

METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT) UTILIZANDO DATOS DE PERFORACIÓN Y PERFILES LWD

Claudio Naidés^{1,2}

1: Pampa Energía. claudio.naides@pampaenergia.com

2: Universidad de Buenos Aires. cnaides@fi.uba.ar

Palabras clave: Carbono Orgánico Total (COT) – LWD – Cromatografía Gas Total

ABSTRACT

During the drilling of the wells with target at the Vaca Muerta Formation, in vertical pilots or horizontal wells, once of the most important property to evaluate is the Total Organic Content (TOC). In this paper, a novel methodology is presented to calculate the TOC using drilling information such Total Gas (GT) and Gamma Ray (GR) obtained in real time or memory by Logging While Drilling (LWD). This methodology is available to use in real time during the drilling operation, also in wells that is impossible to use Passey technique, because you do not have information such as Resistivity and Porosity logs.

This methodology to calculate TOC from a curve denominated Pseudo-Passey, initially was developed and calibrate in pilot vertical wells, where have organic geochemical data from labs and open hole logs. In this way, it was possible to calibrate the calculated TOC to be used regularly in all the drilled wells, particularly in the horizontal wells, and without need sophisticated logs information. The analysis and TOC calculation is very useful, during the drilling phases to monitor the quality of the targeted intervals, as well as in the evaluation of the horizontal wells, to characterize these intervals in relation the richness of the TOC.

INTRODUCCIÓN

La Formación Vaca Muerta es una de las rocas madres de la Cuenca Neuquina, la más importante en cuanto a sus propiedades de generación, distribución areal y posición estratigráfica. Por esto mismo en los últimos años se ha convertido en un objetivo primordial del desarrollo de hidrocarburos no convencional en la cuenca. En la Figura 1 se presenta un mapa regional de la Fm. Vaca Muerta, con su distribución de fluidos y la ubicación de los bloques en ventana de gas, donde Pampa Energía está presente como operador. Además, en la misma figura se presenta una columna estratigráfica donde se resalta la posición de la Fm. Vaca Muerta.

En los pozos perforados por Pampa Energía, tanto pilotos verticales como en las ramas horizontales, por distintas circunstancias, no fue posible tomar toda la información de perfiles

necesaria para realizar un análisis de las propiedades de la Fm. Vaca Muerta, Contenido Orgánico Total (COT) en este caso, de acuerdo con las metodologías conocidas, tal como el Método de Passey y/o utilizar la ecuación de Schmoker.

Por dicha razón se procuró encontrar una metodología de análisis con la información disponible de esos pozos, focalizándose en la determinación del COT con una mínima información, proveniente del análisis de gases de la cromatografía obtenida durante la perforación de los pozos y de un *Gamma Ray* (GR) obtenido a través de *Logging While Drilling* (LWD).

La mayoría de los pozos durante su perforación, pilotos verticales y horizontales, contarán como mínimo información de GR para su geonavegación en el caso de los horizontales y al menos curva de Gas Total (GT) proveniente de la cromatografía de gases.

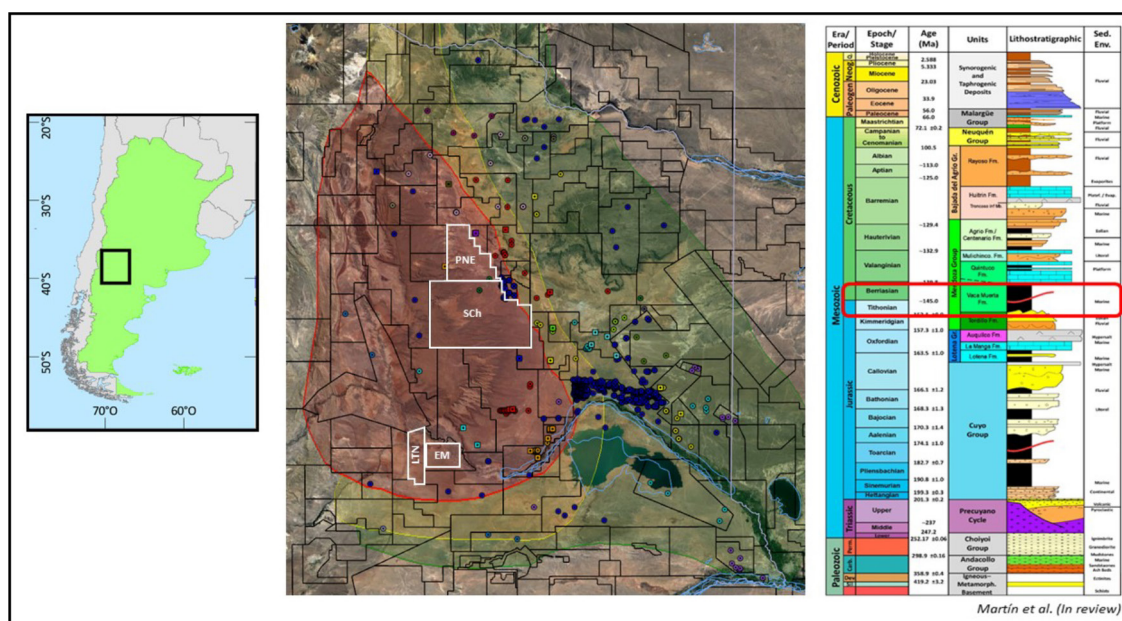


Figura 1. Mapa de ubicación, remarcado en color blanco áreas involucradas y columna estratigráfica.

METODOLOGÍA

El objetivo fue caracterizar ramas horizontales, principalmente determinar zonas de distintas calidades con la información disponible, en este caso se disponía de GR de LWD y Gas Total, por lo tanto, se desarrolló esta metodología utilizando estas curvas obtenidas durante la perforación de los pozos, el GR utilizado para la navegación de las ramas horizontales y el GT obtenido por la cromatografía.

La técnica aplicada, fue realizar un análisis con estas curvas similar al Método de Passey, solo que hubo que adecuar las respuestas que se logran en este método con las curvas de

Resistividad profunda (RT) y Porosidad (DT y/o RHOB) al set de datos que teníamos disponibles, GT y GR.

Para ello se asumió a la curva de GT obtenida de la cromatografía como si fuera una resistividad, en el sentido que, a mayores valores de GT, mayor RT, más hidrocarburo.

La curva de GR se puede relacionar con la cantidad de Contenido Orgánico Total (COT), de manera indirecta al asumir su respuesta como si fuera una curva de porosidad, en este caso cualitativa, mayor valor de GR, más COT, más porosidad. En la Figura 2 se muestra el ajuste entre estas curvas de registros a pozo abierto (OH) y LWD, provenientes de la perforación, en un pozo vertical. Justamente esta técnica fue desarrollada inicialmente en pozos pilotos verticales, donde se tiene toda la información completa, para luego ser aplicada en los pozos horizontales.

El Método de Passey consiste en utilizar el cambio entre la curva de RT y una de porosidad (DT, RHOB, o Neutrón) para identificar las potenciales zonas con presencia de rocas ricas en materia orgánica. Para esta separación es necesario ajustar estas curvas con una escala adecuada, que dependerá de cada área, para aplicar el principio de línea base, en zonas que no son rocas madres y la magnitud de la separación indica la cantidad de COT. La disponibilidad de datos de COT medidos en laboratorio es una condición necesaria para su calibración. La Figura 3 muestra un esquema de la lógica usada para la aplicación del método.

Esta relación empírica se puede cuantificar utilizando la relación denominada por Passey como DlogR, que se puede expresar de la siguiente manera:

$$DlogR = \log_{10} (RT/RT_{baseline}) + 0.02 * (DT - DT_{baseline}) \quad (1)$$

A partir del buen ajuste entre todas estas curvas, Figura 2, se aplicó el Método de Passey con las curvas de GR y GT donde los cambios en su respuesta indica la presencia de rocas ricas en materia orgánica. Esta respuesta es observada a partir de la superposición de estas curvas, en rocas sin o de bajo contenido de materia orgánica, para que queden destacadas las zonas con separación y que la magnitud de esa separación indica el contenido de COT. La curva obtenida se la denominó Pseudo DlogR y la Figura 4 muestra el resultado obtenido en un pozo piloto vertical y la comparación de la respuesta de ambos resultados.

La ecuación empírica utilizada es la siguiente:

$$Pseudo\ DlogR = \log_{10} (GT/GT_{baseline}) + 0.02 * (GR - GR_{baseline}) \quad (2)$$

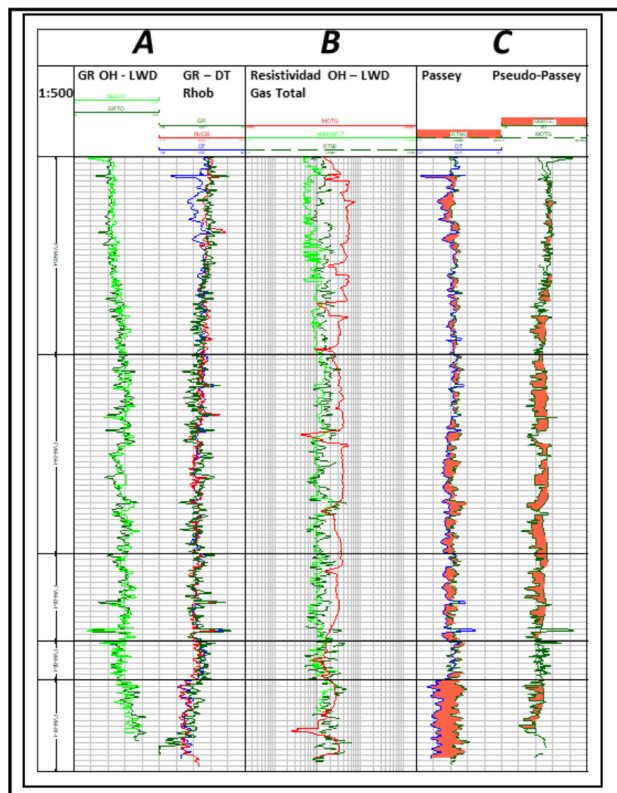


Figura 2. Perfil Pozo 1. A: curvas de GR OH y LWD y curvas de GR, Rhob y DT con escalas ajustadas acompañando los cambios de porosidad. B: curvas de resistividad OH y LWD y curva de Gas Total. C: Passey con curvas de RT y DT y Pseudo-Passey con curvas de GR-LWD y Gas Total.

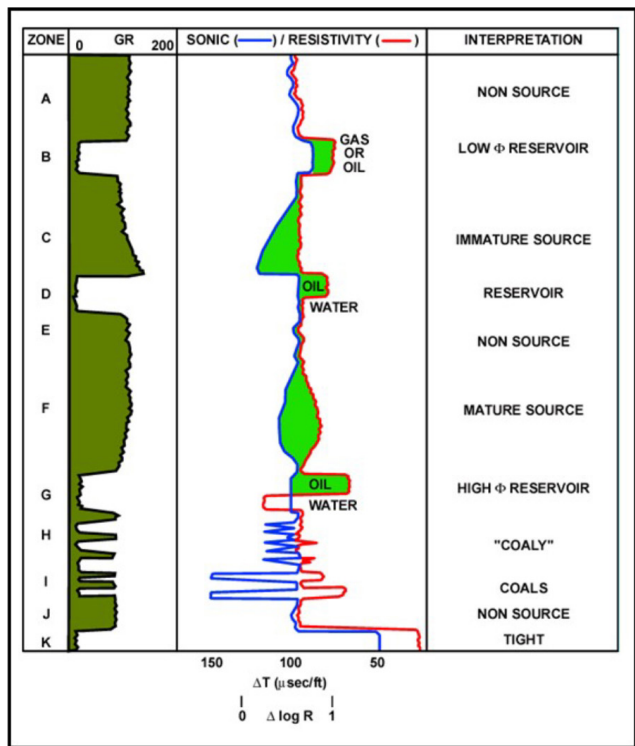


Figura 3. Esquema conceptual del Método de Passey, separación de RT y DT, también aplica para curvas de RHOB y Neutrón, para identificar zonas de rocas madres.

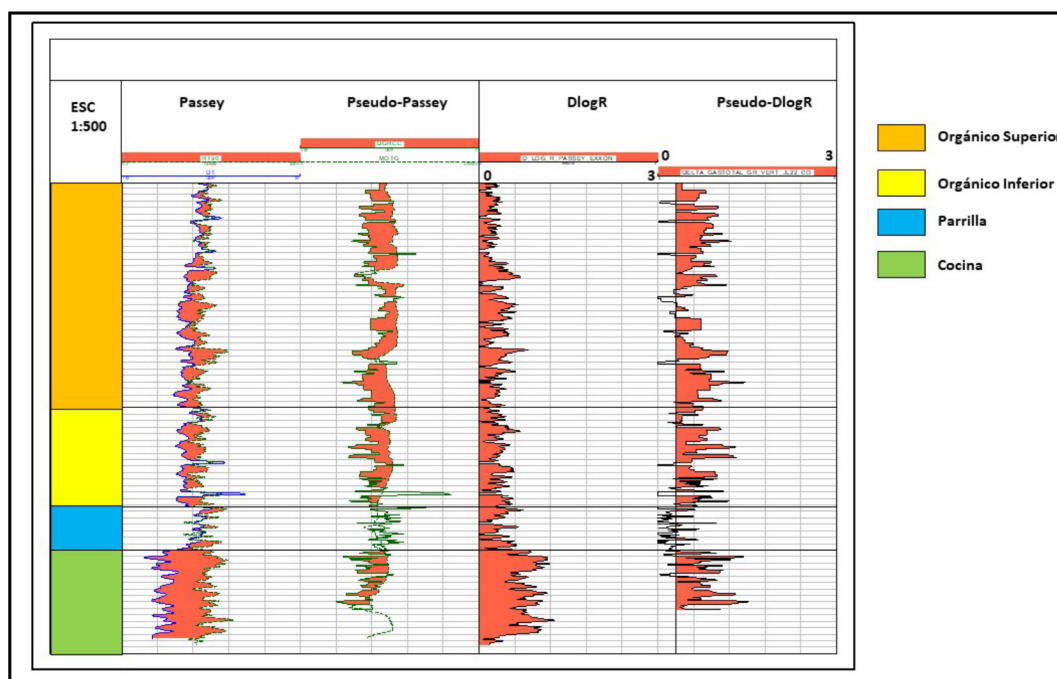


Figura 4. Ejemplo de un pozo piloto vertical del overlay de Passey y Pseudo-Passey y de los DlogR realizados con cada metodología.

El siguiente paso es calcular el COT, para ello existe más de una alternativa según el modelo de cálculo de COT que se elija en el análisis de los datos de pozo. Las técnicas que se pueden utilizar pueden ser, la ecuación de Schmoker y/o la ecuación de Passey y en ambos casos su resultado es calibrado con los datos de COT de laboratorio, tanto el obtenido a partir de datos de testigos corona, laterales o de *cutting*.

La ecuación de Schmoker descripta en Schmoker & Hester (1983) es la siguiente:

$$COT = [(100 * \rho_o) * (\rho - 0.9922 * \rho_m - 0.039)] / [(R * \rho) * (\rho_o - 1.135 * \rho_m + 0.675)] \quad (3)$$

Donde:

ρ = Densidad leída del perfil.

ρ_o = Densidad de la Materia Orgánica.

ρ_m = Densidad de la Matriz.

R = Relación entre porcentajes en peso de Materia orgánica y carbono orgánico.

Además de esta información que puede obtenerse con análisis de muestras de roca, es primordial tener un registro del perfil de densidad.

En tanto la otra ecuación que puede utilizarse la ecuación derivada del Método de Passey.

$$\text{COT} = (\text{DLogR}) * 10^{(2.297 - 0.1688 * \text{LOM})} \quad (4)$$

Donde:

$$\text{DLogR} = \log_{10} (\text{RT}/\text{RT}_{\text{baseline}}) + 0.02 * (\text{DT}-\text{DT}_{\text{baseline}}) \quad (1)$$

LOM = Nivel de Materia Orgánica.

De utilizar esta opción es condición necesaria tener un registro de perfiles de Resistividad y Sónico.

Como la metodología propuesta utiliza información de la cromatografía (GT) y el perfil de GR obtenido en LWD (pozo vertical o rama horizontal) se buscó la manera de calcular un COT, ya sea con el método de Schmoker o con el método de Passey utilizando el Pseudo DLogR o el Pseudo Passey.

La aplicación mas simple o directa es calcular el COT con el método de Passey de la ecuación (4) reemplazando directamente el DLogR por el Pseudo DLogR.

$$\text{COT} = (\text{Pseudo DLogR}) * 10^{(2.297 - 0.1688 * \text{LOM})} \quad (5)$$

Otra opción es encontrar una relación o función entre el DLogR o el Pseudo DLogR con el COT calculado con la ecuación de Schmoker.

La utilización de una u otra metodología dependerá cuál es el modelo óptimo de cada campo calibrado con datos de COT de laboratorio.

La Figura 5 muestra en un *Crossplot* la relación encontrada del Pseudo DLogR (eje x) y el COT calculado con la ecuación de Schmoker calibrado con los datos de COT medidos en laboratorio, de dos pozos.

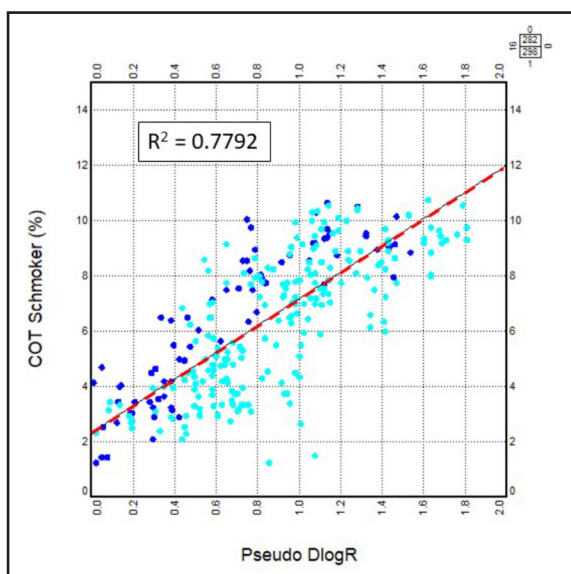


Figura 5. *Crossplot*, Pseudo DlogR (eje x) y COT ecuación de Schmoker (eje y).

La función resultante para obtener COT del *crossplot* de la Figura 5 es la siguiente:

$$\text{COT (\%)} = 2.33752 + 4.82725 * \text{Pseudo DLogR} \quad (6)$$

El R2 es 0.7792

El uso de la ecuación (5) se generó con datos de dos pozos pilotos verticales, que se espera a medida que se vayan incorporando mas datos, más pozos, se pueda tener un mejor ajuste en la función resultante y lograr así un resultado con mayor certidumbre. Siempre está la opción de ajustar y calibrar los resultados de esta ecuación con los datos de COT obtenidos de laboratorio, tal se muestran algunos ejemplos en los resultados.

RESULTADOS

La aplicación de esta metodología se realiza inicialmente en los pozos pilotos verticales donde se tiene la información completa, perfiles a OH, cromatografía, perfiles de LWD y datos medidos de laboratorio, especialmente en este caso, de valores de COT.

La Figura 6 muestra los resultados en un pozo piloto vertical de COT, con la ecuación de Schmoker con datos de perfiles de pozo, un COT sintético obtenido con la función de la Figura 5 (Ecuación 6) y por último un COT sintético con el método de Passey (Ecuación 5), en ambos casos el resultado del COT sintético se realizó a partir de la curva de Pseudo Passey. Todos los COT calculados se comparan con los resultados del COT de laboratorio.

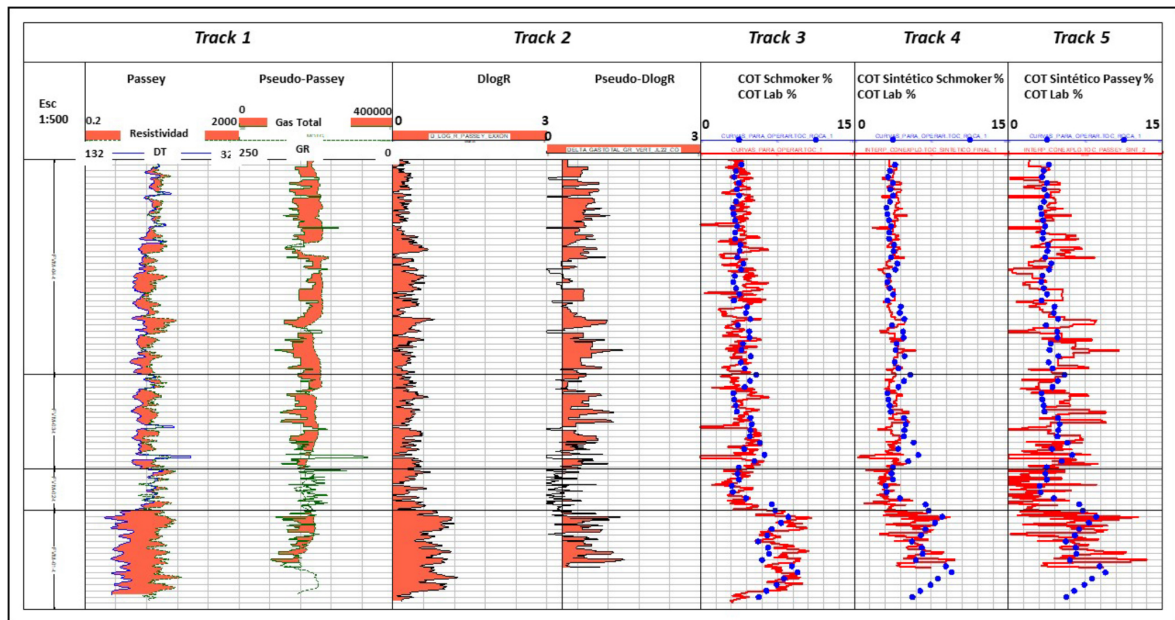


Figura 6. Resultados de COT en un pozo piloto vertical. Track 1, resultados de método de Passey y Pseudo Passey. Track 2, resultados de DLogR y Pseudo DLogR. Track 3, COT calculado con el método de Schmoker con la curva de Rhob, ecuación 3. Track 4, COT sintético calculado con la función de la ecuación (6). Track 5, COT sintético calculado con el método de Passey, ecuación (5), utilizando las el Pseudo DLogR. Los resultados de COT de los tracks 3, 4 y 5 se comparan con los resultados de COT medidos en laboratorio.

Los resultados de COT sintéticos, el obtenido a través de la ecuación 6, fue el que mejor ajustó.

De hecho, en los pozos que se evalúan, la ecuación elegida para calcular COT es la correspondiente al método de Schmoker.

La Figura 7 se presentan los mismos resultados en un histograma, donde se observan estadísticamente las similitudes en los resultados de COT.

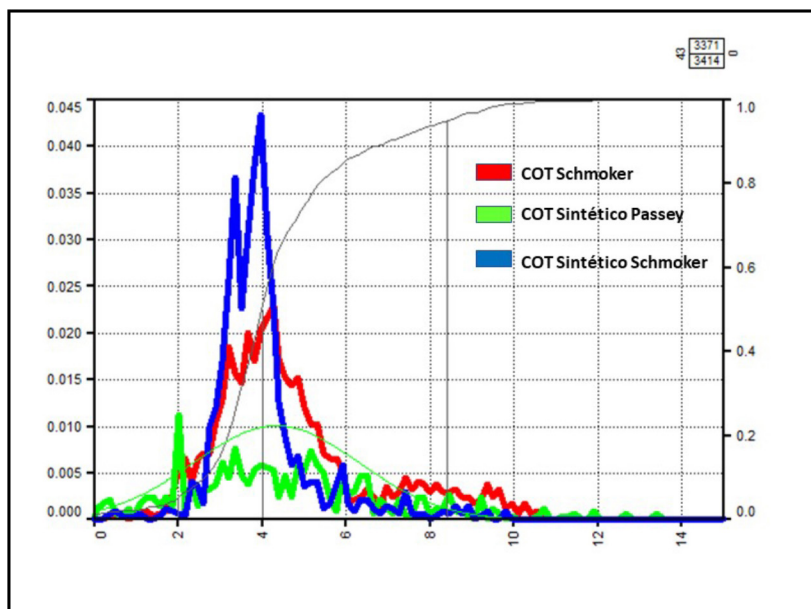


Figura 7. Histograma comparando los resultados de los COT calculados con los diferentes métodos en el pozo piloto vertical.

También se calculó el COT sintético en una rama horizontal perforada a partir del pozo piloto vertical anterior con objetivo a la cocina. Como en este caso no se calculó el COT con el método de Schmoker, por no tener perfiles registrados a pozo abierto, el resultado del COT sintético se comparó entre el pozo vertical y la parte del pozo direccional hasta llegar al punto de aterrizaje.

En esta rama perforada no se realizaron mediciones de COT de laboratorio, por lo tanto, no fue posible contrastar estos resultados con datos de COT de laboratorio. Es por ello que se hizo el esfuerzo de analizar los resultados al menos estadísticamente entre los tramos ajustados y calibrados del pozo piloto vertical con los COT sintéticos calculados entre los intervalos equivalentes.

La Figura 8 muestra los resultados en el tramo de la curva hasta llegar al punto de aterrizaje y un histograma para mostrar la distribución normal de los datos interpretados, con las diferentes metodologías.

En la Figura 9 se observa el COT calculado, con la metodología de Pseudo DLogR en la sección horizontal de un pozo, navegado en el intervalo Cocina y que no tiene COT medidos en

laboratorio, pero en el histograma se observa que su distribución es similar al interpretado para este intervalo en el pozo vertical (ventana de navegación de 10 m), donde el COT si está calibrado con datos de laboratorio.

En la Figura 10 se observa el resultado del COT sintético en toda la rama y de esta manera realizar un análisis expeditivo de las zonas con mayor y menor valores de COT. Este análisis

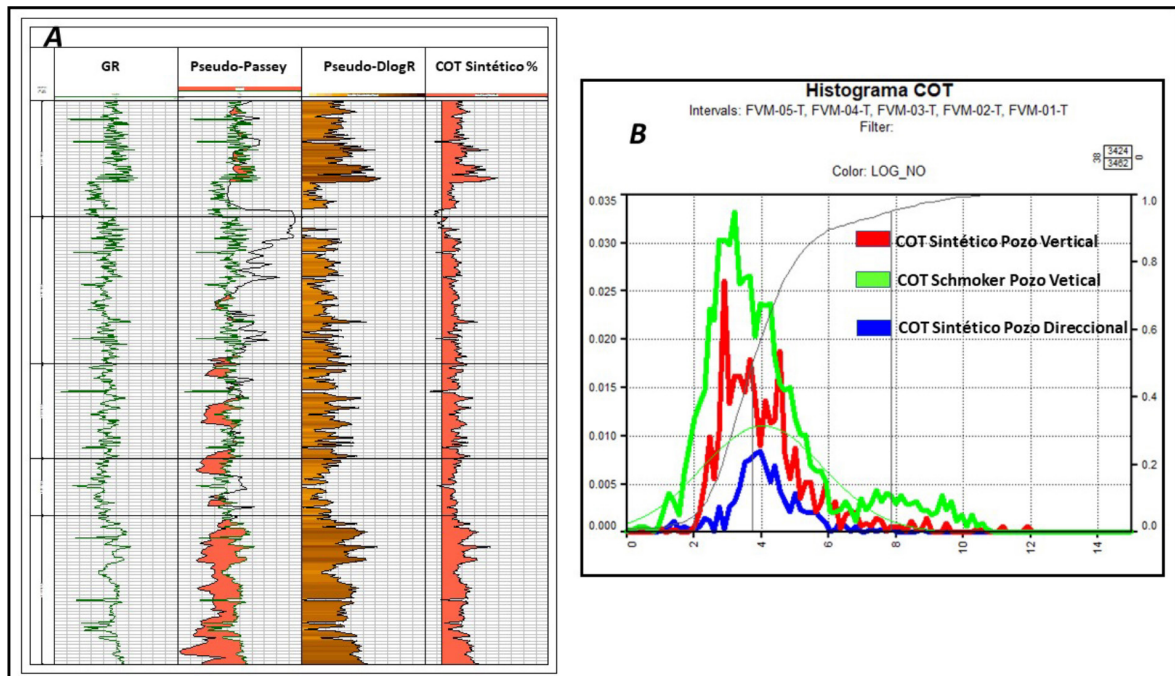


Figura 8. A- Perfil de pozo en la sección inclinada con el cálculo de Pseudo DlogR y COT sintético, no hay datos de laboratorio de COT. B- Histograma con la comparación de los COT calculados, con metodología de Schmoker y sintético en pozo vertical y COT sintético en la parte direccional del pozo hasta el punto de aterrizaje.

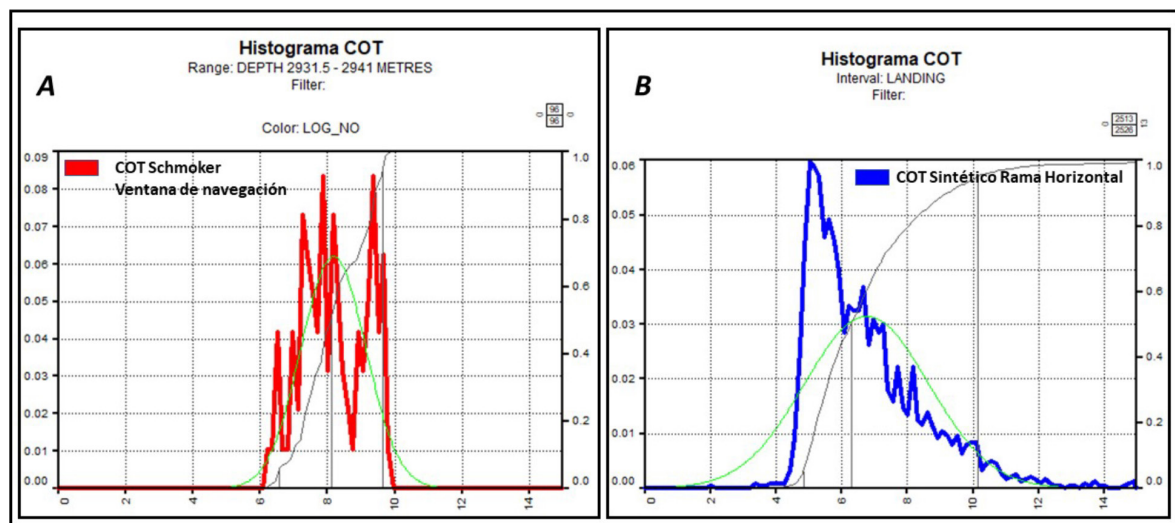


Figura 9. A- Histograma del COT con Schmoker de la ventana de navegación en el pozo piloto vertical. B- Histograma del COT sintético de la rama horizontal, con objetivo a la cocina.

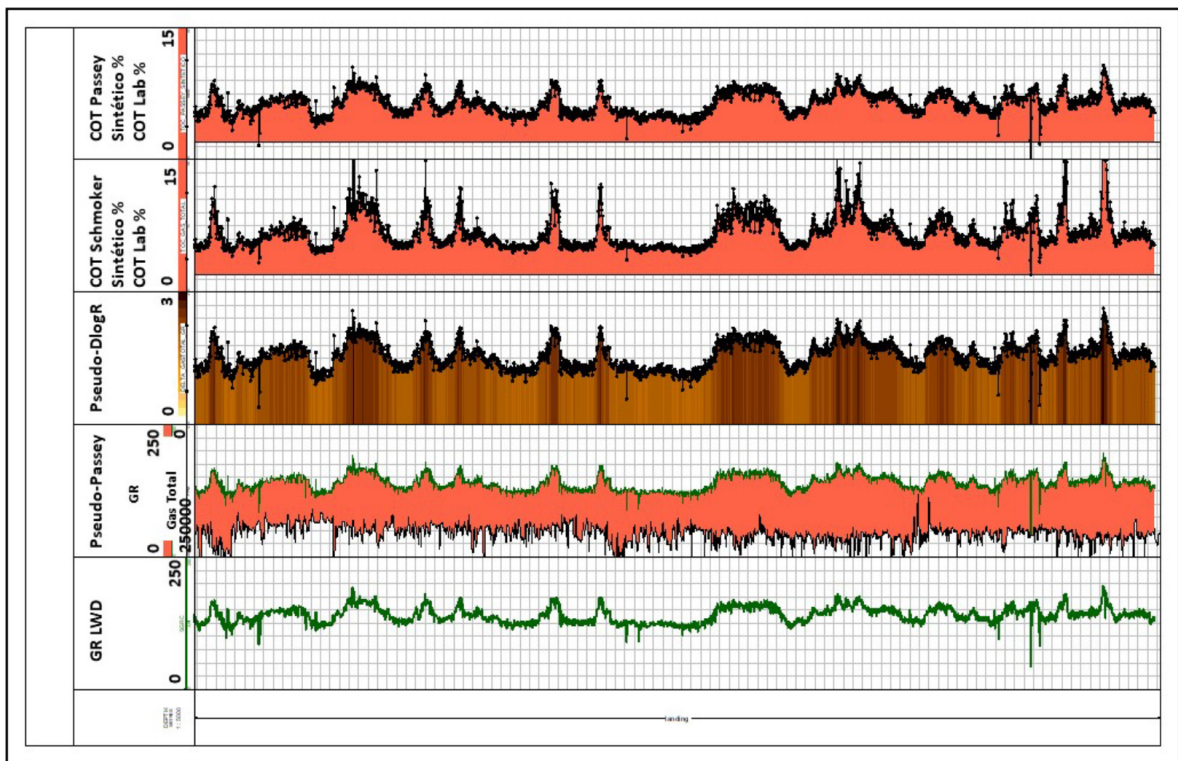


Figura 10. Pozo Horizontal de aproximadamente 2500 m. con las curvas de COT sintéticas, Schmoker y Passey. Se distinguen los distintos intervalos de calidades diferentes en función del COT calculado. Faltan valores de COT de laboratorio para calibrar sus resultados cuantitativamente, pero responden a los valores equivalentes del pozo vertical en el tramo navegado.

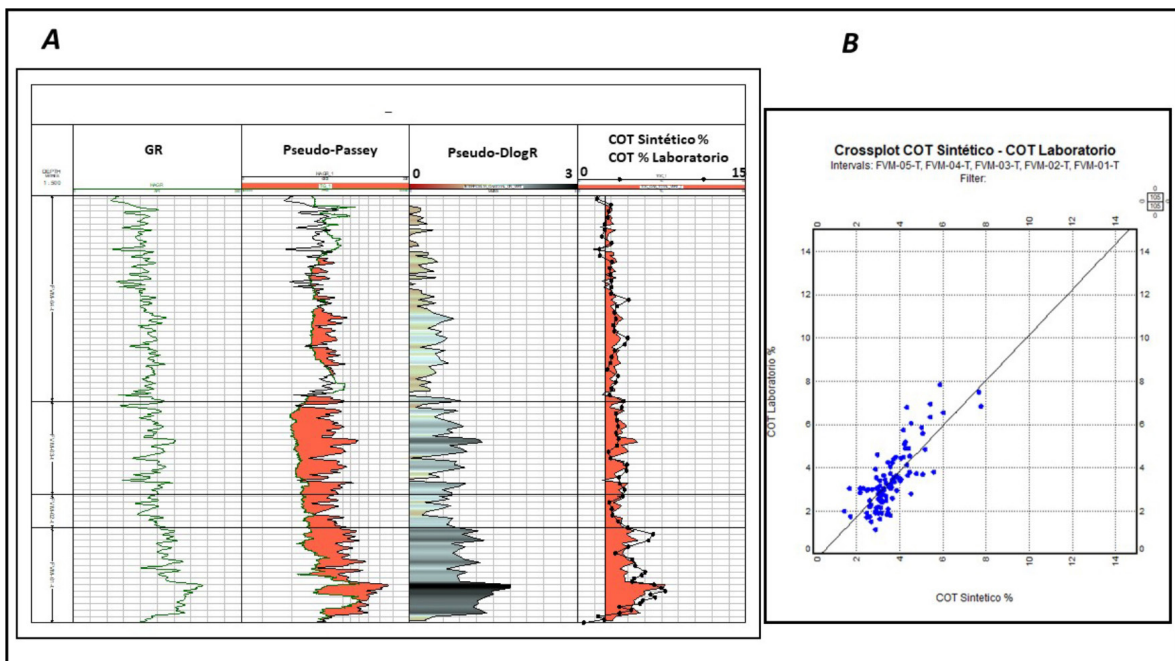


Figura 11. A - Pozo vertical sin registros de perfiles por razones operativas, Pseudo Passey y COT sintético con datos de COT de laboratorio. B - Ajuste entre COT calculado con Pseudo Passey y COT de laboratorio $R^2 = 0.7881$.

también puede servir como parte de un flujo de caracterización que puede ser relacionado a información dinámica del resultado después de las operaciones de estimulación del pozo y relacionar estas respuestas.

Como parte de un análisis que fue necesario realizar en un pozo vertical, que por razones operativas no se pudieron registrar perfiles, se implementó esta técnica del Pseudo Passey para tener al menos un perfil vertical del COT. En este pozo durante la perforación se obtuvo un GR de LWD y el GT de la cromatografía correspondiente.

La Figura 11, muestra el resultado obtenido y una aplicación práctica exitosa de esta metodología que permitió suplantar la falta de información de perfiles de OH por los obtenidos durante la perforación, GR y GT.

Además de calcular COT con la ecuación (3), existe la opción calcular el COT a partir de la curva sintética de Pseudo DlogR con otras técnicas, en este caso se muestra en la Figura 12 un ejemplo de un pozo horizontal de 2500 mts con objetivo a la Cocina, del resultado del COT sintético obtenido en este caso con una red neuronal, utilizando como dato de entrada la curva de Pseudo DlogR y los datos de COT de laboratorio como *target*.

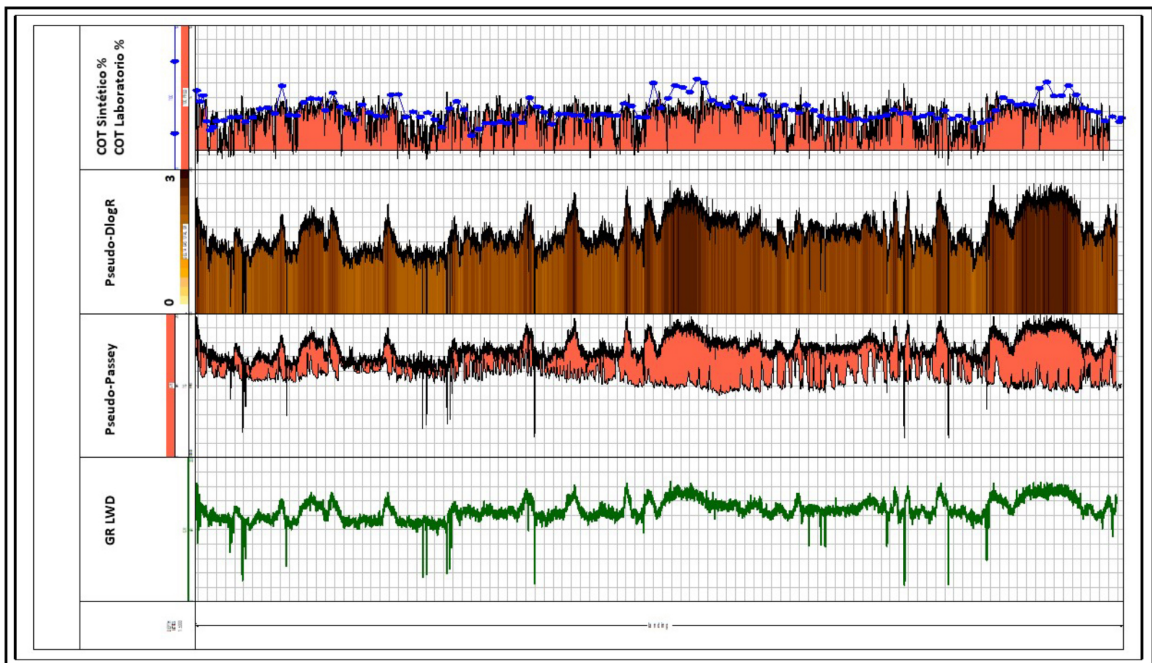


Figura 12. Ejemplo de pozo horizontal de aproximadamente 2500 mts con objetivo a la cocina donde se observa el resultado del Pseudo Passey, Pseudo DLogR y el COT calculado con una red neuronal ajustada a los valores de COT de laboratorio.

La Figura 13 muestra otro ejemplo de un pozo horizontal de aproximadamente de 2000 mts, en donde se observa el resultado a través del cálculo del COT sintético, utilizando la ecuación 6 o sea un COT sintético de Schmoker y un COT sintético calculado con la ecuación 5 de Passey, ambos resultados ajustados con los datos de COT de laboratorio.

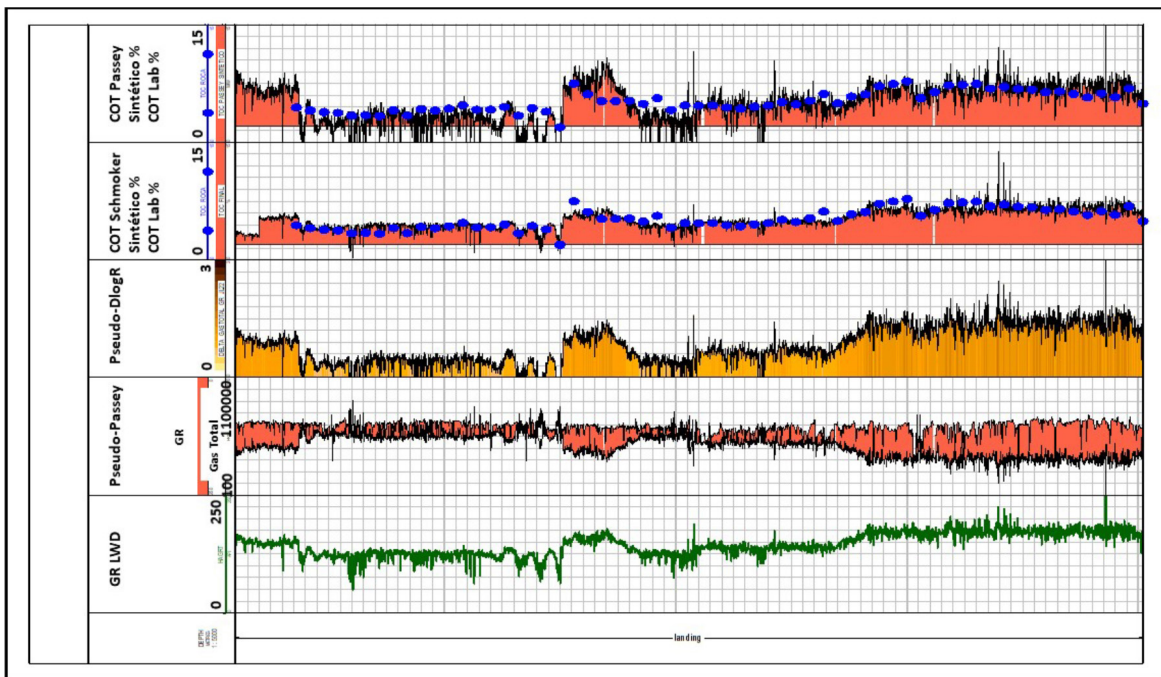


Figura 13. Pozo horizontal de aproximadamente 2000 mts con el COT sintético comparado con el COT de laboratorio.

En la Figura 14 se muestra un flujograma de esta metodología, a modo de resumen para su aplicación.

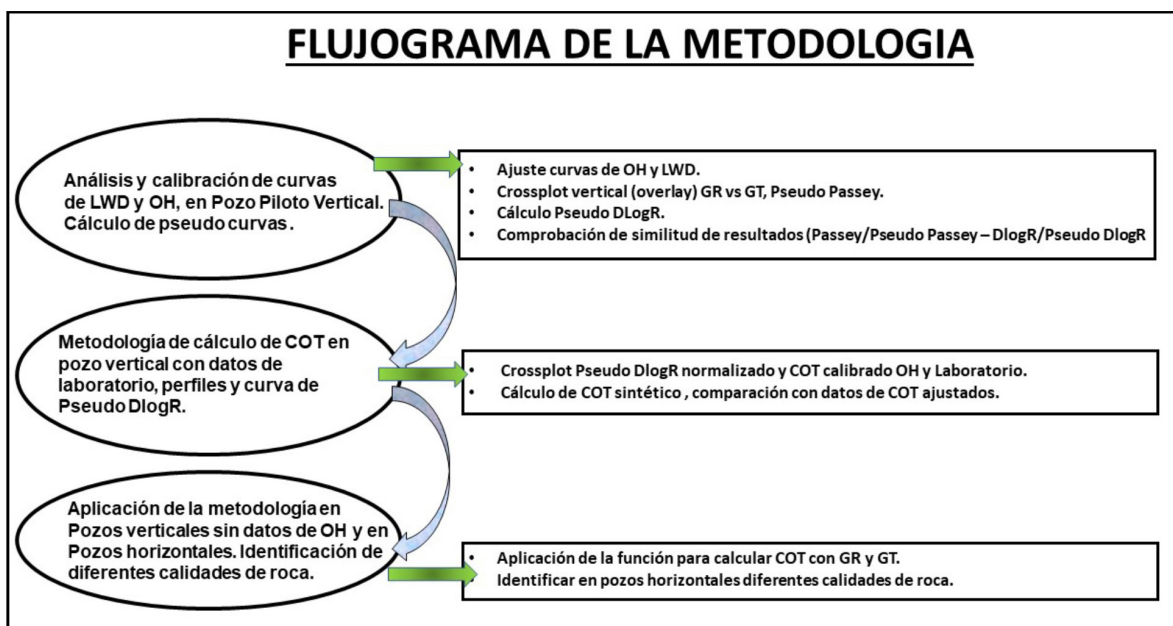


Figura 14. Flujograma de la metodología desarrollada y aplicada.

CONCLUSIONES

Esta metodología de utilizar curvas de GR de LWD y el GT de la cromatografía, que se obtienen durante la perforación de los pozos casi de manera rutinaria y de bajo costo respecto al costo total de un pozo, permite realizar un análisis entre estas curvas similar al que se realiza con las curvas de Resistividad y Porosidad (Método de Passey). En este caso la relación entre las curvas de GR y GT permite realizar un overlay similar al Método de Passey, al que denominamos Pseudo Passey.

A partir de este análisis se genera una curva denominada Pseudo DLogR, similar a la que se obtiene con el Método de Passey (DLogR) y a partir de una relación entre esta curva obtenida y los valores de COT calculados ajustados con datos de laboratorio, se obtuvo una función que permite calcular un COT sintético, ecuación 6. Además, se puede calcular un COT sintético utilizando la técnica de Passey, Ecuación 5.

Esta metodología puede ser de gran utilidad para caracterizar el COT con datos rutinarios sin costo adicional, tanto en tiempo real como después de terminar la perforación de los pozos. Si fuera necesario estos valores de COT pueden ser calibrados con datos de COT de laboratorio.

Además, con esta técnica en las ramas horizontales, es posible realizar un análisis de distintas calidades de roca, en función del COT, y relacionarlas con datos de producción u otros para poder realizar completaciones más eficientes.

A medida que tengamos mayor cantidad de pozos perforados y por ende más datos, esta técnica podrá ser optimizada y lograr menor incertidumbre en los resultados.

AGRADECIMIENTOS

A Pampa Energía por permitir publicar este trabajo, a Denis Marchal por la lectura crítica de este trabajo y a los colegas de la Gerencia de Shale por la discusión constante sobre los resultados obtenidos en cada pozo donde se aplicó esta metodología.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|--|--|
| <p>Passey, Q. R., Creaney, S., Kulla, J. B., Moretti F. J., and Stroud, J. D., 1990. A practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs, AAPG Bulletin, 74, p. 1777-1794.</p> | <p>Schmoker, J. W., Hester, T. C., 1983. Organic Carbon in Bakken Formation, United States Portion of Williston Basin, AAPG Bulletin, 67 p. 2165-2174.</p> |
|--|--|

