

OPTIMIZACIÓN DE PERFORACIÓN DE TRAMOS VERTICAL Y CURVA A PARTIR DE PROPIEDADES GEOMECÁNICAS

Rodrigo Escobar¹, Francisco Mela², Martín Rozado¹

1: YPF S.A. rodrigo.a.escobar@ypf.com

2: Chevron Argentina. fjmela@chevron.com

1: YPF S.A. martin.d.rozado@ypf.com

Palabras clave: Geomecánica, UCS, ROP, tasa de construcción, trayectoria

ABSTRACT

Since the beginning of the development of unconventional wells, drilling times have been optimized through the implementation of new technologies and best practices acquired in more than 250 wells drilled to date. In search of continue optimizing times, it was observed in the Loma Campana block that drilling times of vertical section and curve in a horizontal well are not the same throughout the area, despite using a similar drilling design and comparable BHA (Bottom Hole Assembly) sets.

The loss of effectiveness in the construction of the curves is associated with variations in the depositional system that conditions the thickness of the organic Vaca Muerta and impacts the petrophysical and geomechanical properties, among others.

From the analysis of the mechanical properties, Dynamic Young's Modulus (Edyn) and Uniaxial Compressive Strength (UCS), the depths where good drillability is expected were adjusted, which allowed modifying the design of the well trajectory, mainly decreasing the Dog Leg Severity (DLS) in stratigraphic levels that present values higher than 6 Mpsi of Edyn and 21000 psi of UCS. Units with lower values in these properties show a better response of the BHA to build the curve. In this way, it was possible to increase the rotation times and make the *build up rates* (BUR) more efficient when sliding. Applying this analysis, together with new tools, it was possible to reduce drilling times in the interval from KOP (kick of point) to LP (landing point), obtaining records in the field and in the Unconventional Regional.

INTRODUCCIÓN

En la Formación Vaca Muerta (VM) las propiedades geológicas, petrofísicas, geomecánicas, geoquímicas y de fluidos responden a variaciones del ambiente deposicional, así como a la evolución tectosedimentaria de la cuenca. En el bloque Loma Campana, la caracterización geológica ha permitido identificar 8 ámbitos en los que se observa variabilidad, tanto lateral como vertical. Debido a esto, a pesar de tratarse de un único yacimiento, su desarrollo requiere de enfoques muy diferentes dependiendo la subzona a desarrollar (Fig. 1).

La dirección de mayor heterogeneidad es en sentido Sudeste-Noroeste, coincidente con la dirección de profundización de la cuenca. Mientras el espesor de VM es de alrededor de 80 m en la zona SE, en el NO supera los 300 m (Sagasti *et al.* 2014). Esto significa que se puede desarrollar la zona SE con pozos horizontales en 2 niveles mientras que en el NO se podría llegar a perforar hasta 5 niveles. Esta diferencia de espesores impacta en la performance de perforación, tanto del tramo vertical como curva, y depende de la zona del campo donde se perforen los pozos.

A lo largo del desarrollo de Loma Campana se ha generado una curva de aprendizaje orientada a la construcción de la sección curva de un pozo, uno de los principales ofensores de los tiempos de perforación. Comparando los distintos bloques de YPF, sobre todo en la Regional No Convencional (NOC), se ha visto que resulta más complicado perforar la sección curva del pozo, en términos de performance y tasa de construcción. A partir de los pozos NOC perforados en campañas 2019/2020, se logró establecer un perfil direccional optimizado el cual consiste en solicitar dog leg severity (DLS) de 5° en Fm. Quintuco, y 30 m por debajo del pase a VM, solicitar 7.5° cada 30 m (Fig. 2a). De esta manera se buscaba que la mayor parte de la curva se realice en VM.

Al replicar las mismas técnicas en zona B y C del campo, que funcionaron relativamente bien en zona D y zona A, no se obtuvieron los mismos resultados. Las tasas de construcción (*build up*

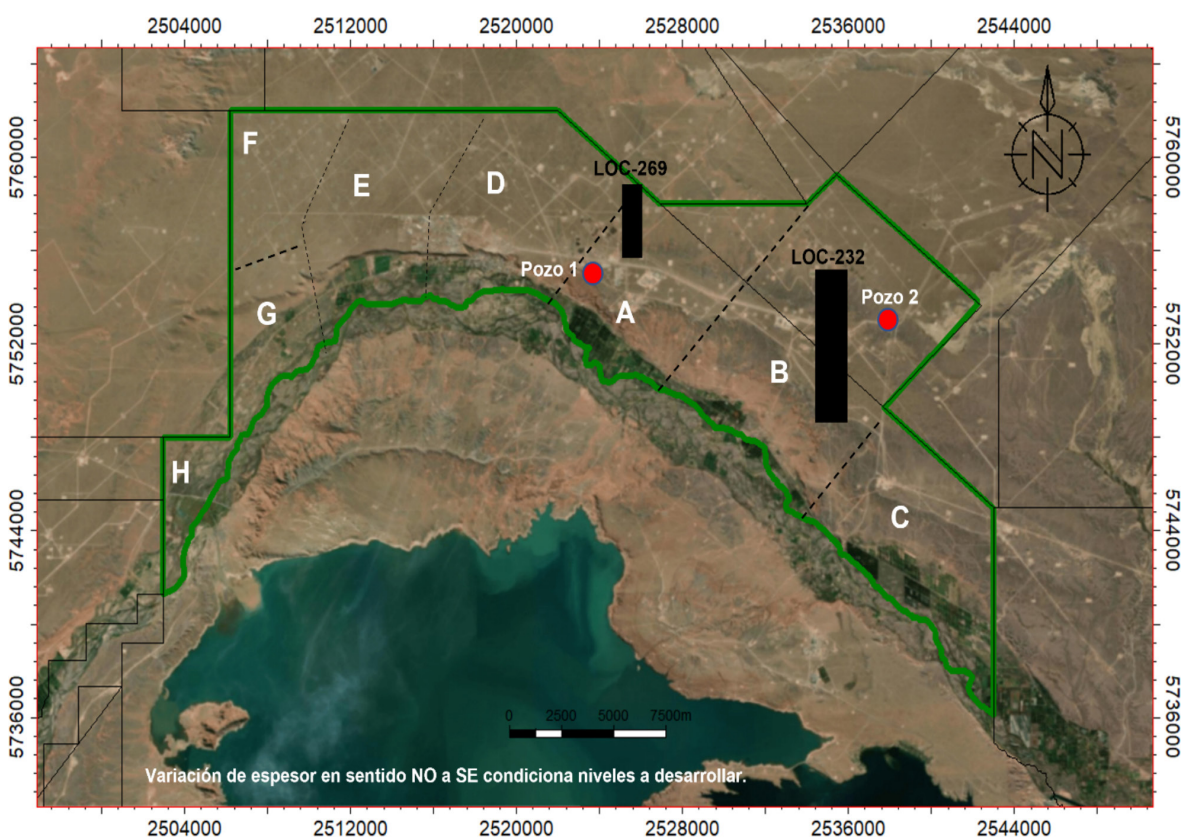


Figura 1. Ubicación de bloque Loma Campana (verde) con las locaciones y pozos que se usaron para el estudio.

rate - BUR) resultaron ser claramente inferiores respecto a lo planificado y existía el riesgo de no cumplir la trayectoria, aun incrementando mucho el porcentaje de *slide* (perforar deslizando). Esto implicó en varias oportunidades realizar maniobras adicionales y no planificadas de cambio de conjunto direccional para poder construir con una tasa mayor y asegurar el aterrizaje en *target*. Sumado a esto las perforaciones tenían una performance menor, tanto en el tramo vertical como en el tramo curva y que en total se distaba más de un día respecto al mejor tiempo logrado en zona A y D (Fig. 2b).

A modo de ejemplo, la Figura 3 representa el motor yield (rendimiento del motor al máximo potencial de deslizamiento) de un pozo ubicado en LOC-232, zona B del campo. En ella se puede observar el rendimiento y la tasa de construcción del conjunto de fondo. Las barras verdes claro (motor *yield*) representa el DLS, máximo potencial de la tasa de construcción en grados cada treinta metros ($^{\circ}/30\text{m}$) si se deslizará el tiro completo. Las barras verde oliva (*build up rate*) representan la tasa de construcción real medida en el survey. En cuanto a los gráficos de líneas, la curva roja ($\% \text{Sliding}$) representa el porcentaje deslizado y la curva naranja la inclinación del pozo en el survey. En el intervalo de 3023 m a 3105 m aproximadamente podemos observar que de 3 a 5 tiros tienen una tasa de construcción mucho menor a lo esperado teniendo que deslizar una gran parte, incluso hasta la totalidad del tiro.

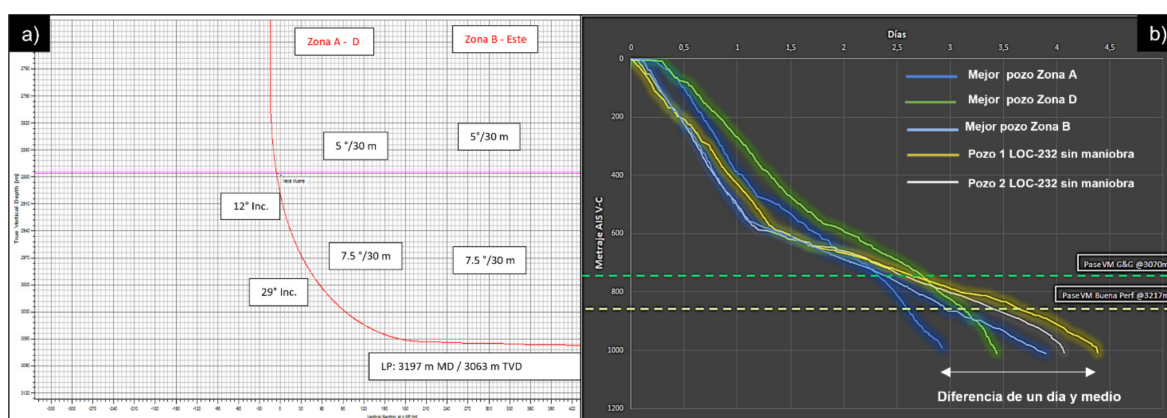


Figura 2. a) Perfil de diseño de trayectoria usado antes de optimización de este trabajo. b) Tiempo de perforación de tramo vertical y curva de mejores pozos por zona vs pozos LOC-232 sin contemplar tiempos de maniobra. Notar diferencia de un día y medio respecto a mejor pozo de zona A.

Sabemos que la ROP (*Rate Of Penetration*) deslizando es drásticamente menor a la ROP rotando, por tanto, no es solo el riesgo de no aterrizar en *target* planificado, sino que también tiene asociado un detrimento significativo en performance.

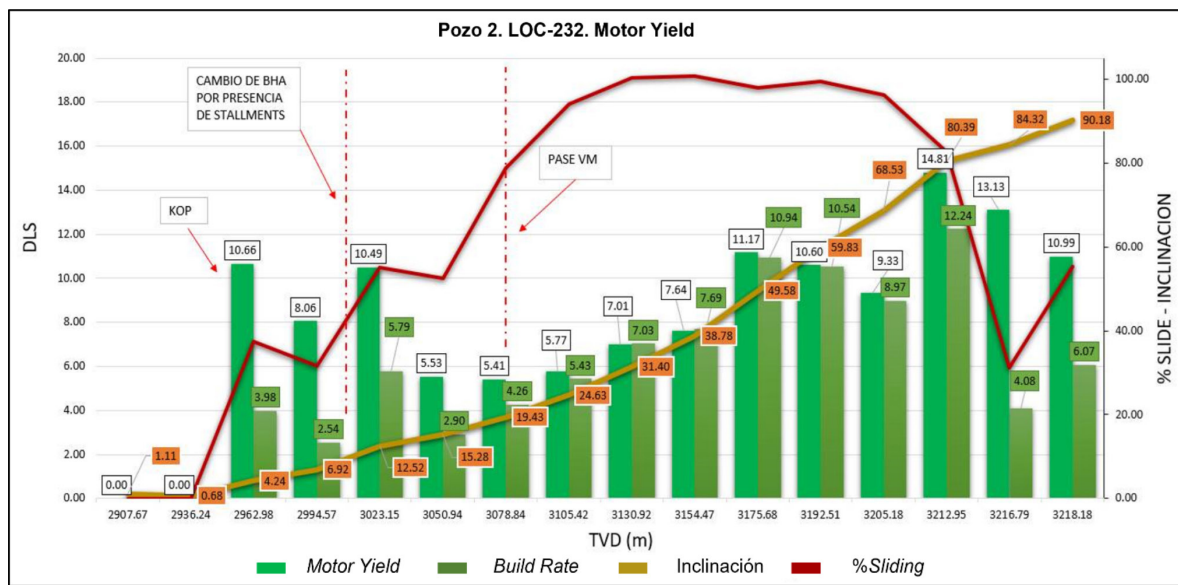


Figura 3. Motor Yield de segundo pozo de LOC-232. Motor Yield: máximo potencial en BUR (full slide). Build up rate: BUR real obtenido en el Survey. Inclinación: La inclinación del pozo en el Survey. % Sliding: Porcentaje de deslizado.

ANÁLISIS DE SUBSUELO

Geología

Como se plantea al inicio, las propiedades de la Fm. Vaca Muerta varían de una posición a otra. Ante la imposibilidad de replicar la estrategia direccional vigente con buenos resultados se analizó, en un contexto regional, cómo está distribuido el esqueleto estratigráfico de Vaca Muerta para así entender las variaciones laterales y verticales.

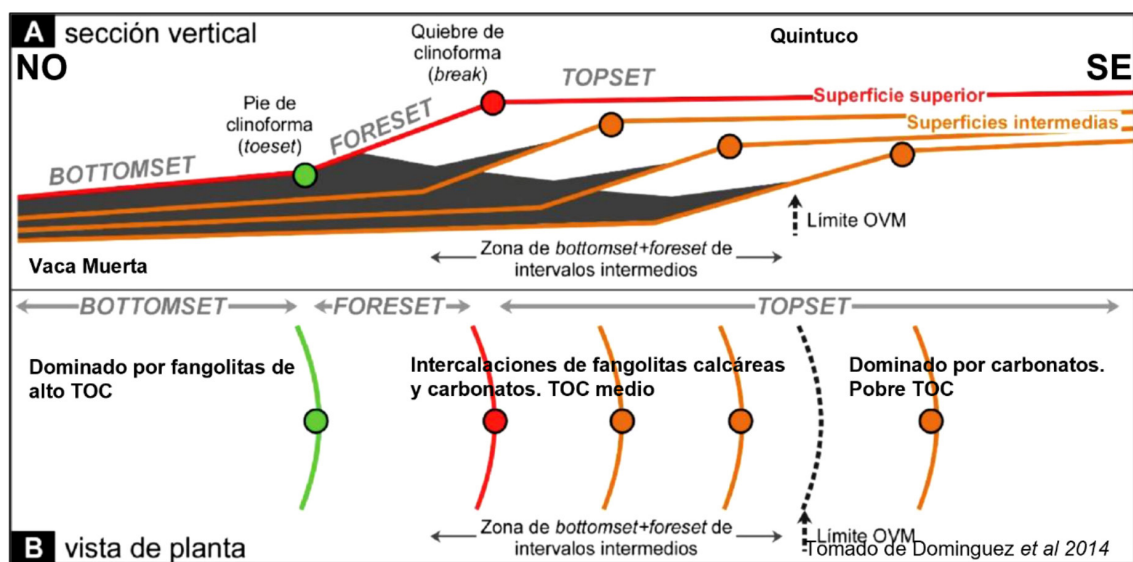


Figura 4. Modelo deposicional propuesto para el sistema Vaca Muerta - Quintuco donde se sintetizan las principales características litológicas de cada uno de los segmentos geométricos de las clinoformas.

En la Figura 4 se detalla el modelo deposicional propuesto para el sistema Vaca Muerta – Quintuco donde se sintetizan las características litológicas principales de cada uno de los segmentos geométricos (*topset*, *foreset*, *bottomset*) que conforman a las clinoformas (Dominguez *et al.* 2014).

Se toma este modelo para explicar los cambios de espesores y cómo condiciona las variaciones de propiedades que se presentan en las distintas áreas.

La Figura 5a representa una sección NO-SE del área de estudio, en la que se muestra el contenido orgánico total (COT) obtenido a partir de la correlación directa con impedancia acústica siguiendo la sísmica (Reijenstein 2021). En ella se puede diferenciar los segmentos de la clinoforma y litofacies. En colores más cálidos aparecen las facies correspondientes al *bottomset*, son fangolitas ricas en COT. Hacia el *foreset* corresponden a fangolitas calcáreas y carbonatos con una riqueza media. Hacia el tope de la sección, en colores fríos aparecen los carbonatos del *topset* correspondiente a la Fm. Quintuco.

Desde el punto de vista de la perforabilidad de la formación resulta que cuanto mayor sea el contenido orgánico (COT) más blanda será la roca. Con este criterio, y como una primera aproximación, se generaron mapas de espesor a cada nivel objetivo considerando el tope de Vaca Muerta con COT mayor al 2% (Fig. 5b).

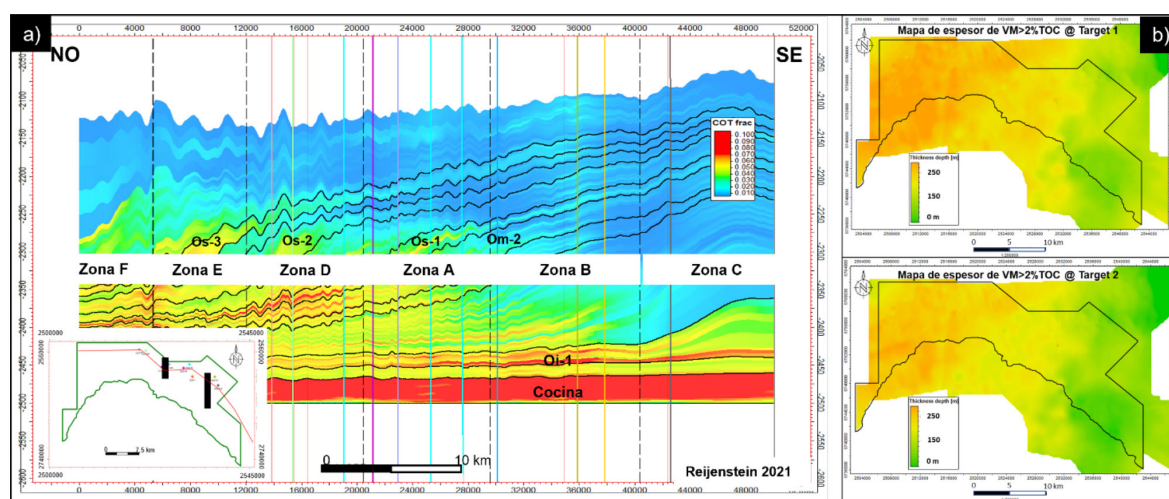


Figura 5. a) Izquierda: Sección NO-SE del COT obtenida a partir de la correlación directa con impedancia acústica (Reijenstein 2021). b) Derecha: Ejemplos de mapas de espesor de algunos niveles objetivos en Loma Campana.

Aunque la implementación de los mapas isopáquicos resultaron muy útiles para distinguir zonas de mejor perforabilidad, no reflejan las dificultades asociadas a la zona de transición, zona donde no se obtienen los BUR planificados, lo que deriva en riesgo de aterrizar fuera del nivel objetivo.

Propiedades Mecánicas - Módulo de Young y Resistencia a compresión uniaxial

Uno de los principales parámetros que caracterizan el proceso de deformación de un material elástico lineal es el Módulo de Young (E). Tal propiedad se define como la relación entre el esfuerzo y la deformación en un estado de tensión uniaxial. Da idea de la rigidez del material, es decir, de la resistencia a la deformación uniaxial. Así un material más rígido tendrá un módulo de Young mayor, por lo tanto, sufrirá menor deformación cuando es sometido a esfuerzos. Por el contrario, un material menos rígido tendrá un módulo de Young menor, y consecuentemente sufrirá mayor deformación cuando sometido al mismo esfuerzo (Fig. 6 a).

Otra propiedad para caracterizar la deformación es la Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS). Este parámetro da el valor del esfuerzo en el momento en que ocurre la falla en una roca (Fig. 6 b).

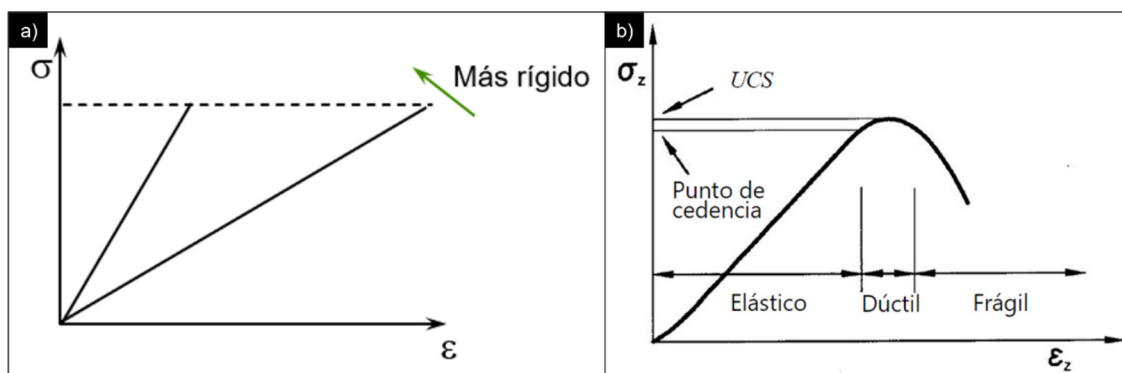


Figura 6. Diagrama esfuerzo-deformación de un material elástico lineal a) Izquierda: la pendiente representa el módulo de Young. b) Derecha: el punto máximo donde ocurre la falla del material representa el UCS.

Los valores de UCS son muy usados en perforación para la selección del trepano y para definir los rangos de parámetros a aplicar.

Ambas propiedades se pueden determinar en laboratorio a partir de un ensayo donde se aplica gradualmente una fuerza axial a un cilindro de roca hasta generar su rotura.

El bloque de estudio cuenta con un modelo 1DMEM (1D *Mechanical Earth Model*) isotrópico y otro anisotrópico donde las propiedades mecánicas se calibraron a partir de datos de laboratorio y se complementaron con correlaciones previamente establecidas por YPF. En este trabajo se usó el Módulo de Young dinámico (E_{dyn}), obtenido a partir de velocidades de ondas elásticas, y el UCS, estimado a partir de correlaciones empíricas de Regional NOC (Varela y Hasbani 2017). Se eligió el módulo dinámico de E sobre el estático asumiendo que refleja la condición de subsuelo sin la perturbación causada por la perforación.

Para el análisis de estas propiedades se usaron los pozos *offset* más cercanos a las locaciones de estudio. Para la zona A se usó el Pozo 1 como *offset* de la locación LOC-269 y para la Zona B el pozo 2, *offset* de LOC-232 (Fig. 1). A modo general las propiedades mecánicas tienden a

aumentar a medida que nos desplazamos hacia el SE del campo. Lo mismo sucede verticalmente, niveles estratigráficos más profundos en zona B presentan valores mayores respecto a zona A. Caracterizando más en detalle se observa que por encima del tope de VM en zona A (2850 mTVD) el $E_{dyn} > 7.5$ Mpsi y el $UCS > 28000$ psi, mientras que en zona B (3075 mTVD) el $E_{dyn} > 7.5$ Mpsi y el $UCS > 30000$ psi. El espesor “efectivo” desde el tope de VM hasta el nivel comparado resulta en 215 m en zona A contra 135 m en zona B (Fig. 7).

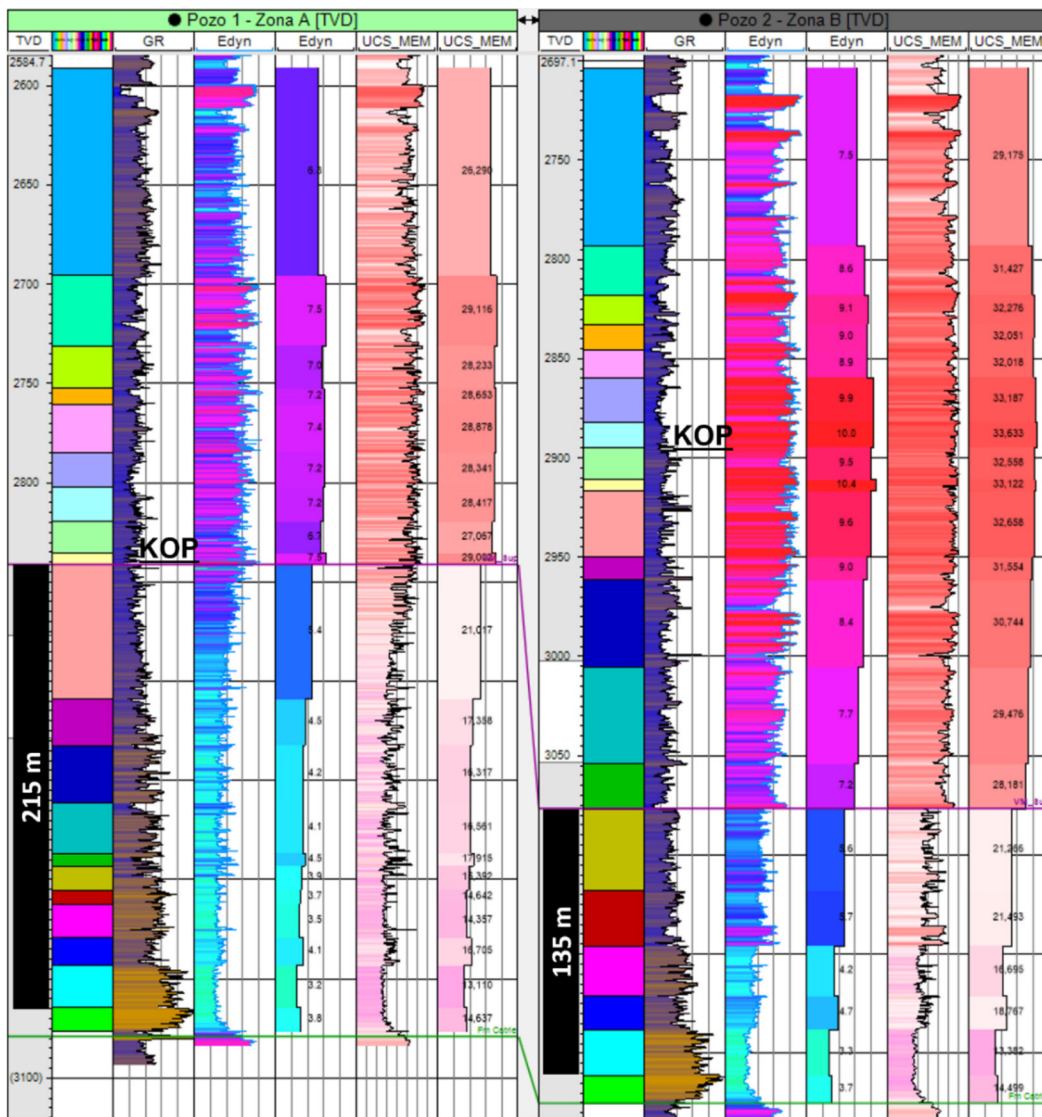


Figura 7. Sección con pozos *offset* mostrando las variaciones de propiedades E_{dyn} y UCS correspondiente al modelo 1D MEM isotrópico del campo. Nótese el cambio de espesor efectivo de buena perforabilidad y puntos de inicio de construcción de curva (KOP). Pista #1: TVD: True Vertical Depth en metros; #2: Unidades estratigráficas Vaca Muerta - Quintuco; #3: GR: Gamma Ray en gAPI; #4: E_{dyn} : Modulo de Young dinámico en Mpsi; #5: E_{dynAv} : Modulo de Young dinámico promedio por niveles, en Mpsi; #6: UCS: Unconfined Compressive Strength en psi; #7: UCS: Unconfined Compressive Strength promedio por niveles en psi.

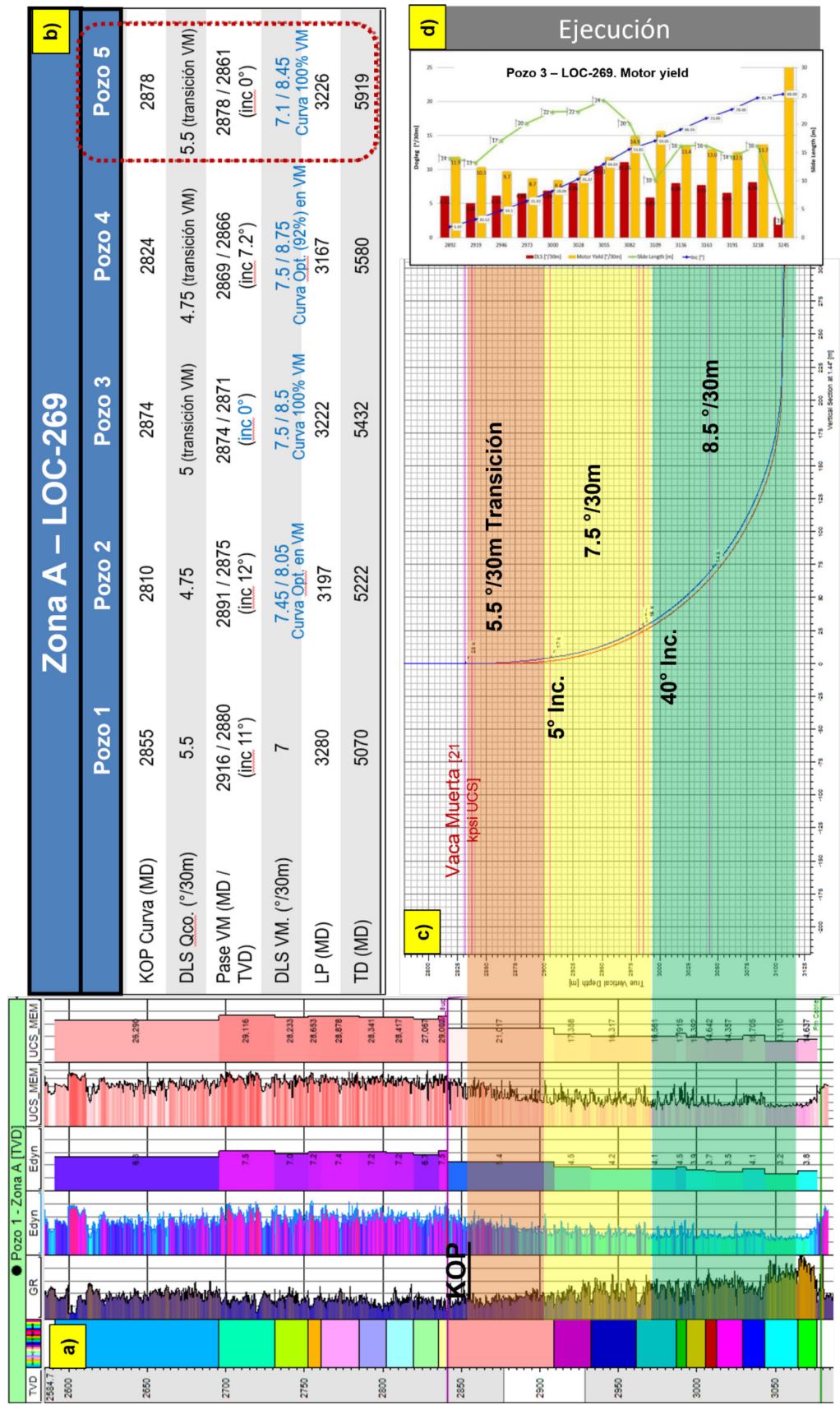


Figura 8. a) Pozo *offset* mostrando Edyn y UCS como curvas continuas y promedios por nivel. b) Tabla resumen de pozos ordenados cronológicamente. Notar cambios en los DLS solicitados. c) Perfil direccional ajustado por intervalos de buena perforabilidad. d) Motor yield de Pozo 3 donde se muestra la caída drástica del porcentaje deslizado (línea verde) obteniendo DLS de acuerdo con lo planificado

Considerando el punto de inicio de construcción de curva (KOP) en zona B se observa que coincide con valores altos en ambas propiedades (la roca tiene un comportamiento muy rígido y resistente), lo cual justifica la complejidad de obtener el perfil direccional planificado. Por otra parte, en zona A y zona D, no se han presentado inconvenientes en construcción de curva, lo que motivó a tomar los valores de estas propiedades como favorables para la perforación. Se definió como punto de inicio de buena perforabilidad aquel que presente un Edyn menor a 6 Mpsi y un UCS menor a 21000 psi.

Siguiendo mismo flujo y ampliando la cantidad de pozos de análisis se definió la zona de transición correspondiente al intervalo que presente: $5 \text{ Mpsi} < \text{Edyn} < 6 \text{ Mpsi}$ y $18000 \text{ psi} < \text{UCS} < 21000 \text{ psi}$.

Adicionalmente a las secciones, se generaron mapas de ambas propiedades con la intención de visualizar la variabilidad vertical y lateral. Como nuevos documentos entregables a perforación se comparte la sección del pozo *offset* y una planilla con los valores promedios por nivel. El pozo *offset* elegido es el que mejor correlaciona siguiendo el tren de depositación, no necesariamente el pozo más cercano.

RESULTADOS

Con la información obtenida de este trabajo, tanto el espesor de VM de buena perforabilidad como los intervalos definidos a partir de propiedades mecánicas, uno puede introducirlas en la fase de planificación de trayectoria y así aprovechar y mejorar los tiempos de construcción. Para

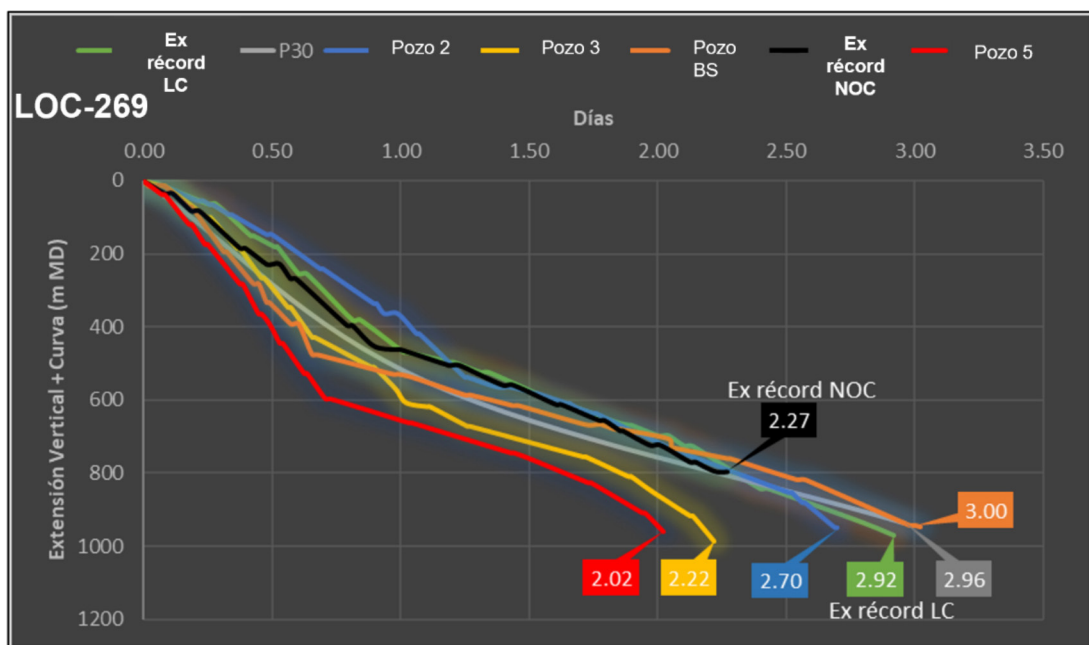


Figura 9. Comparación de tiempos de perforación, de tramos vertical y curva, de pozos en LOC-269. Nótese repetición de resultados logrando tiempos récord en la Regional NOC.

ello, se mapean los valores de UCS sobre la trayectoria planificada y se genera un escalonamiento de DLS gradual, considerando una etapa de transición, una etapa donde las propiedades mejoran y una última etapa donde se puede exigir un mayor DLS (Fig. 8 a-c).

Implementando esta metodología en ambas zonas se identificó una gran oportunidad de mejora en la zona A, donde hay mayor espesor de VM y mejores propiedades mientras que, en la zona B, se evidenció una mayor complejidad pendiente de gestionar y resolver.

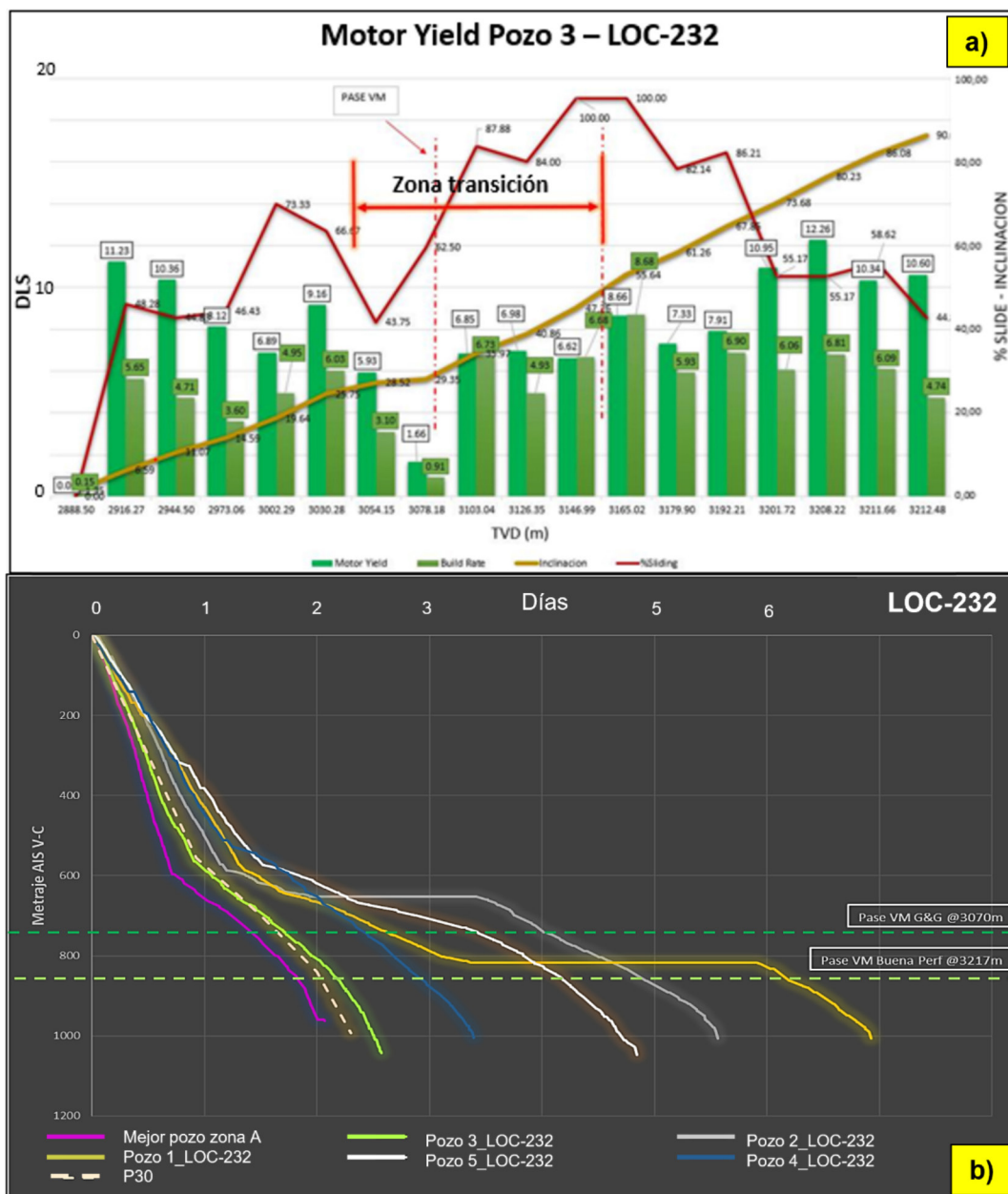


Figura 10. a) Motor yield pozo 3 – LOC-232. Nótese que la zona de transición es más extensa y se cumplen los BUR solicitados con menor porcentaje de *slide*. b) Comparación de tiempos de perforación, de tramos vertical y curva, de pozos en LOC-232. Pozos 1 y 2 con tiempos de maniobra debido a carrera adicional por cambio de BHA.

En la Figura 8 b) se observan los pozos de zona A (LOC-269) en el orden que fueron perforados. El Pozo 1 se ejecutó de una manera conservadora, sin aplicar esta metodología, para verificar la capacidad del conjunto BHA para su construcción. A partir del siguiente pozo de la locación, incorporando los intervalos de buena perforabilidad, se fueron optimizando las curvas en VM de manera consistente a lo largo del desarrollo de la locación. En la Figura 8 d) se observa como lo ejecutado correlaciona muy bien con lo planificado, la mayor tasa de construcción se da en la etapa de mejor perforabilidad (sombreado verde). De esta manera se pudo disminuir drásticamente el porcentaje de *slide* (curva verde) mejorando los tiempos de construcción de curva y mejorando la tasa de penetración.

Comparando los tiempos de perforación de los pozos de la locación se visualiza cómo se ha logrado superar el récord de perforación, para el tramo vertical y curva, y consagrar el nuevo pozo récord de la Regional No Convencional. La identificación de la zona de mejor perforabilidad a partir de las propiedades mecánicas ha permitido mejorar consistentemente la performance de perforación, además de lograr repetitividad de los resultados (Fig. 9).

Para la zona B, donde se ubica la LOC-232, el desafío era conocer cuan compleja era la condición de subsuelo, identificar el sector de transición y si la nueva metodología iba a funcionar. Al comparar el motor yield del Pozo 2 (Fig. 3) y Pozo 3 (Fig. 10 a), este último con nueva metodología, se observa que se presenta una zona de transición más extensa y rígida considerada desde la planificación del pozo por lo que la solicitud de DLS fue menor respecto al plan direccional anterior. Por el contrario, en la zona de mejor perforabilidad se planificaron DLS más elevados logrando de esta manera reducir el porcentaje de *slide* por tiro y mejorar las performances respecto a los primeros pozos de la locación. En la Figura 10 b) se refleja, de derecha a izquierda, la evolución de los tiempos de perforación de tramo vertical y curva de los pozos perforados. Se observan dos pozos (líneas amarilla y gris) donde hubo que realizar carreras adicionales porque estaba comprometido el aterrizaje debido al riesgo de no lograr los DLS requeridos. Si bien el pozo gris ya contaba con los mapas de espesor, esta información no resultó ser suficiente para la optimizar los tiempos de perforación. En el pozo 3 de la misma locación (verde), con la implementación de los intervalos definidos por las propiedades mecánicas, se logró un excelente tiempo para esta zona, muy cercano al P30 (línea punteada) y al pozo récord (violeta) obtenido en la zona A.

CONCLUSIONES

1. Del análisis de las propiedades mecánicas Edyn y UCS se definió el intervalo de buena perforabilidad ajustando la zona de transición en Fm. Vaca Muerta.
2. La zona de transición quedó definida con los siguientes límites: $5 \text{ Mpsi} < \text{Edyn} < 6 \text{ Mpsi}$ y $18000 \text{ psi} < \text{UCS} < 21000 \text{ psi}$.
3. Con la incorporación de los parámetros geomecánicos en flujo de trabajo se ajustaron los

diseños de trayectoria exigiendo menos DLS en zona de transición y gradualmente mayor tasa de construcción por debajo de esta zona. De esta manera se fueron logrando mayores tasas de penetración progresivamente, tanto en la sección vertical y como en la sección curva.

4. Aplicando la nueva “estrategia de perforabilidad” se registraron mejores tiempos de perforación de sección vertical y curva. Se logra bajar el tiempo de perforación un 46% en zona A (récord) y un 16% en zona B respecto al P30 de la regional NOC. Tomando de referencia el mejor pozo de la zona B la reducción de tiempo fue de 53%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a YPF SA y Chevron Argentina por permitir la publicación de este trabajo, como también al equipo de geomecánica de YPF por sus aportes desinteresados.

REFERENCIAS

- Desjardins, P., Fantín, M., González Tomassini, F., Reijenstein, H., Sattler, F., Domínguez, R., Kietzmann, D., Leanza, H.A., Bande, A., Benoit, S., Borgnia, M., Vittore, F., Gil, G., Simo T. and Minisini, D., 2018. Chapter 2: Regional Seismic Stratigraphy. In G. González, D. Vallejo, P. Desjardins, F. González Tomassini, D. Kietzmann, L. Rivarola, and R. F. Domínguez, eds., *Regional Cross Section of the Vaca Muerta Formation. Integration of seismic, well logs, cores and outcrops*, Special Publication Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG) - Asociación Geológica Argentina (AGA), p. 5–22.
- Domínguez, R. F., Paulin, S., Continanzia, M. J., Askenazi, A. D. y Seoane, F. N., 2014. Estratigrafía del intervalo Vaca Muerta – Quintuco en el sector central de la Cuenca Neuquina. En: Galeazzi, S., G. González, M. Santiago, D. García, L. Maschio, R. González y J. Ramírez Martínez (Eds.), *IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Simposio de Recursos No Convencionales*, 232-250, Mendoza.
- Domínguez, R. F., Catuneanu, O., Reijenstein, H., Notta, R. and Posamentier, H., 2019. Sequence stratigraphy and the three-dimensional distribution of organic-rich units in the Vaca Muerta Formation, Neuquén Basin. In Daniel Minisini, Manuel Fantin, Iván Lanusse and Héctor Leanza, eds., *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina: AAPG Memoir*.
- Mitchum, R. M. y M. A. Uliana, 1982. Estratigrafía sísmica de las formaciones Loma Montosa, Quintuco y Vaca Muerta, Jurásico Superior y Cretácico Inferior de la Cuenca Neuquina, República Argentina, I Congreso Nacional de Hidrocarburos, Petróleo y Gas, Actas 439-484, Buenos Aires.
- Reijenstein, H., Vargas, J., Licitra, D., Cuervo, S. and Crousse, L., 2018. Vaca Muerta facies modeling in Loma Campana-Part 2: 3D seismic impedance for reservoir prediction, XX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza, Argentina.

- Sagasti, G., Ortiz, A., Hryb, D., Foster, M. y Lazzari, V., 2014. Understanding Geological Heterogeneity to Customize Field Development: An Example from the Vaca Muerta Unconventional Play, Argentina. Unconventional Resources Technology Conference. DOI 10.15530/urtec-2014-1923357.
- Varela, R.A y Hasbani, J., 2017. A Rock mechanics laboratory characterization of Vaca Muerta formation. ARMA 17-167.
- Vittore F., Licitra, D., Quiroga, J., Rosemblat, A. and Lovrinkevich, E., 2014. Caracterización Estructural, Estratigráfica y Sedimentológica de la Fm. Vaca Muerta en el Yacimiento Loma Campana, Cuenca Neuquina, Argentina, IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, p. 653-672, Mendoza, Argentina.

