

EXPANDIENDO EL ROL DEL CONTROL GEOLÓGICO EN VACA MUERTA: EVALUACIÓN DE FORMACIÓN CON RECORTES DE PERFORACIÓN Y ANÁLISIS DE GASES

Javier Peano¹, Paola L. Delgado², Marcelo J. Sánchez²

1: Tecpetrol, javier.peano@tecpetrol.com

2: Schlumberger, pdelgado@slb.com, msanchez@slb.com

Palabras clave: DRIFTS, XRF, Vaca Muerta

ABSTRACT

In the actual scenario of “factory mode” on unconventional wells in Vaca Muerta Formation the use of information collected at surface during drilling operations have a positive impact to address the complexity of this target.

The objective is to maximize, mud gas and cuttings data in the context of unconventional wells. The aim of this approach is assist in the petrophysical evaluation of “Shale” reservoirs such as the Vaca Muerta Fm for:

- a) TOC, gas analysis, mineralogy and chemical fingerprint for resources assessment.
- b) Mineralogy content and hydraulic fracturation relationship;
- c) Limitations & quality controls on surface information (mud gas and cuttings)

Using as reference the previous job done at FP.x-1003 well at Fortin de Piedra Area in Neuquén province with the integration of new information to complement reservoir & completion evaluation on this well.

For mud gas data, we are using the recorded mud gas by and Isotope Logging Service done by Mud logging services, with the chromatographic gas data in the range C1 to C5 and Methane Isotope gas data ($\delta^{13}\text{C-CH}_4$), which helps assess the quality of the hydrocarbons in formation in real-time and on a continuous basis.

Cuttings measurements were done on 40 samples covering the four fracture stages performed on this well. These samples were analyzed for their mineralogical composition and organic matter concentration by diffuse reflectance infrared Fourier-transform spectroscopy (DRIFTS) developed by Schlumberger.

In the same set of samples to determine the elemental composition on cuttings by quantifying all inorganic elements with X-ray fluorescence (XRF) analysis. This technique provides measurements from percentage to parts per million (ppm). The elemental composition is highly useful for chemostratigraphy.

The mineralogy, TOC and geochemical information obtained were compared with laboratory data. Due operational reasons, was not possible perform logging, cutting information was used for the selection and design of hydraulic fractures. After years of data and production history and PLT information, the DRIFTS technique is added to the study with the objective of analyzing the behavior of each zone and its differences

The surface data acquisition & evaluation will help on:

- Cost-effective approach for “factory mode” unconventional wells for mineralogy, TOC data and geochemical data acquisition
- Complementary source of information for Geosteering in horizontal drains
- Early insight on rock quality evaluation
- Data integration with other sources of information for completion operations.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene el objetivo de mostrar técnicas en la caracterización de la Formación Vaca Muerta, las cuales son de bajo costo y accesibles. Estas técnicas nos permiten obtener información de vital importancia para la etapa de completación, y abarcan desde realizar un estudio en las relaciones cromatográficas del gas en el lodo hasta la caracterización avanzada en los recortes de perforación.

Los recortes de perforación siempre están disponibles en el pozo, estos son inmunes a altas temperaturas y presiones, y adquiridos en cualquier diámetro de pozo. Actualmente es posible realizar análisis de laboratorio tales como; difracción de rayos x (para mineralogía), fluorescencia de rayos x (composición elemental), y conocer el contenido de materia orgánica (TOC) en recortes de perforación.

La capacidad de comprender mejor los reservorios no convencionales para optimizar la recuperación de hidrocarburos continúa teniendo una creciente importancia económica. Estos reservorios a menudo requieren conjuntos de datos más completos para comprender su comportamiento en la producción. En función de eso, nuevas técnicas son aplicadas, entre ellas, la

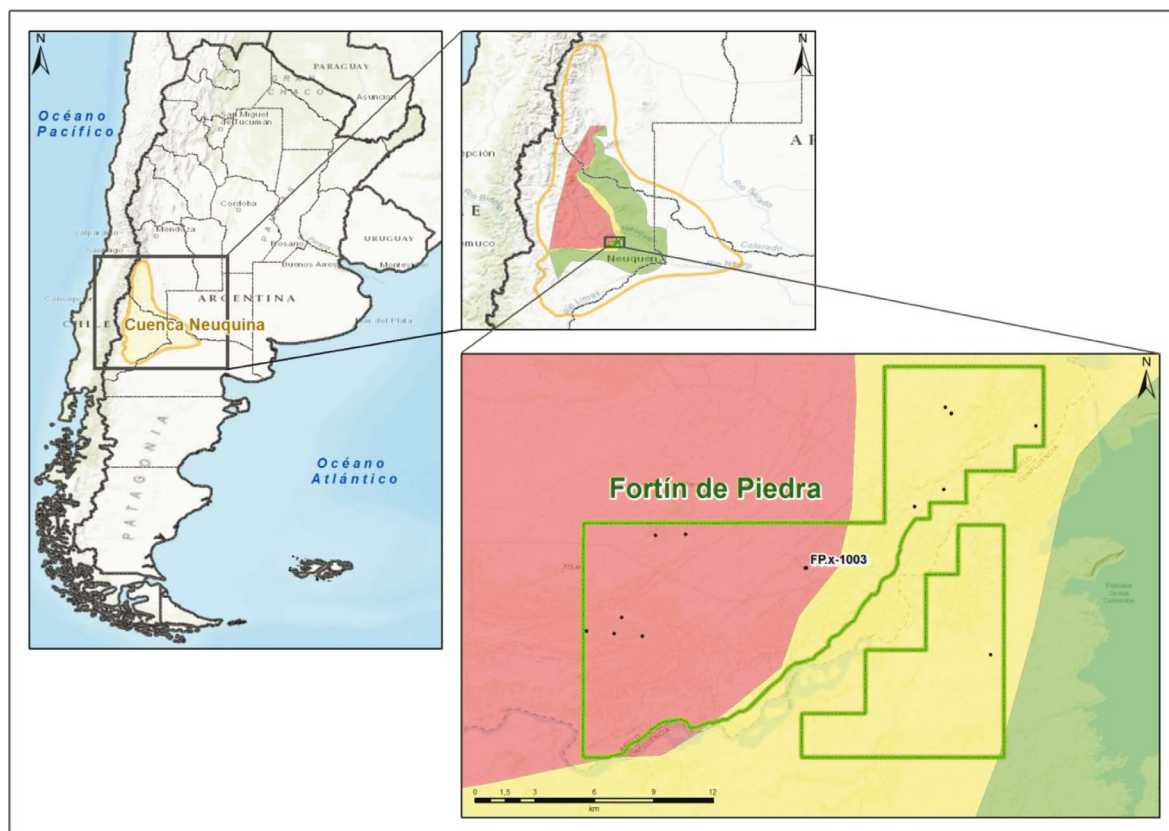


Figura 1. Ubicación del Bloque Fortín de Piedra dentro en la Cuenca Neuquina.

espectroscopía transformada Fourier de la reflectancia difusa infrarroja (DRIFTS_ *Diffuse reflectance infrared transformed spectroscopy*) técnica utilizada para la tipificación de arcilla, mineralogía, contenido de TOC (carbono orgánico total) y madurez de kerógeno.

En este trabajo se caracterizan las secciones de producción de la Fm. Vaca Muerta del pozo Fortín de Piedra x-1003 con DRIFTS, XRF (fluorescencia de rayos x) y complementa la medición continua de isótopos, Peano *et al.*; (2014), a fin de entender el comportamiento de las distintas secciones que constituyen la Fm Vaca Muerta.

MARCO GEOLÓGICO

El pozo exploratorio TPT.Nq.FP x-1003 (Fortín de Piedra x-1003) fue perforado en el Bloque homónimo en el año 2014.

Este bloque está ubicado en la Cuenca Neuquina, en el ámbito del Engolfamiento Neuquino y posee una superficie aproximada de 255 km² (Fig. 1).

Históricamente, este sector de la cuenca fue explorado por las formaciones Tordillo, Quintuco y Mulichinco. Con el comienzo de la exploración de los reservorios no convencionales, todo este sector de la cuenca ha sido objeto de una intensa actividad para la determinación de la comercialidad de los mismos (Fig. 2).

Este pozo vertical alcanzó una profundidad final de 3070 mbbp. Fue completado con 4 fracturas hidráulicas, y datos de sucesivos PLTs, permitieron definir las zonas de navegación de pozos horizontales.

Formaciones Quintuco-Vaca Muerta

Este intervalo estratigráfico representa la ingresión marina del Tithoniano, configurando a grandes rasgos una mega secuencia regresiva.

El límite entre estas unidades es una superficie diacrónica, litológicamente transicional (aumenta la proporción de material carbonático en la Fm. Quintuco) muy difícil estimar a partir del dato sísmico.

La Fm. Quintuco está compuesta por calizas arenosas y arcillosas, que poseen intercalaciones, de niveles oolíticos y niveles calcáreos finos de color gris claro a gris verdoso. En su sección basal predomina las limolitas de color gris, en parte arenisca fina, y bancos de caliza de color gris oscuro y gris blanquecino, masiva, junto con calizas micríticas y fangolita calcáreas de color gris oscuro. Esta alternancia de niveles diferentes refleja la superposición de ambientes mixtos de rampa (carbonatos) y ambientes deltaicos.

La Fm. Vaca Muerta, objetivo principal del pozo; está constituida por pelitas margosas bituminosas de color gris oscuro a negro, compactas, de baja energía deposicional y un alto

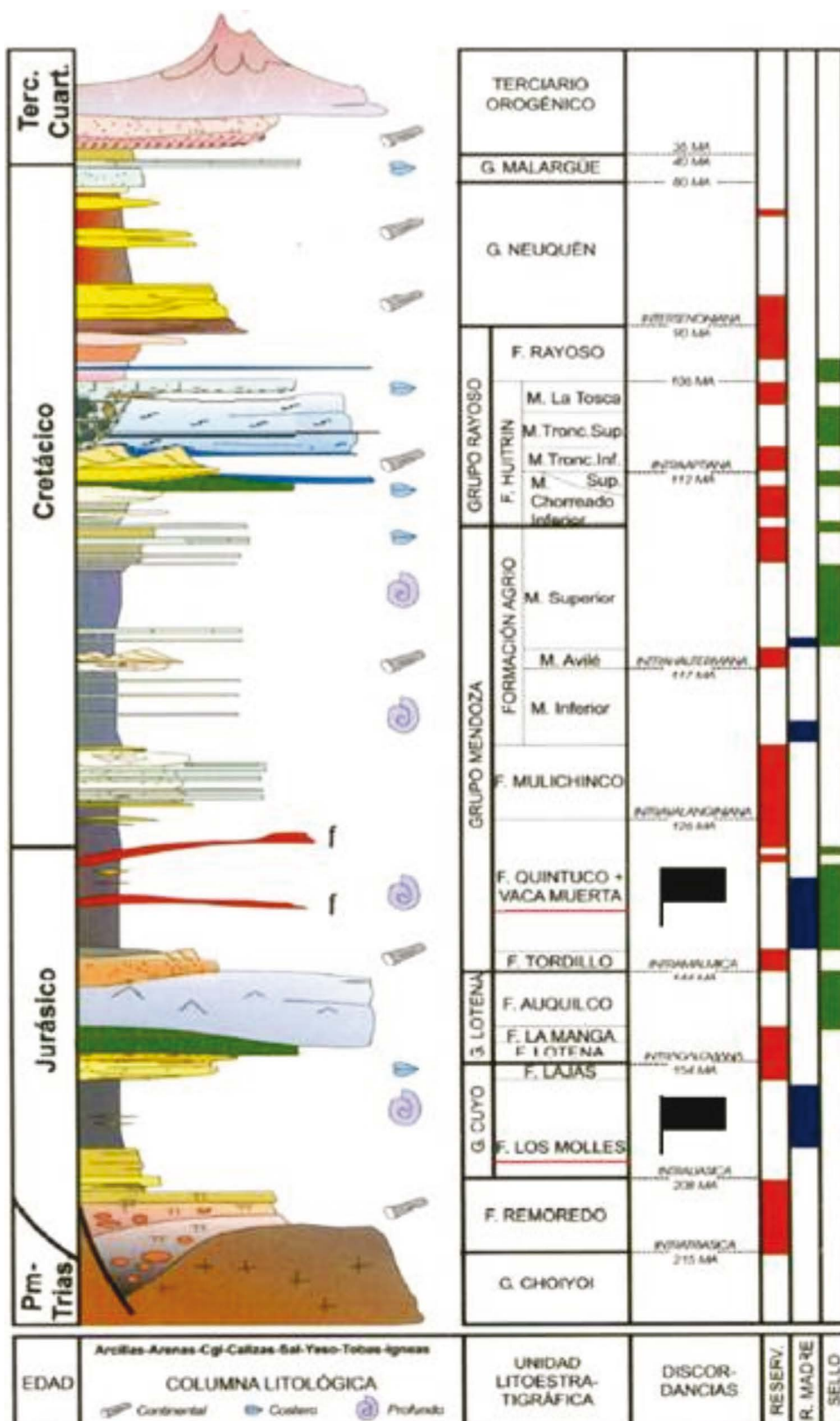


Figura 2. Columna Estratigráfica general de la Cuenca Neuquina.

potencial oleo genético. Estas litologías se corresponden con un ambiente de rampa interna a centro de cuenca.

En el Bloque Fortín de Piedra, la Fm. Vaca Muerta se encuentra en la ventana de gas seco y gas húmedo.

Siguiendo la nomenclatura, adoptada por todas las compañías que están trabajando en esta formación, dentro del área Fortín de Piedra es factible reconocer 5 superficies de las 13 mapeadas en la transecta regional. Estas superficies delimitan tres intervalos:

- Tithoniano 1-3, con un espesor de unos 70 m y donde dentro del cual los 30 m basales corresponden a lo conocido como “la cocina”.
- Tithoniano 3-5, segundo ciclo transgresivo-regresivo. Arreglo agradante-progradante de unos 370 m de espesor.
- Tithoniano 4-5, con un espesor aproximado de 190 m, en donde, la superficie T5 corresponde al techo de la Fm. Vaca Muerta, intervalo con mayor participación de facies carbonáticas.

La posición del bloque Fortín de Piedra en una Transecta Sísmica Regional puede verse en la Figura 3.

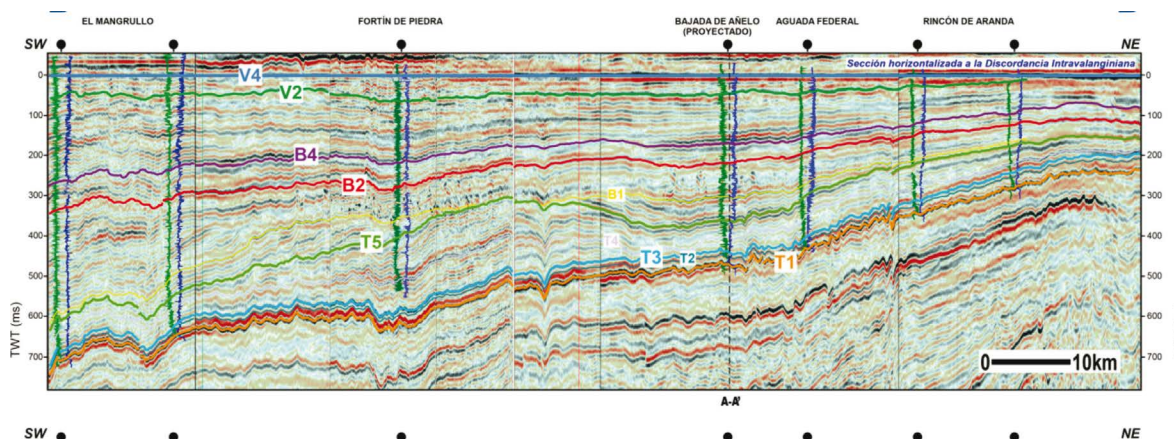


Figura 3. Transecta sísmica regional SW-NE, mostrando la participación de las distintas unidades en el espesor de Vaca Muerta. (Libro: “Transecta regional de la Formación Vaca Muerta- IAPG-2016),

EQUIPOS Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

En el pozo de TPT.Nq.FP x-1003 (Fortín de Piedra x-1003), se han analizado 40 muestras de recortes de perforación de los intervalos correspondiente a las cuatro etapas de fracturación, en función de entender, las diferencias en la producción. Estos equipos son Microscopio de resolución digital (del inglés HRDM; *high resolution digital*), Fluoroscopio de rayos X (del inglés XRF) y un Espectrómetro (DRIFTS)(Fig 4)



Figura 4. Equipos usados para el análisis de las muestras,

Los recortes de perforación fueron lavados con detergente y secados. Derrumbes, pedazos de metales, materiales de pérdida de circulación (LCM: *Lost circulation material*) u otros aditivos de perforación fueron removidos de la muestra, para obtener lecturas representativas. Aproximadamente 10 gramos de muestra seca, es molida (con la ayuda de una amoladora eléctrica automática). Para DRIFTS la muestra recibe un procesamiento adicional, de lavado con solvente orgánico.

Para la obtención de datos de Gas en el lodo, un desgasificador de volumen constante, bombea gas hacia el analizador (*Reserval*), que mide total gas y cromatografía, conjuntamente con este analizador un espectroscopio de absorción infrarroja es usado para la medidas de isotopos de $\delta^{13}\text{C}$ en C_1 , Peano *et al.*, (2014).

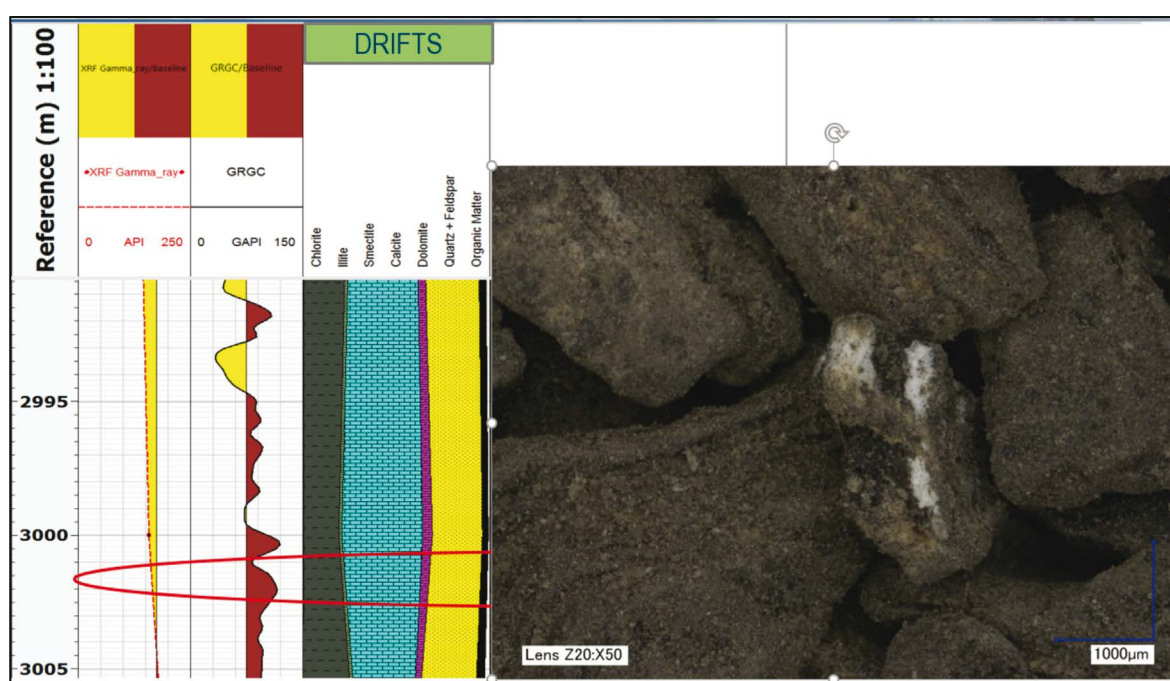


Figura 5. Precipitación de Calcita en venas paralelas a la estratificación conocidas como "Beef".

Microscopio de alta resolución

El microscopio digital de alta resolución proporciona una mejora a las soluciones estándar para la digitalización. Tiene una dinámica de aumento mejorada: 10 veces (x20 hasta x200). Las imágenes mejoran la resolución de color. Además, es posible medir el tamaño de grano en los recortes de perforación.

El valor adicional en el análisis de los recortes de perforación de Vaca Muerta es que es posible apreciar características como: formas de cristalización de calcita, crecimientos globulares (moteadas) o rellenando micro-fracturas (venas –que en algunas ocasiones en forma de diente de perro– como se observa en la Fig. 5). Se identifica también, impregnaciones de baritina en los recortes de perforación (Fig. 6).

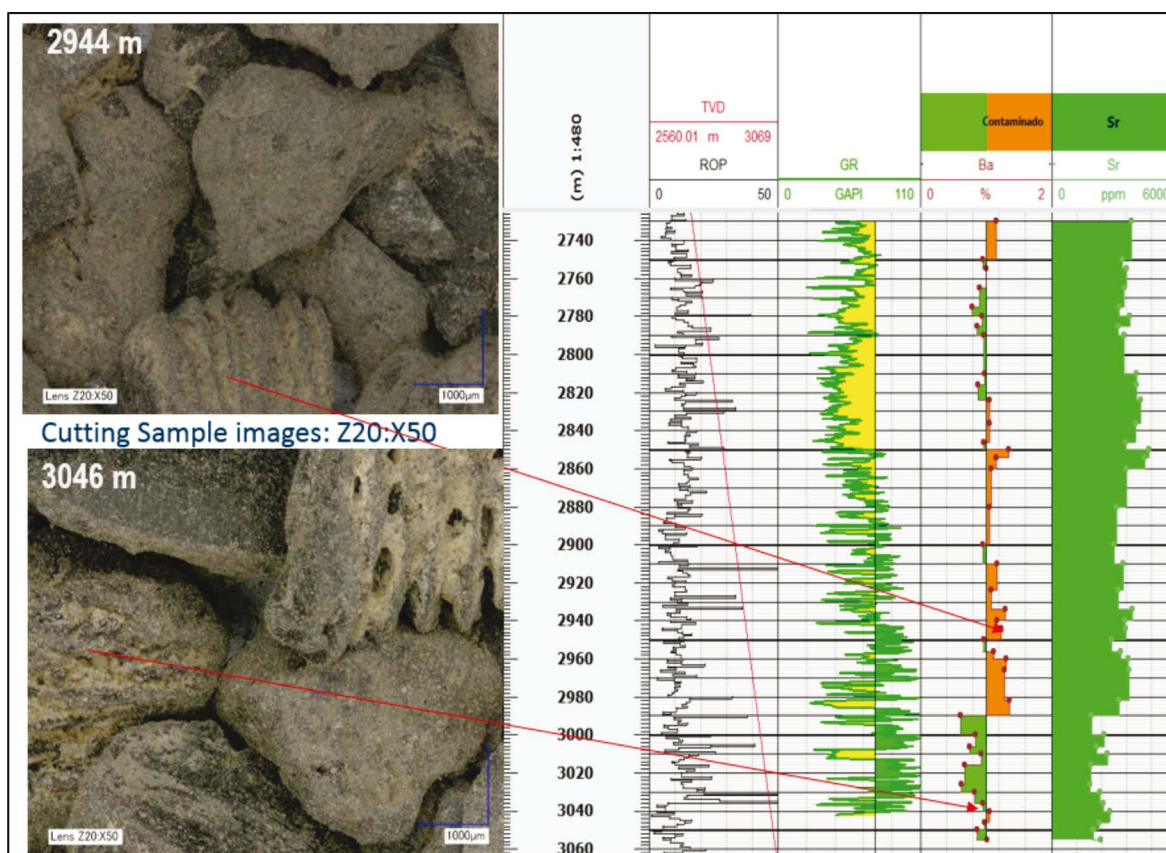


Figura 6. Contaminación de lodo observada en fotografías. Baritina recubriendo en lámina el recorte de perforación. El registro de XRF de la derecha muestra la presencia de Bario, establecemos una línea de corte en 1% de contenido de Ba, para marcar la contaminación de lodo.

La fluorescencia de rayos X (XRF)

La fluorescencia de rayos X (XRF) es la emisión de rayos X “secundarios” (o fluorescentes) característicos de un material que se ha excitado bombardeando con rayos X o rayos gamma

de alta energía. La fluorescencia de rayos X contribuye a determinar la composición elemental, proporcionando una cuantificación confiable de todos los elementos de interés, incluso cuando solo están presentes como trazas. Las concentraciones pueden ser expresada, en ppm y %, en óxidos.

Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy (DRIFTS)

En la técnica DRIFTS, un láser infrarrojo brilla sobre el material y un detector mide la intensidad de la luz reflejada en función de la frecuencia. Las mediciones espectrales infrarrojas se realizan utilizando un espectrómetro: Bruker Alpha-R. La intensidad de la luz reflejada difusamente en cada frecuencia en el espectro medido, es una función de la abundancia de enlaces químicos en la muestra (es decir, enlaces químicos en minerales inorgánicos y compuestos orgánicos), que vibran y absorben la radiación IR (infrarrojas) a frecuencias características. El espectro de radiación infrarroja reflejada se da en unidades de Kubelka-Munk (KM). Este espectro de KM resultante es una función directa de la abundancia de las vibraciones moleculares en la muestra por lo tanto, de la mineralogía de la muestra.

Las concentraciones minerales se cuantificaron mediante una regresión de mínimos cuadrados de los espectros de muestra desconocidos frente a una combinación lineal de espectros de minerales conocidos. El presente método actualmente resuelve para ocho componentes minerales inorgánicos (esmética, illita, clorita de caolinita, cuarzo más feldespato, moscovita, calcita y dolomita) y materia orgánica. El contenido de materia orgánica y la madurez asociada se estima utilizando la parte del espectro IR medio en el que se expresan las vibraciones moleculares en los componentes orgánicos. La señal de hidrocarburos corresponde a la energía vibratoria de enlace de C-H de los hidrocarburos alifáticos. Esta señal disminuye en función de la maduración del kerogeno. Como resultado, la relación de TOC en la señal de DRIFTS se puede usar como una nueva estimación de la madurez termal orgánica.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

Análisis de Gas

- Los datos isotópicos del pozo perforado en Fortín de Piedra indican gas termogénico puro o casi puro (pequeña contribución de kerógeno III).
- La potencial asociación de hidrocarburo podría ser gas húmedo y/o condensado, de acuerdo al diagrama de Schoell, donde los puntos de datos wetness (WH) se desplazarán hacia la derecha. La madurez térmica (Ro) basado en el modelo de proxy del $\delta^{13}\text{C-C}_1$ y asociación co-genética del fluido, indican fluidos co-genéticamente con, condensado / gas húmedo con

cierta heterogeneidad vertical (Fig. 7). La reflectancia de la vitrinita calculada, en comparación con la reflectancia de vitrinita medida en laboratorio muestran la misma tendencia Peano *et al.*, (2014).

- El análisis de gas en el lodo necesita una normalización para su correcta interpretación, en esta fórmula se usan los parámetros de la perforación que interfieren en el volumen de gas liberado.
- Durante el ensayo post fractura y a distintos tiempos se realizaron sucesivos PLT s observando en ellos que la etapa de fractura 1, contribuyó con el 60% del flujo del caudal de gas total .Se normalizó el análisis cromatográfico de laboratorio en el rango C_1 - C_5 y se comparó con el análisis de gases adquiridos durante el control geológico. Observándose buena coincidencia de los mismos.

La Figura 7 muestra la visión general de la cromatografía. El gráfico muestra de izquierda a derecha: Profundidad, datos de gas: C_1 , C_2 , C_3 , iC_4 , nC_4 , iC_5 y nC_5 , relaciones cromatográficas Wetnees (Wh), balance (bh), carácter (ch), datos de $\delta^{13}C-C_1$ que indican si el gas analizado es termogénico o biogénico, estimación del índice de reflectancia de vitrinita, denominado “Ro_ $\delta^{13}C-C_1$ ”, calculado a partir de los datos de $\delta^{13}C-C_1$ (tomado de Berner y Faber,1996), sumatoria y normalización de los hidrocarburos y etapas de fracturas.

Mineralogía, Composición Elemental y TOC

El intervalo 2730-3050 mbbp de la Fm. Vaca Muerta está constituida por margas y calizas (Figura 8). La mineralogía está conformada, predominantemente de illita, calcita y cuarzo, hacia el tope de la formación (Tithoniano 5), predominan los minerales carbonaticos: calcita y dolomita, en la zona de Tithoniano 4 predominan las arcillas (illita, con puntuales presencias de esméctica y clorita) y hacia la base del Tithoniano 3, se mantienen proporciones iguales de calcita, arcilla y cuarzo y feldespato. Los niveles de carbono orgánico total (COT%), varían entre un 3% hasta un 6%. Las concentraciones de TOC incrementan hacia la base del intervalo analizado.

Con la composición elemental, se obtuvieron las concentraciones de potasio (K), torio (Th) y uranio (U), a partir de estos datos se generó un gama ray (GR), esta pseudo-curva se compara con un GR de perfiles “*open hole*”, lo que nos permite validar el tiempo de retorno y ajuste de profundidad, en este estudio se obtuvo una buena correlación entre ambos.

Por otro lado, la composición elemental nos permite chequear la consistencia de la composición mineralógica. Los elementos Niobio y Aluminio, son comúnmente asociados a las arcillas y siguen la tendencia de Illita, Silicio, Titanio siguen la tendencia de Cuarzo y Feldespato. La composición elemental es usada para consideraciones paleo-ambientales como, por ejemplo: Molibdeno y Vanadio reflejan enriquecimiento autigénico en condiciones anoxicas, el Níquel es usado como un proxi de bio-productividad, este elemento es usado como micronutrientes, y se encuentra asociado en sedimentos con alto flujos de materias orgánicas (Fig. 8). Concomitante

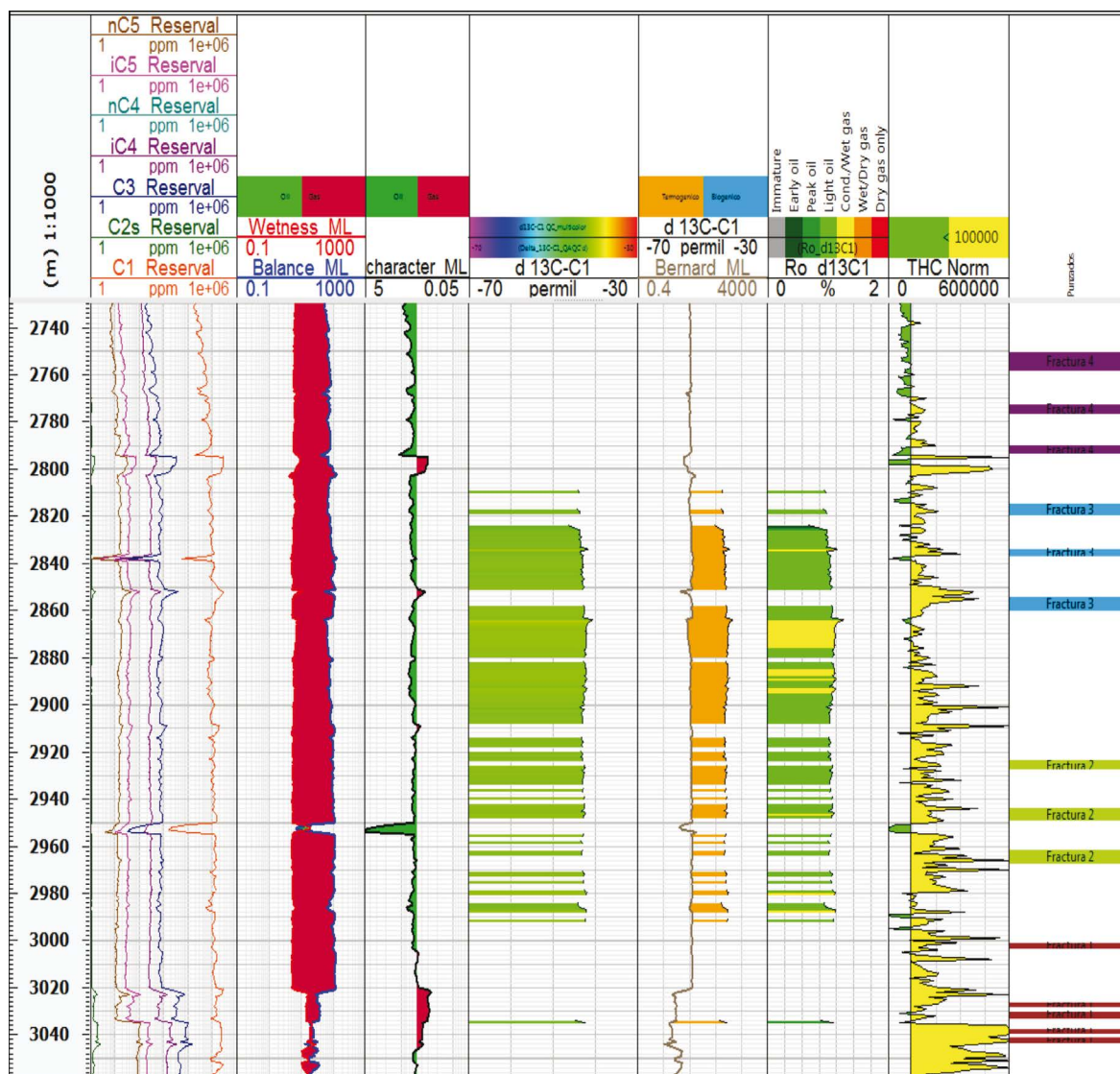


Figura 7. Análisis de relaciones cromatograficas.

con ese incremento de Níquel es posible observar el incremento de COT en la sección inferior del pozo, interpretado como una mezcla de incremento de bio-productividad y preservación, bajo condiciones reductoras. La alta productividad fue de origen marino, ya que los proxis detríticos en esta sección no aumentan.

El COT obtenido por DRIFTS fue comparado con el medido por LECO, el error promedio esperado para este tipo de comparación es de $\pm 1\%$ en peso, en este caso, en todo el intervalo la diferencia entre COT de DRIFTS frente al COT de LECO es de $+0.5\%$ en peso, con diferencias en muestras puntuales de 2900 m y 2910 m, superiores a $+1\%$, se cree que estas diferencias se podrían deber a contaminación en las muestras, no se pudieron repetir los análisis ya que no se contaba con mayor cantidad de estas muestras.

Etapas de Fractura # 1 (3002-3041mbbp)

Este intervalo se caracteriza por carbonatos (40%), seguidos por cuarzo y feldespato, y arcillas menores a 30%. Según la clasificación de Gamero Díaz (2012) este intervalo corresponde a fangolitas carbonáticas mixta (Fig. 9). Este zona presenta la mayor cantidad de COT hasta 6%, concomitantes hay incremento de U, Mo, V y Ni.

Etapas de Fractura # 2 (2923-2966mbbp)

En este intervalo, los carbonatos constituyen un 40%, las arcillas están presentes en un 30% y el 30% restante lo constituyen el cuarzo y feldespato. Según la clasificación de Gamero Díaz (2012) este intervalo corresponde a fangolitas mixtas (Fig. 9). El contenido de TOC varia de 3,2-hasta 3,8%. En esta zona se observa un ligero incremento en Niquel y Molibdeno.

Etapas de Fractura # 3 (2815-2855mbbp)

Altas concentraciones de carbonatos (mayores a 60%), principalmente calcitas caracterizan a este intervalo, con concentraciones iguales de arcillas, cuarzo y feldespato alrededor del 20%. Según la clasificación de Gamero Díaz (2012) este intervalo corresponde a fangolitas carbonáticas mixta (Fig. 9). El COT es alrededor del 3%.

Etapas de Fractura # 4 (2756-2792mbbp)

Este intervalo se caracteriza por el predominio de carbonatos principalmente calcita 40%, seguidos de Illita (arcilla dominante), cuarzo y feldespato conforman alrededor de 25%, la de dolomita y clorita se encuentran en un porcentaje menor al 10%, puntual presencia de esméctica. Según la clasificación de Gamero Díaz (2012) este intervalo corresponde a fangolitas carbonáticas mixta (Fig. 9). El contenido de carbono orgánico (COT) es alrededor de un 2.5%. En cuanto a la presencia de elementos, Ca, Si, Al son los predominantes, en tanto Mo, Ni y U aparecen con concentraciones ligera menores a 20 ppm.

En la Figura 8 en el registro compuesto de DRIFTS se observa de izquierda a derecha: Topes secuenciales de Vaca Muerta, etapas de fracturas, COT medido por DRIFTS, GR medido en pozo abierto, pseudo GR espectral, Mineralogía y COT en un registro cumulativo obtenido por DRIFTS, algunos de los elementos que sirven para realizar quimio-estratigrafía medidos por la técnica de Fluorescencia de rayos x y la última que columna corresponde a la madurez termal calculada por DRIFTS.

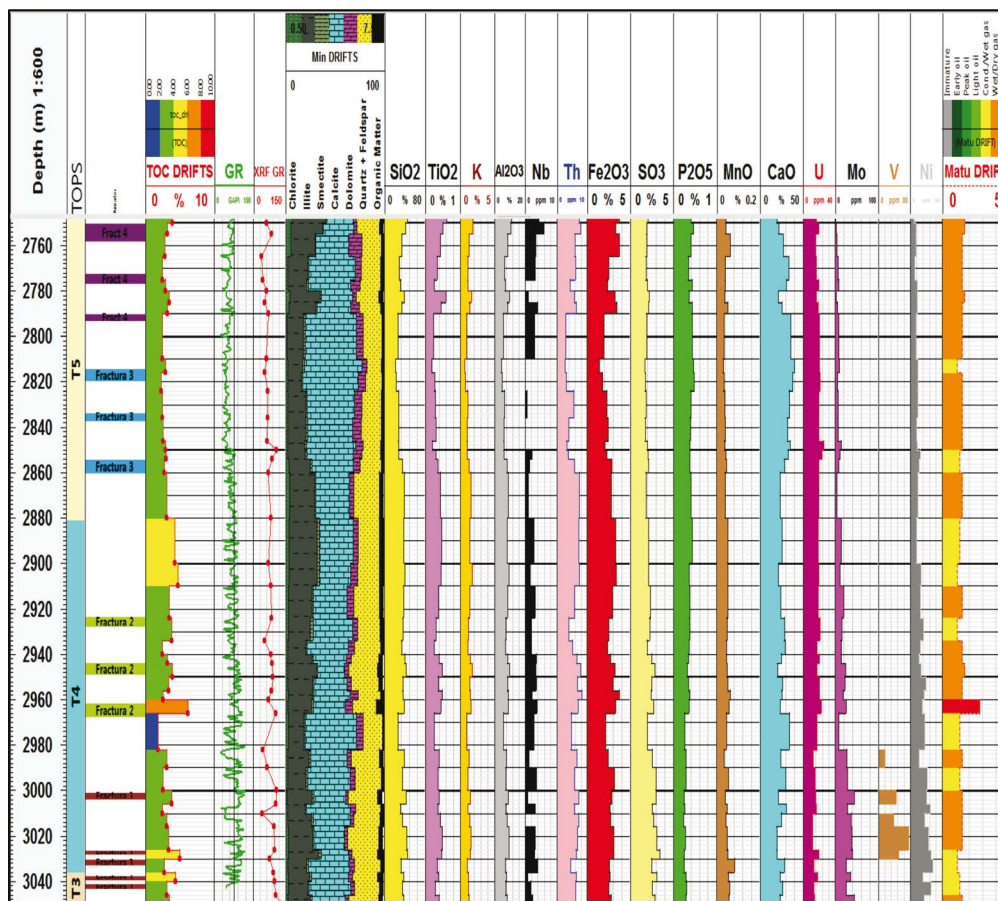


Figura 8. Registro compuesto de DRIFTS.

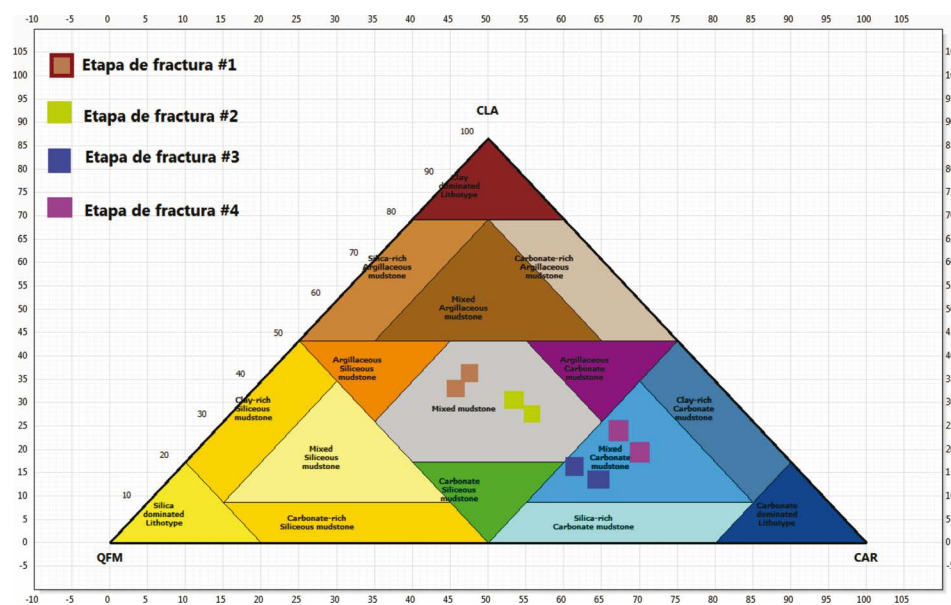


Figura 9. Diagrama triangular para todos los pozos (Gamero Díaz, 2012). Según la clasificación Gamero Díaz (2012) la litología representada por una alternancia de fangolitas mixtas y fangolitas mixtas carbonáticas. Los intervalos de fractura 3 y 4 se encuentra en el campo de margas carbonáticas mixtas, mientras los intervalos de fractura 1 y 2 están en el campo de margas mixtas.

CONCLUSIONES

- Se logró aplicar un método alternativo de caracterización de yacimientos no convencionales y compararlos con datos de laboratorio logrando una notable coincidencia.
- Los recortes de perforación (*cutting*) tienen la ventaja de ser siempre colectados y almacenados, pudiendo estos análisis realizarse en cualquier tiempo.
- En base estos estudios se verifica la alta heterogeneidad entre las litofacies encontradas en Vaca Muerta. En general, las litofacies consisten fangolitas mixtas, a carbonáticas.
- La metodología de DRIFTS es una técnica que combina la caracterización de mineralogía y contenido de materia orgánica, incluyendo además de una estimación de la madurez termal
- El COT obtenido por DRIFTS varía de 2,5 a 6%, mostrando un enriquecimiento hacia la base, concomitante con incrementos de molibdeno (Mo) y (Ni). Niquel, lo que nos indica mezcla de incremento de bio-productividad y preservación, bajo condiciones reductoras.
- Las relaciones cromatográficas de análisis de gases en el lodo sugieren un fluido liviano, en rango de gas seco. La mayor concentración de gas liberado, calculado por la fórmula de total hidrocarburos normalizadas proviene de la etapa de fractura 1, zona que, a su vez, documenta los mayores caudales iniciales.
- Se recomienda realizar estos estudios a nuevos pozos del bloque, para un mejor conocimiento de la Formación Vaca Muerta y sus variaciones areales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Tecptrol S.A., por el permiso para trabajar en estos datos y autorización para la publicación de esta experiencia. Al personal de Geoservices: Pablo Comba, Luis Seia, Martín Caicedo y Martín Casares por la dedicación y compromiso demostrados durante la ejecución de este servicio.

BIBLIOGRAFÍA

- | | |
|--|---|
| <p>Bernard, B., Brools, J.M; Sackett, W.M. Light Hydrocarbons in recent Texas continental shelves and slope sediments. J.Geophys., (S1P, V.83, P4053-4061,1978.</p> <p>Berner Ulrich, Faber Eckhard, 1996. Empirical carbón isotope/maturity relationships for gases from algal kerogens and terrigenous matter, based on dry, open-system pyrolysis, Org Geochem, 24:947-955.</p> | <p>Gamero Díaz, H., C. Miller y R. Lewis, 2012, sCore: a classification scheme for organic mudstones based on bulk mineralogy. Search and Discovery Article #40951.</p> <p>Kietzmann, D.A., Palma, R.M. y Bressan, G.S.2008. Facies y microfacies de la rampa tithoniana-berriasiana de la Cuenca Neuquina (Formación Vaca Muerta) en la sección del Arroyo Loncoche-</p> |
|--|---|

- Malargüe, provincia de Mendoza. Revista de la Asociación Geológica Argentina 63 (4): 696-713.
- Peano, M. Sanchez, Delgado, 2014. Muestreo continuo de isótopos: $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ en la Formación Vaca Muerta, Neuquén, Argentina. Registro continuo de isótopos $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ en superficie. Simposio de Evaluación de Formaciones: De Archie a los No Convencionales.
- Santiago, M., Vallejo, M., González Tomasini, F., González, G., Jait, D., Marchal, D., Köhler, G., Sattler, F., Maria, S., Feinstein, E., Depine, G., & Desjardins, P., Gomez Rivarola, L., Posse, F., Meissinger, V., Manoni, R., Soldo, J., Navarrete, N. y Kietzmann, D. (2014). Transecta Regional Fm. Vaca Muerta. IAPG, 10.13140/RG.2.1.5139.1602.
- Schoell, Martin, 1983, Genetic characterization of natural gases, AAPG bulletin, 67:2225-2238.
- Weaver, C. E., 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. Memoirs University of Washington 1: 1-595.
- Whiticar, M.J., 1996. Stable isotope geochemistry of coals, humic kerogens and related natural gases. International Journal of Coal Geology, 32: 191-215.