las riolitas los procesos de diferenciación, probablemente cristalización fraccionada, han sido importantes y permiten de acuerdo a los diseños de Elementos de Tierras Raras y elementos traza normalizados al MORB diferenciarlas claramente de los otros tipos litológicos.

En los diagramas discriminantes de ambiente geotectónico todos los lacolitos se ubican en el campo de las rocas de Intraplaca. El carácter alcalino y el ambiente geotectónico es compatible con un control del emplazamiento en una zona transtensiva relacionada a eventos de fallas transcurrentes de orden mayor en este sector de la Cuenca Neuquina.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección de Exploración de YPF por facilitar la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Bermúdez, A. y D. Delpino; 2005. Rocas Ígneas. Guía descriptiva de Fragmentos de Perforación utilizando lupa petrográfica. Repsol – YPF. 1º Edición, 151 p.
- Corry, C.E.; 1988. Laccoliths, mechanics of emplacement and growth. Geological Society of America. Special Paper 220: 1-110.
- Comeron, R., J. González, M. Schuima, 2002. Los Reservorios de la Rocas Ígneas Intrusivas. V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mar del Plata.
- Delpino, D y A. Bermúdez; 2009. Petroleum Systems including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks (sills and lacoliths). The Leading Edge, Society of Economic Geologist, Special Section: Unconventional Resources and CO2 monitoring; 804-811.
- Delpino D. y A. Bermúdez; 2011. Sistemas de fracturas condicionantes de la porosidad y permeabilidad en reservorios no convencionales de rocas ígneas intrusivas. Simposio Evaluación de Formaciones. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata. Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG) y Asociación Argentina de Geólogos y Geofísicos Petroleros (AAGGP): 163-188
- Delpino D. y A. Bermúdez; 2014. Modelo geológico de cuerpos intrusivos en el área Altiplanicie del Payún. Informe Inédito YPF. Neuquén.
- Estudios Geológicos, 2002 (a): POZO YPFMd.N.CoN x-1. Informe Inédito Repsol- YPF. Neuquén.
- Estudios Geológicos, 2002 (b): POZO YPFMd.NEI. x-1 (El Infiernillo) y POZO YPFMd.NCLi. x-1 (Cerro Liupuca). Informe Inédito Repsol- YPF. Neuquén.
- Estudios Geológicos, 2006. Descripción litogeológica del secuencias ígneas en el POZO YPF. Md.NCLi. x-2 (Cerro Liupuca). Informe Inédito Repsol- YPF. Neuquén.
- Gavarrino, A., M. Suárez y N. Vitulli; 2005. Detección de cuerpos intrusivos mediante la interpretación en volumen y la utilización de atributos sísmicos, cuenca neuquina, Argentina. VI Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. La sísmica de reflexión, más allá de la imagen estructural. p: 185-193. Mar del Plata. Argentina.
- Gilbert, G.K.; 1880. Geology of the Henry Mountains. U.S. Geographical and Geological Survey of Rocky Mountains Region. 170 p.
- Hongwei Yin y R. Groshong; 2007. A three dimensional kinematic model for the deformation above an active diapir. AAPG Bulletin, V.91, N°3: 343 - 363
- Iddings, J.P.; 1898. Bysmaliths, Journal of Geology, 6:704 – 710,
- Le Bas MJ, RW. Le Maitre, A. Streckeisen y B. Zanettin; 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. J Petrol 27: 745–750
- 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, AAPG Bulletin 88, 6p. AAPG International Conference and Exhibition, Cancún, México.

- Ordoñez, E.; 1915. The oil fields of Mexico. American Institute of Mining Engineering, Transactions, 61: 532-543.
- Pearce J.A.; 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. En Hawkesworth C.J. and Norry M.J. (eds.) Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva; Nantwich. 32: 230-249.
- Pearce, J.A., N.B. Harris, y A.G.Tindle; 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology 25: 956-983.
- Rodríguez, F., H. Villar, R. Baudino, D. Delpino y S. Zencich; 2009. Modeling an atypical petroleum system: A case study of hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous intrusions in the Neuquen Basin, Argentina. Marine and Petroleum Geology: 590-605. Elsevier Ltd.
- Ugarte, F; 1966. Los Cuerpos intrusivos del yacimiento Santa Cruz en relación con el entrapamiento de hidrocarburos. Terceras Jornadas Geológicas Argentinas: 107-115. Comodoro Rivadavia.
- Sun, S.S. y W.F. McDonough; 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. En Saunders A.D. y Norry M.J. (eds.) Magmatism in oceanic basins. The Geological Society, Special Publication 42: 313-345, London.
- Walter, Th. y V.Troll; 2001. Formation of Caldera periphery faults: an experimental study. Bull. Volcanol. 63: 191- 203. Springer Ed.
- Winchester, J.A. y P.A.Floyd; 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology 20: 325-343.
- Vitulli N.; 2000. Distribución y potencial petrolero de los cuerpos ígneos intruidos en el Área Altiplanicie del Payún. Informe Inédito. Repsol-YPF. Neuquén.
- Zimmerman, R.K. y R. Sassen; 1993. Hydrocarbon transfer pathways from Smackover source rocks to younger reservoir traps in Monroe Gas Field, northeast Louisiana, Gulf Coast Association of Geological Societies, 43: 473 - 480.