



En las áreas Loma Campana y El Orejano atravesar formaciones intercaladas de dureza variable genera un problema para la integridad de las herramientas. Se utiliza el cálculo de MSE para reducir tiempos y costos de la operación.

Este trabajo fue seleccionado por el Comité Organizador del 3° Congreso Latinoamericano y del Caribe de Perforación, Terminación, Reparación y Servicio de Pozos.

Los campos Loma Campana y El Orejano forman parte del proyecto para el desarrollo de pozos No Convencionales. El inicio de explotación se remonta a 2011 y 2015, respectivamente. El campo Loma Campana es el primer desarrollo a gran escala de *shale* en la Argentina y cubre una superficie de 395 km². Se encuentra ubicado a 90 km del noroeste de la ciudad de Neuquén y a 5 km de la ciudad de Añelo. Por su parte, El Orejano, con una superficie de 45 km², está ubicado a 60 km de la ciudad de Añelo, como puede observarse en las figuras 1 y 2.

La perforación, en ambos yacimientos, presenta desafíos operativos de diversa complejidad. Las formaciones atravesadas son Grupo Neuquén, Rayoso, Centenario, Mulichinco, Quintuco y Vaca Muerta, como se muestra en la figura 3. Algunos de los retos más importantes son la sobrepresurización de fisuras naturales, como presentan Quintuco/ Vaca Muerta, y la variabilidad en la compresibilidad de la roca, como presentan Centenario y Mulichinco.

La geometría utilizada en los pozos comprende una fase guía perforada con trepano 12 1/4" y entubada en 9

5/8", intermedia perforada con 8 3/4" y entubada en 7" y aislación perforada en 6 1/8" y entubada en 5". En la figura 4 se puede observar el esquema de un pozo típico.

En adelante nos centraremos en las fallas y el seguimiento del MSE para las fases intermedia y la aislación por tener mayor impacto en el tiempo y costo del pozo. Durante 2015 se perforaron 59 pozos horizontales en los campos El Orejano y Loma Campana, en los cuales se presentaron un total de 29 fallas.

Las fases intermedias se perforan con herramienta convencional o con motor de fondo en caso de requerir trabajo direccional. Para las aislaciones se utiliza exclusivamente conjunto direccional con motor y, en ambos casos, se utilizan trepanos de diamante policristalino (PDC por sus siglas en inglés). Las fallas prematuras de estas herramientas generan una caída en la tasa de penetración (ROP por sus siglas en inglés); esto implica, en algunos casos, la necesidad de tomar la decisión de hacer el viaje a superficie para verificar la condición del conjunto trepano-motor de fondo y eventualmente reemplazar las herramientas dañadas.

“Detección temprana de fallas de herramientas mediante el seguimiento en tiempo real de la energía mecánica específica en pozos no convencionales”

Por **Jonatan Medina** y **Cristian Romero Mc Intosh** (YPF S.A.)

Este trabajo se enfoca en el impacto de la variación de dureza de la roca sobre la integridad de las herramientas de perforación y la utilidad el monitoreo en tiempo real del MSE para la prevención de fallas.

Desarrollo

En la industria del petróleo y, en particular en las operaciones de perforación en el nivel mundial, está bien difundido el concepto de energía mecánica específica.

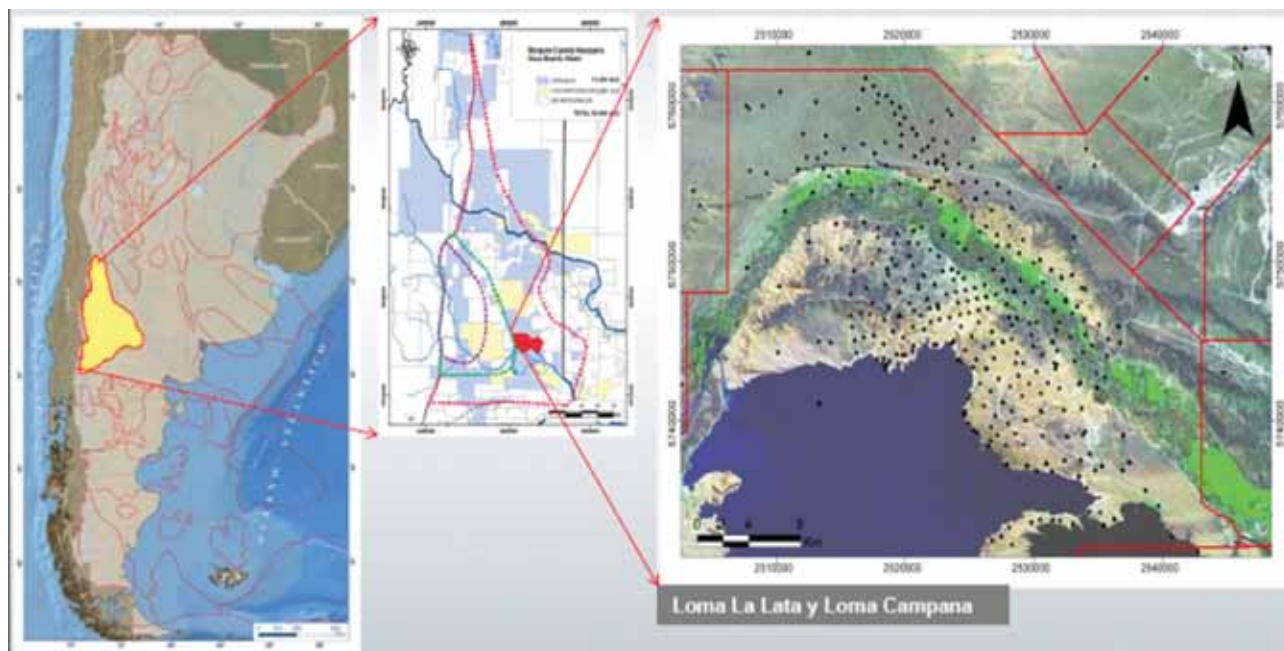


Figura 1. Mapa de yacimiento Loma Campana, cuenca Neuquina, Argentina.

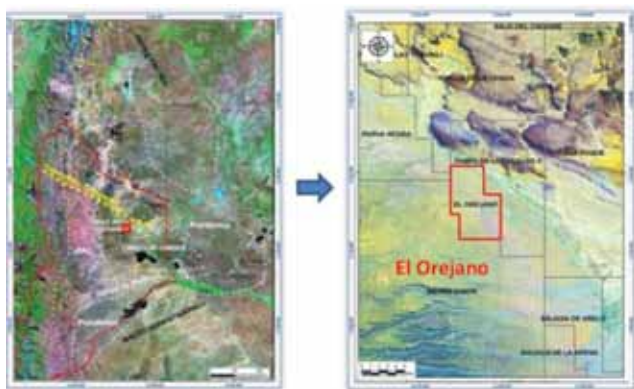


Figura 2. Mapa de yacimiento El Orejano, cuenca Neuquina, Argentina.

Conceptualmente representa la energía requerida para remover un volumen unitario de roca y puede ser utilizada como indicador de eficiencia de perforación e identificación de fallas. La expresión matemática que la define se muestra en las ecuaciones (1) y (2).

$$\text{MSE (psi)} = \frac{\text{Energía entrada}}{\text{Volumen removido}} \propto \frac{\text{Energía}}{\text{ROP}} \quad (1)$$

$$= \frac{2812 \times \text{WOB}}{d^2} + \frac{146,3 \times \text{RPM} \times \text{Torque}}{d_2 \times \text{ROP}} \quad (2)$$

La expresión (2) debe ser ligeramente modificada cuando se perfora con motor de fondo, de manera de utilizar las

rpm de fondo y el torque generado por el motor (curvas de diferencial-torque).

El objetivo perseguido con la utilización de esta herramienta analítica es perforar en forma eficiente, y así entregar al sistema de perforación la energía mínima necesaria para generar la ruptura de la roca. Más adelante se detallará cuan bajos deberán ser estos valores en función de su dureza. Esto implica que las curvas de MSE tengan una tendencia de crecimiento normal, que denominaremos líneas base y que son características para cada herramienta, fase y área. El valor numérico y absoluto de esta magnitud no es representativo, sino la tendencia de la medida que refleja las variaciones en la evolución de la perforación.

En la figura 5 se puede observar el seguimiento en tiempo real del MSE (curva violeta) para la perforación de la fase aislación con motor de fondo. Puede identificarse la variación de la tendencia en función de los parámetros de perforación aplicados (peso aplicado en el trepado WOB y revoluciones en superficie RPM) y el modo de perforación con el motor (rotación o *slide*).

Es importante comprender que no siempre la energía entregada al trépano y a la sarta de perforación (mecánica proveniente del top drive e hidráulica de las bombas de lodo) se traduce en generar avance del trépano (ROP). El MSE permite definir los parámetros de perforación más adecuados de manera de no disipar energía en forma indeseada. Por ejemplo, un wob excesivo o superior al necesario podría generar pandeo (*buckling*) de la sarta y, en consecuencia, torque excesivo en respuesta a la fricción de la

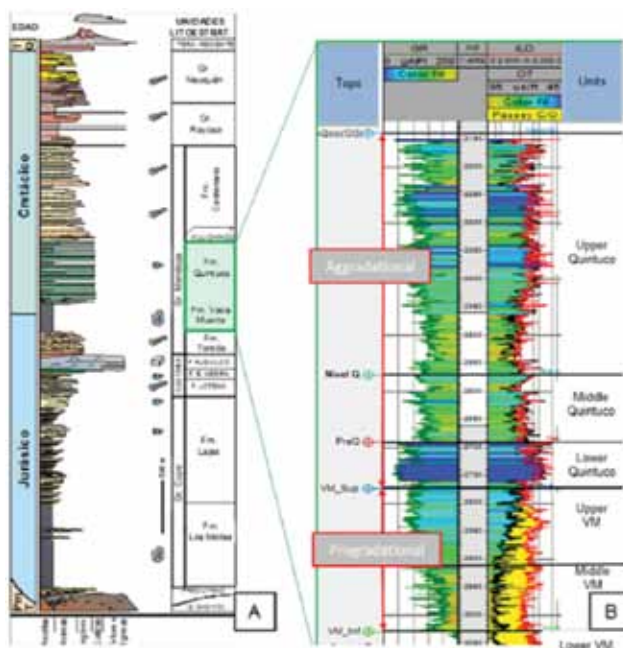


Figura 3. Perfil litológico en la cuenca Neuquina.

herramienta con las paredes del pozo; por otro lado, rpm muy bajas podrían provocar vibraciones stick & slip en el trepado. Ambos casos generan escenarios más propicios a la falla por fatiga u otros mecanismos.

En la figura 6 puede observarse el MSE y los parámetros aplicados (wob y rpm) a un motor 4 3/4" en una fase 6 1/8". El ejemplo corresponde a un posible evento de *buckling* donde un incremento del peso aplicado no se refleja en un incremento de la rop, sino en un descenso, advirtiéndose a su vez un incremento gradual en la curva de MSE.

Como se mencionó, el seguimiento del MSE también permite identificar fallas en las herramientas de perforación. En la figura 7 se muestra un ejemplo de la tasa de penetración (curva verde) y el MSE (curva violeta) a lo largo de la construcción de una fase intermedia, desde los 350 m hasta 2100 m.

Hasta los 1800 m la tendencia del MSE es normal ajustándose a la línea base esperada para el área (25.000 psi) con un buen ritmo de perforación. Alrededor de los 1850m se evidenció un descenso en la tasa de penetración, de

igual modo se continuó perforando hasta 2020 m, donde se decidió cambiar la herramienta debido al pobre avance obtenido sobre el final del tramo. En superficie se corroboró que la causa fue la falla prematura del trépano, que se corresponde con el aumento registrado en el MSE en 1850 m. Luego del cambio de trepado, puede observarse cómo la curva de MSE se estabiliza nuevamente en valores inferiores y estables.

Definición de tendencias normales en función de UCS

Como se definió, para lograr una perforación de modo eficiente es necesario que el valor de MSE sea lo más bajo posible, de esta manera se logra maximizar el avance con el menor requerimiento de energía. También se mencionó que para el análisis del MSE no debe ser tenido en cuenta su valor numérico absoluto, sino que se debe analizar su tendencia en función de la profundidad y el tiempo.

Para perforar una roca hay que vencer su resistencia a la compresión, por lo tanto, esa es la energía mínima necesaria para provocar la rotura del material. En condiciones ideales de eficiencia perfecta, el valor de MSE debería ser igual a la resistencia a la compresión. Obtener ese valor es complejo, ya que se deben conseguir muestras de la formación para realizar ensayos de resistencia a la compresión, que deberían realizarse bajo la misma presión de confinamiento a la que se encuentran en subsuelo. Por lo general el ensayo se realiza sin presión, lo que brinda el valor de Resistencia a la Compresión Sin Confinamiento (UCS por sus siglas en inglés).

Una aproximación es utilizar perfiles eléctricos y realizar estimaciones del valor de UCS mediante regresiones obtenidas de formaciones similares. Con este criterio se compararon los perfiles sísmicos de los tramos intermedios de los campos Loma Campana y El Orejano, y se estimó el log de resistencia mediante la fórmula UCS Combinada, la cual es una regresión promedio de las fórmulas desarrolladas.

Como se observa en la figura 8, el perfil de UCS de Loma Campana presenta una tendencia de aumento progresivo con la profundidad, con un pequeño aumento de dureza en el tramo de 670 a 750 m; sin embargo, las fallas se agruparon sobre el final de la fase, en el pase a la formación Quintuco, debido al cambio de resistencia propio de la transición de un ambiente de areniscas a una formación de calizas.

En cambio, el perfil de El Orejano, si bien presenta el mismo aumento de dureza con la profundidad, se puede apreciar que dicho valor es mayor para la misma profundidad que en Loma Campana y a partir de los 1550 m, correspondiente a la base de la fm. Centenario, la magnitud de resistencia de la formación aumenta 2,5 veces, alcanzando valores cercanos a 25.000 psi. En este tramo de intercalaciones se agrupan las fallas de trépanos que sucedieron en este campo. Luego de este tramo, el UCS disminuye y vuelve a presentar otro aumento a los 1700 m, correspondiente a la fm. Mulichinco. Por último retoma la tendencia gradual hasta el pase de la fm. Quintuco.

Para establecer cuál representaría un valor de MSE aceptablemente bajo, se realizó la calibración con el perfil de UCS de los tramos analizados y se obtuvo la línea base esperada para cada caso. Se calculó la energía mecánica específica con los parámetros medidos en superficie de los pozos más

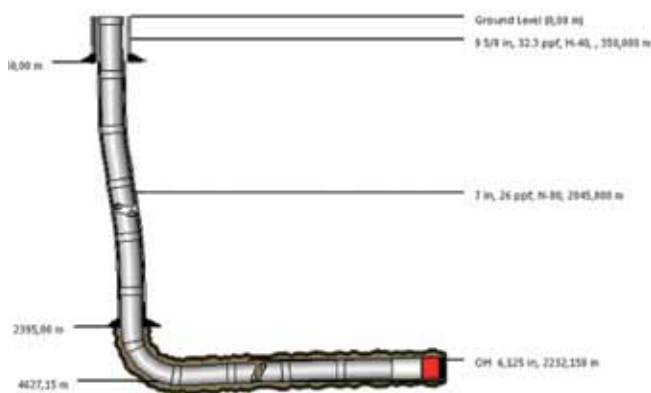


Figura 4. Geometría utilizada para pozos horizontales de Loma Campana y El Orejano.

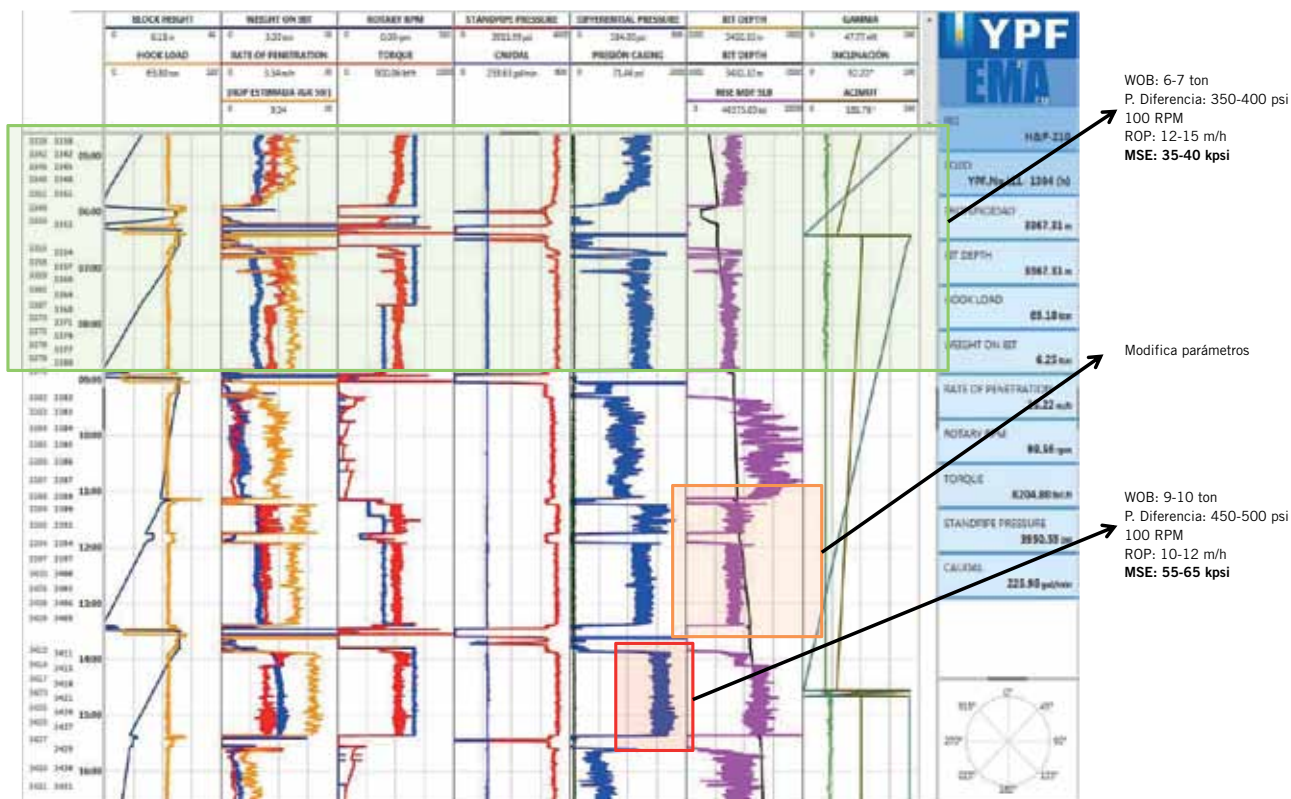


Figura 5. Parámetros de perforación visualizados en herramienta de monitoreo propia de YPF.

rápidos y completados en una sola carrera para plotear los resultados junto con el perfil UCS. En la figura 9 se aprecia la calibración del tramo intermedio de un pozo del campo El Orejano, en donde ambas variables presentan la misma tendencia, pero desfasadas en valor absoluto. Para establecer el valor de referencia, se corrige el valor de la ecuación de MSE por 0,35, de manera de tener el mismo orden de magnitud que la referencia del índice de compresión.

Dicho valor no significa que el 35% de la energía entregada en superficie se transforma en energía de perforación, sino que es un valor de corrección para compensar el desfase del valor absoluto y tener el mismo orden de magnitud que permita una comparación directa.

En los pozos completados en una sola carrera se evidenció que el MSE ajustado aumentaba a partir de los 1550 m, con un consiguiente descenso de ROP debido al aumento de la dureza de la roca, pero se mantenía en valores menores a 40.000 psi. Luego de los 1730 m el valor presentaba una disminución y se obtenían avances de alrededor de 20 m/h. Con esta observación, se estudiaron los parámetros aplicados durante la transición y se detectó que, en dichos pozos, al disminuir las RPM antes de la primera transición por debajo de 220 rpm y menos de 200 rpm en la segunda, con un WOB no mayor a 10 tn, se lograba completar la fase en una carrera y sin desgaste de las herramientas, como se muestra en la figura 10.

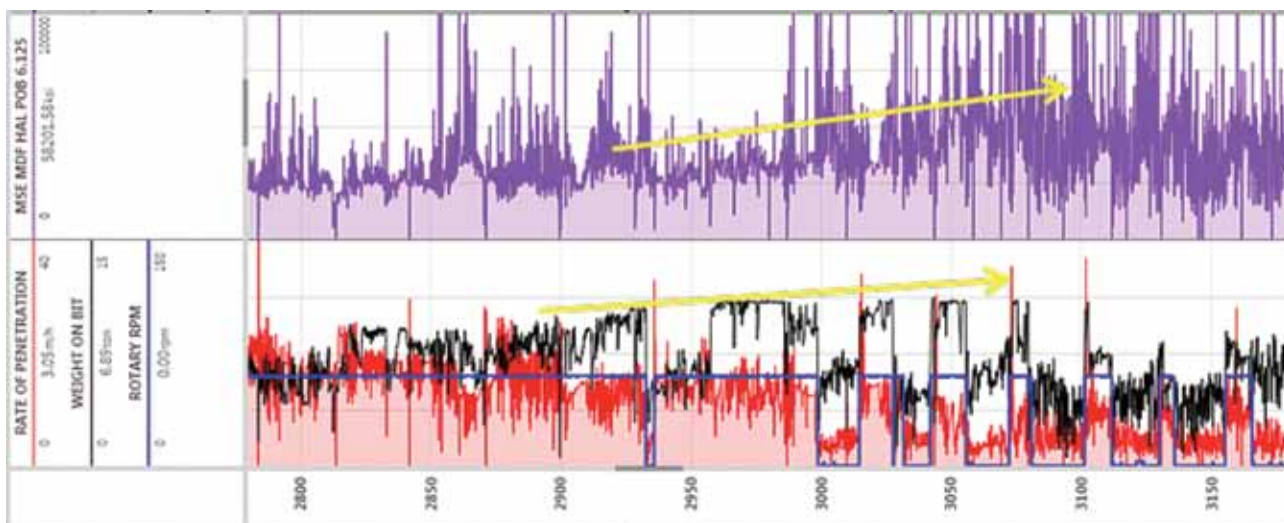


Figura 6. Tendencias de los parámetros de perforación y MSE en pozo horizontal de Loma Campana. Posible evento de buckling.

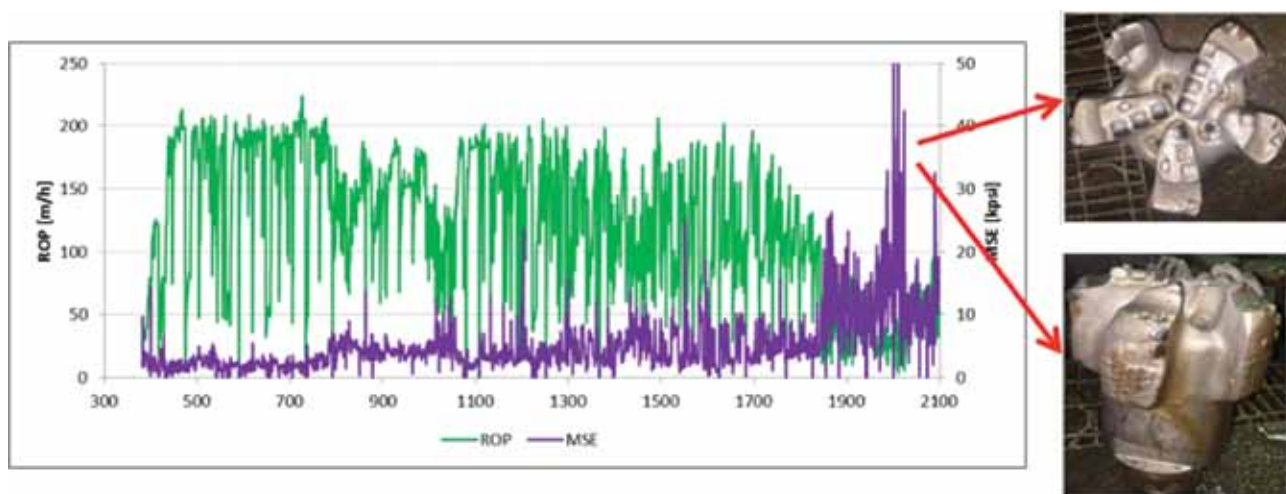


Figura 7. Comportamiento del MSE ante una falla de trépano en una intermedia de Loma Campana.

De esta manera se logró determinar que, para el tramo en cuestión, a partir de los 1550 m es recomendable readequar los parámetros de perforación con el fin de evitar el daño del trépano en la intercalación, se determinó que el valor mínimo de ROP aceptable para el caso es de 20 m/h y el valor de MSE no debe ser mayor a 40 000 psi. Al alcanzar dichos límites y con una tendencia de MSE en aumento se tiene un diagnóstico de falla de herramienta y es necesario realizar el viaje para cambio de BHA.

Siguiendo la misma metodología para el tramo aislación, se estimaron los valores de UCS mediante el uso de la regresión Golubev/Robinovich que se desarrolló para Calizas y Dolomias, graficados en la figura 11. En ambos casos no se observa una tendencia de aumento de la re-

sistencia con el aumento de profundidad y esto se debe a que la formación Quintuco está compuesta de calizas y calizas arcillosas, por lo que en los tramos con mayor contenido arcilloso la resistencia a la compresión disminuye. Para el caso de Loma Campana el inicio del tramo presenta una resistencia elevada y luego disminuye a partir de los 2500 m hasta los 2700 m debido a una litología con mayor contenido de arcilla. En el tramo inferior de Quintuco la resistencia aumenta hasta los 2850 m donde comienza a disminuir nuevamente debido a las características de la fm. Vaca Muerta, la cual está compuesta mayormente por lutitas y su tendencia es de disminuir con la profundidad. El caso de El Orejano es similar con un tramo superior de resistencia elevada, que comienza a disminuir a

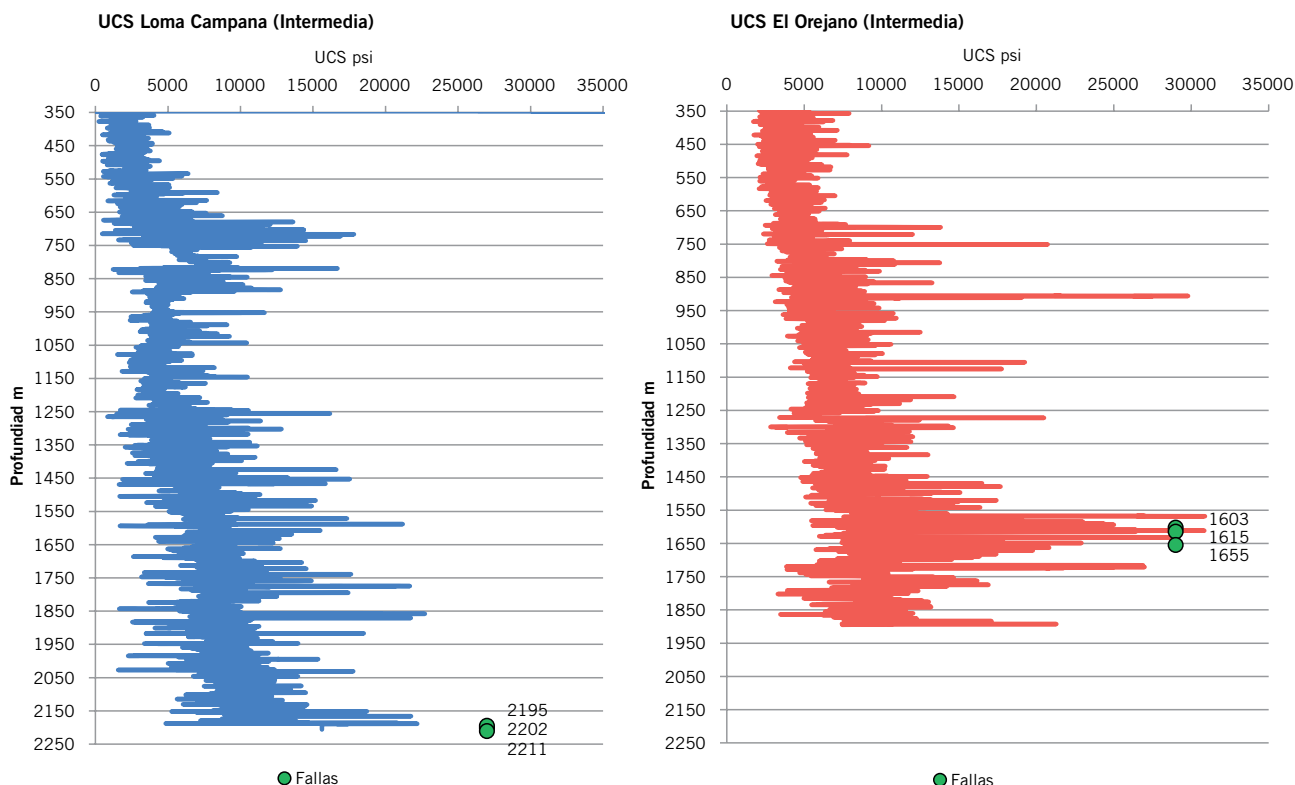


Figura 8. Perfil UCS para Loma Campana (azul) y El Orejano (rojo).

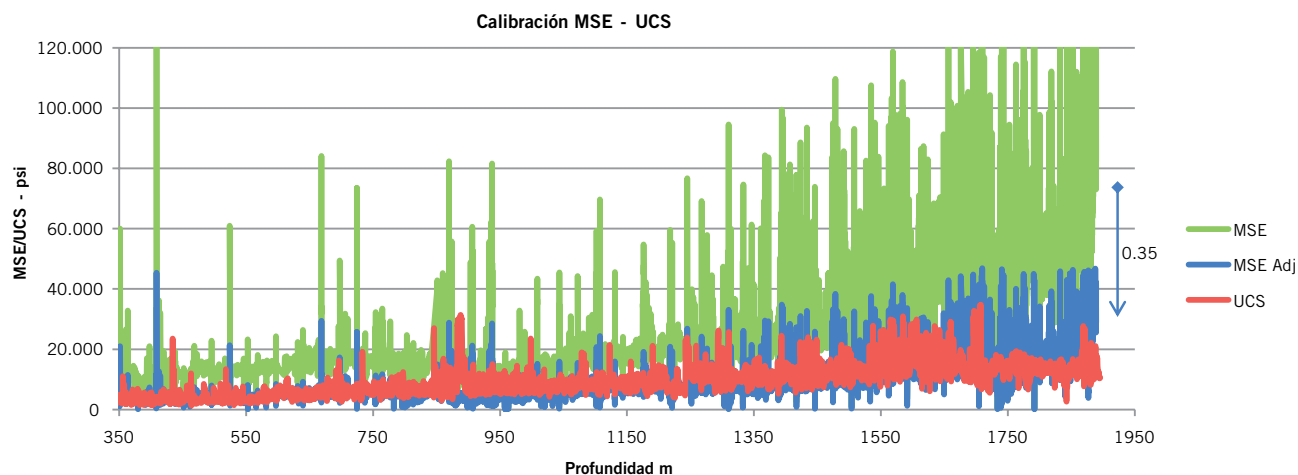


Figura 9. Calibración de curvas MSE y UCS para fase intermedia El Orejano.

partir de los 2200 m, pero no se aprecia el tramo inferior de Quintuco presente en Loma Campana. La formación Vaca Muerta presenta el mismo comportamiento decreciente de resistencia con la profundidad y se evidencia que su valor absoluto es menor que en el otro campo.

Si bien es una formación con presencia de intercalaciones de distinta dureza, las fallas ocurridas en este tramo no se agrupan en una sección del pozo en particular, sino que están distribuidas en toda la fase. En este tramo no es necesaria la readecuación de parámetros, pero los desvíos de MSE se tienen en cuenta para detectar problemas de herramientas y acelerar la toma de decisiones para el cambio de BHA.

Para determinar el valor de MSE de referencia, se consideró el pozo más rápido perforado con BHA conven-

cional y se comparó con el valor de UCS como se aprecia en la figura 12. Para tener el mismo orden de magnitud, el coeficiente de ajuste, en este caso, también resultó ser 0,35. Como se mencionó, la tendencia de compresión de la formación no es lineal con la profundidad, por lo que la línea base de MSE debe seguir el mismo comportamiento, que debe comenzar con valores de 35.000–40.000 psi al comienzo de la fase, a partir de los 2500 m se debe registrar una disminución de la energía entregada en el orden de los 25.000 psi y comenzar a aumentar a partir de los 2700 m hasta valores máximos de 45.000–50.000 psi en el tramo inferior de Quintuco. En Vaca Muerta, el valor de referencia no debería ser mayor de 30.000–35.000 psi y mantenerse sin aumentos hasta el pase a la fm. Catriel, considerando un pozo vertical.

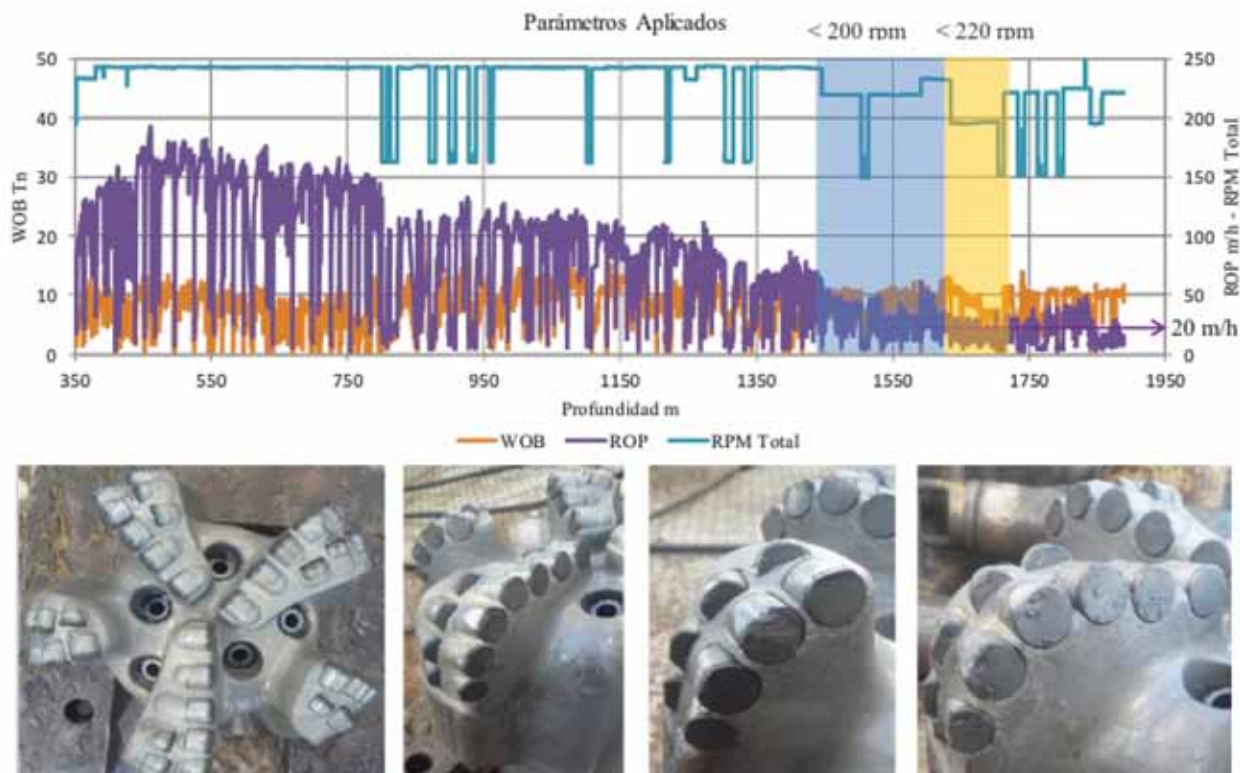


Figura 10. Parámetros aplicados en fase intermedia de El Orejano y condición del trepado PDC al finalizar la fase.

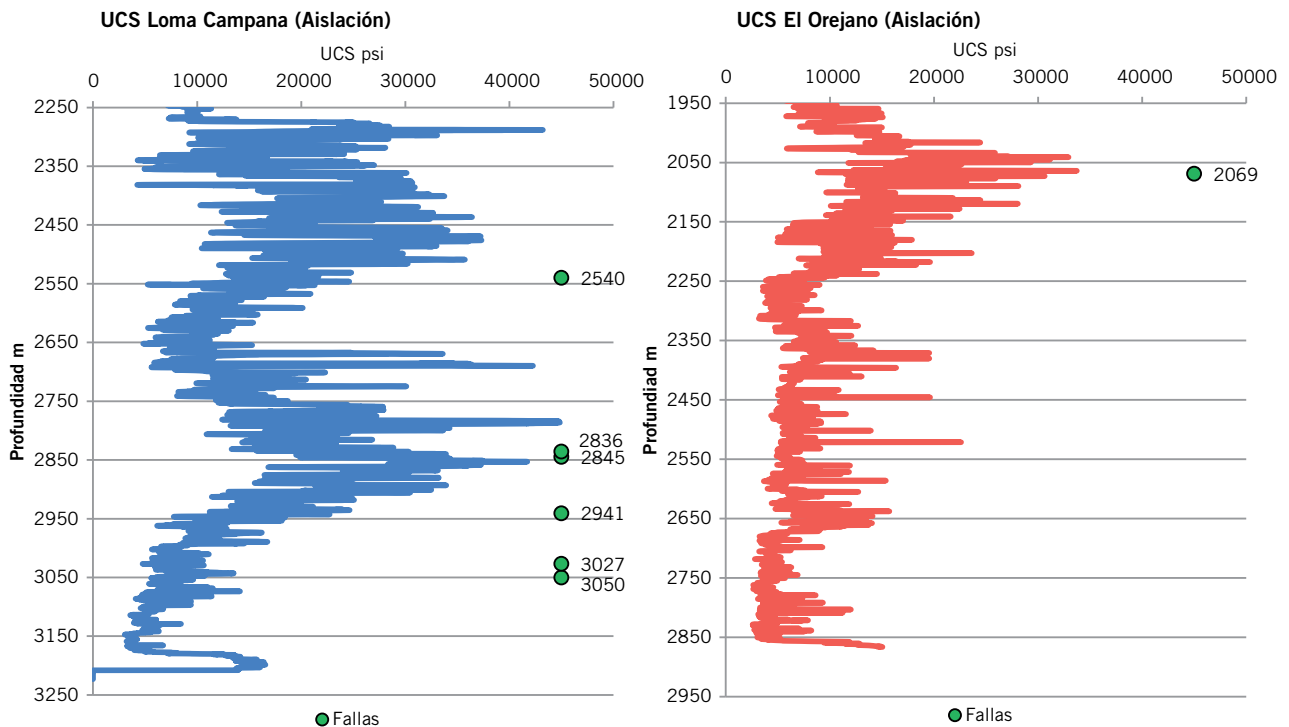


Figura 11. Perfil de UCS para la fase aislación de El Orejano y Loma Campana.

Otra evaluación realizada en este tramo fue relacionar las curvas de ROP, sónico de compresión (DT) y Gamma Ray (GR), como el ejemplo del campo Loma Campana que se muestra en la figura 13. Se corrobora que los cambios en el avance de penetración se corresponden con la respuesta del perfil sónico, pero también tienen una correspondencia con el perfil GR, incluso con mayor grado de correlación. Esto se debe al efecto mencionado de la composición litológica de la fm. Quintuco, ya que, en los tramos más arcillosos, las cuentas de API aumentan provocando una disminución en la resistencia de la roca, resultando en mayores tiempos de tránsito del perfil sónico. Es por ello que, si bien los registros de GR no son un indicador de dureza, en este campo se los puede considerar como una referencia de la resistencia de la roca. Esta respuesta natural de la formación otorga una ventaja significativa en el monitoreo de las operaciones, ya que las herramientas básicas MWD cuentan con medición de GR, no así la posibilidad de registrar un perfil acústico, que requiere una herramienta adicional en el conjunto direccional. En la figura 14 se muestra un ejemplo del comportamiento en un pozo horizontal con registro continuo de GR.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, cuando se presentan disminuciones de avance que no están asociadas

a un cambio en la litología de la roca y se observen valores de MSE superiores a 50.000 psi en Quintuco o mayores a 40.000 en Vaca Muerta con tendencia en aumento, son indicadores de la presencia de una falla en la herramienta y es necesario realizar el viaje para el reemplazo del BHA.

Validación de calibración MSE-UCS mediante medición de parámetros de fondo

Como se mencionó, el MSE es un indicador de la eficiencia de perforación medida en relación a la variable UCS. Otra metodología utilizada para validar este dato es a partir de variables registradas en fondo cercanas al trepapo. Las variables que se han medido en la fase de aislación en Loma Campana y El Orejano son rpm, wob y torque de fondo. Con esta información puede calcularse el MSE de fondo (en lugar de realizar el ajuste del MSE de superficie con UCS) y correlacionarlo con el MSE de superficie. Es importante recordar que el UCS no es un dato disponible durante la perforación, ya que se estima a partir del perfil sónico una vez perforado; sin embargo, el MSE de fondo es un aproximador adecuado debido a que corresponde a mediciones a solo 3 m del trepapo.

En la figura 15 puede observarse las curvas de MSE de

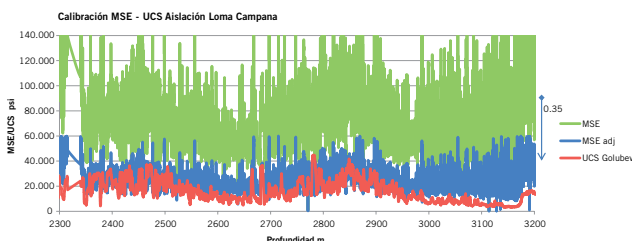


Figura 12. Calibración de MSE y UCS para la fase aislación de LC.

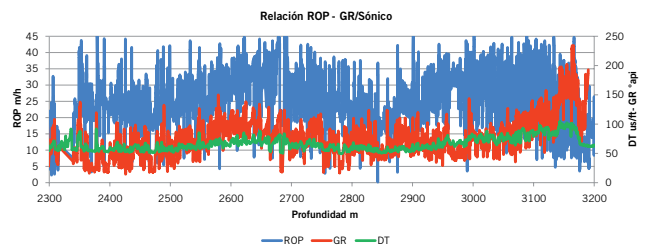


Figura 13. Relación ROP, GR y perfil sónico para fase aislación de LC.

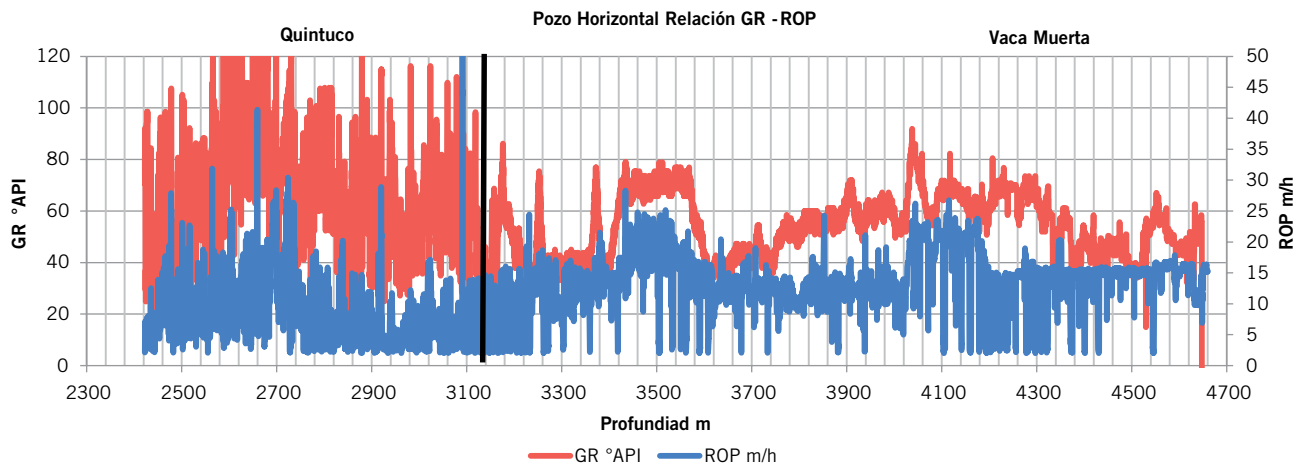


Figura 14. Relación ROP y GR en un pozo horizontal de LC.

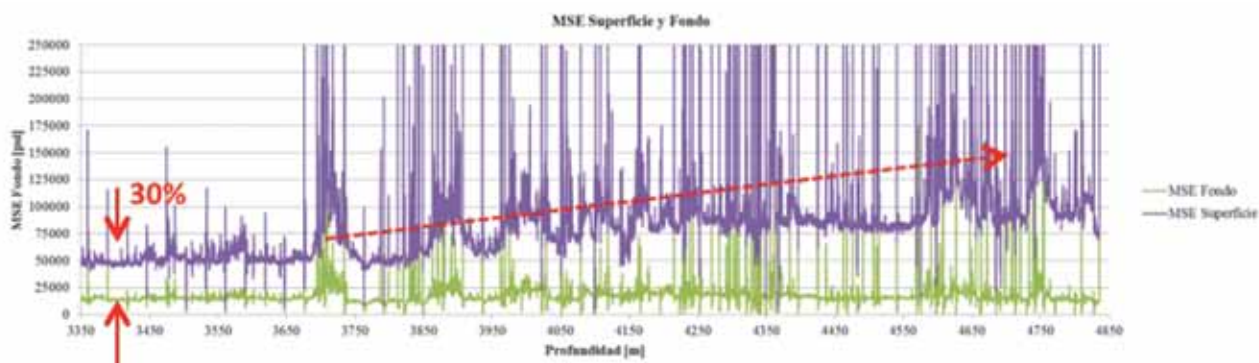


Figura 15. Tendencias de MSE de superficie y fondo para la extensión horizontal de pozo en Loma Campana.

superficie (violeta) y fondo (verde) a lo largo de la fase horizontal en un pozo de LC. Se nota que, en condiciones de perforación estables (avance y limpieza de pozo adecuada), la eficiencia estimada es del 30%. Además, alrededor de los 3700 m, las curvas comienzan a separarse como consecuencia de la tortuosidad de la trayectoria, lo cual generó el incremento del torque de superficie no así el de fondo. Este es un ejemplo de cómo el MSE también puede utilizarse para identificar escenarios de limpieza pobre, tortuosidad y transferencia de peso ineficiente, entre otros.

Implementación y resultados

El monitoreo continuo en tiempo real es de vital im-

portancia para el seguimiento de las tendencias del MSE, así como la buena comunicación de los eventos es crítica para alertar al equipo de trabajo respecto de la necesidad de modificar los parámetros y, en última instancia, acelerar la toma de decisión cuando el viaje a superficie es inminente.

Con este objetivo, YPF implementó en 2014 el primer Centro de Operaciones Remotas (COR) de la Argentina conformado por un equipo interdisciplinario de ingenieros que dan soporte al grupo de operaciones las 24 horas los siete días de la semana. En la figura 16 se muestra el espacio de trabajo del COR.

Asimismo, la compañía desarrolló internamente una herramienta de visualización ajustada a la necesidad de la



Figura 16. Centro de operaciones remotas en las oficinas de Loma Campana.

do entendimiento de la condición del pozo.

Desde 2015 hasta la fecha se ha optimizado el proceso de construcción de pozo reflejados en una reducción importante de tiempos y costos. Respecto de la fase intermedia y la aislación, en la figura 18 se puede observar la reducción de los tiempos (en días) para Loma Campana y El Orejano.

El beneficio importante de la herramienta es la capacidad de procesar la información en tiempo real generando gráficos *crossplots*, histogramas de frecuencia, gráficos de torta con discretización de tiempos en cada sección de pozo.

Parte de la mejora observada en la figura 18 se logró por la implementación de parámetros óptimos de perforación acompañados del seguimiento del MSE ajustado para cada tramo y una rápida detección de fallas que permitió acelerar la toma de decisiones para un cambio de herramienta.

En la parte inferior de la figura 17 se muestran gráficos con el perfil de presión de bombeo vs profundidad vs caudal, MSE vs ROP vs presión diferencial, RPM vs WOB vs ROP y presión diferencial vs WOB vs ROP para el tramo horizontal de un pozo de LC. Todos ellos brindan un rápi-

En 2015 se perforaron 59 pozos horizontales en los campos El Orejano y Loma Campana, en los cuales se presentaron un total de 29 fallas, 14 asociadas a rotura de motor de fondo y 15 a falla prematura de trepano, dando una probabilidad de falla del 49%. A su vez, el tiempo de

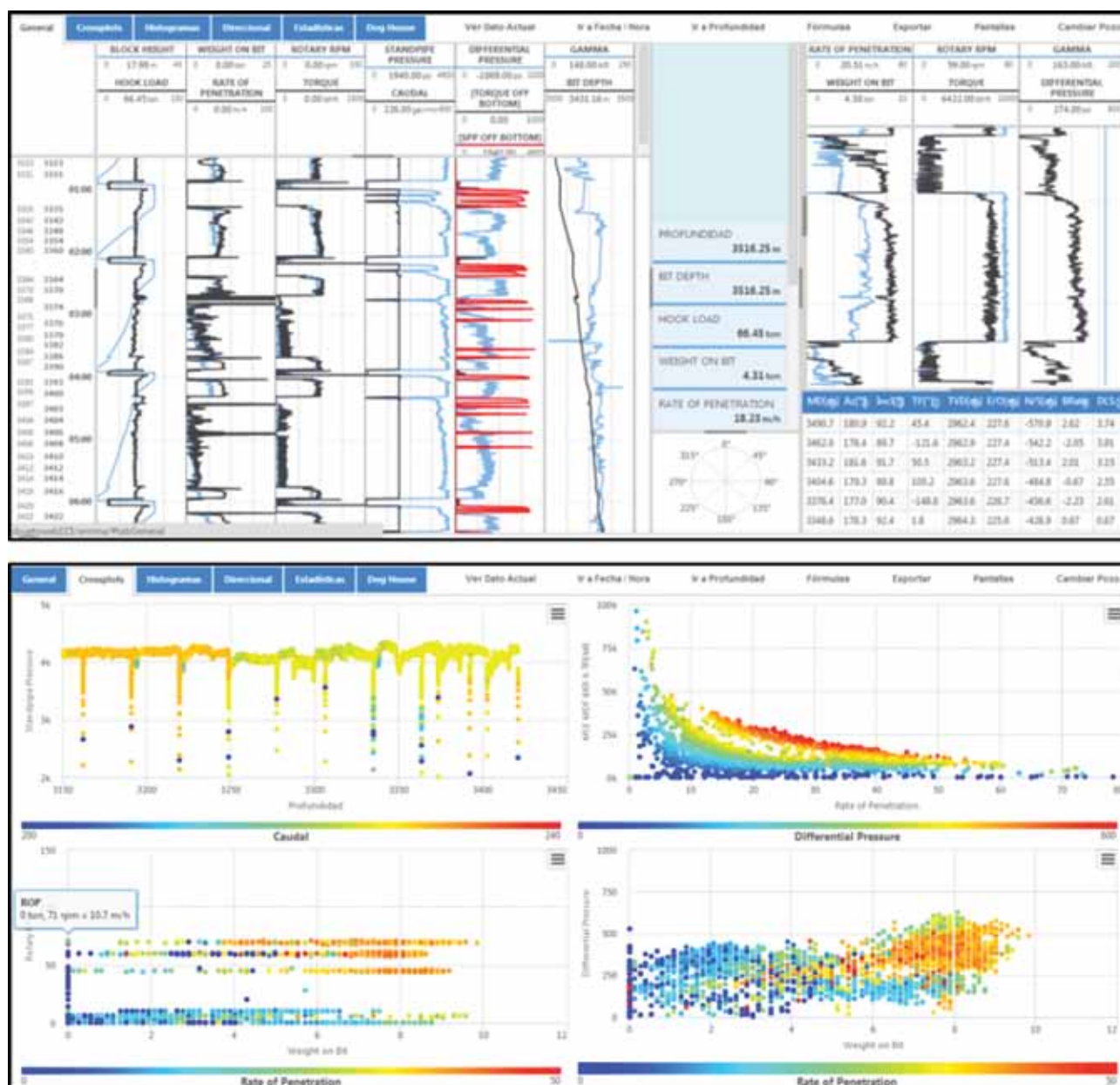


Figura 17. Herramienta de monitoreo EMMA y gráficos *crossplots* actualizados en tiempo real.

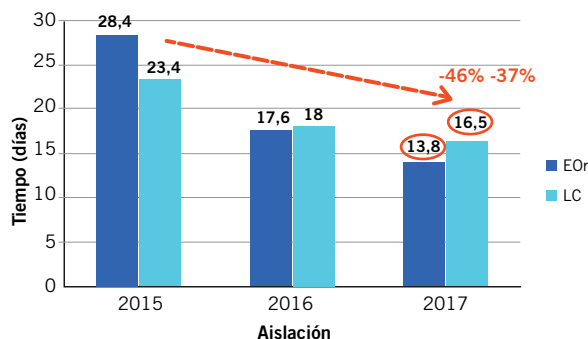
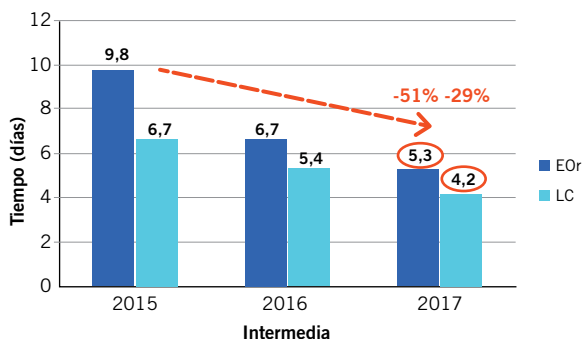


Figura 18. Evolución de los tiempos de construcción de fase intermedia y aislación en LC y EOr.

reacción ante problemas, es decir el tiempo entre la ocurrencia del evento y la decisión del cambio de BHA era en promedio de 32,6 h, ya que se trataba de variar parámetros de perforación suponiendo que el pobre avance era por una condición litológica y también se trataba de evitar la maniobra.

Durante 2016 se perforaron 87 pozos, en los cuales se presentaron 12 eventos con motor de fondo y 6 asociados a trepano, lo cual resultó en una probabilidad de falla del 21%.

En los primeros cuatro meses de 2017 se perforaron 18 pozos, con un total de 6 eventos, 1 de Motor de fondo y 5 de trépanos, así la probabilidad de falla ascendió al 33%. En este período se destaca el tiempo de reacción que, en estos casos, bajó a un promedio de 7 h, es decir un 78% menos que en 2015. Los valores se resumen en la tabla 1.

	2015	2016	Q1 2017
Cantidad pozos	59	87	18
Falla MDF	14	12	1
Falla TREP	15	6	5
Tiempo reacción	32,6		7
Probabilidad Falla	49%	21%	33%

Tabla 1. Tiempo de toma de decisión ante falla y % de fallas desde 2015 hasta abril 2017.



Conclusiones

El seguimiento de la variable MSE brinda una ventaja significativa en el proceso de perforación, ya que otorga un diagnóstico razonable sobre las condiciones del fondo del pozo. Pero, para su correcta interpretación, primero es necesario calibrar y registrar la tendencia normal en cada tramo del pozo en función de su litología. Para ello es importante invertir tiempo en el estudio previo con el fin de identificar los pozos con mejores resultados, obtener los perfiles eléctricos, determinar que regresión de UCS es más representativa en cada caso y ajustar las curvas de MSE, así se obtienen el coeficiente de ajuste y se estudian los parámetros aplicados para mejorar el avance.

Siguiendo esta metodología de trabajo se logra un modelo 2D del proceso de perforación de cada tramo de pozo para cada campo, y con el entendimiento del fenómeno se pueden aplicar decisiones para su optimización. Intentar optimizar sin el conocimiento previo rara vez conduce a buenos resultados. ■

Bibliografía

- The concept of specific energy in rock drilling*, R. Teale. Worton Hall, Isleworth, Middlessex, (Great Britain) Mining Research Establishment, National Coal Board, 1964.
- Drilling performance is a function of power at the bit and drilling efficiency*, Pessier et al., 2012, SPE/IADC 151389.
- Maximizing drill rates with real time surveillance of mechanical specific energy*, Dupriest et al., 2005, SPE/IADC 92194.
- Prediction of rock strength using drilling data and sonic logs*, Amani & Shahbazi. 2013, International Journal of Computer Applications.
- In situ estimation of roof rock strength using sonic logging*, Oyler, Mark & Molinda. NIOSH-Pittsburgh Research Laboratory.

Agradecimientos

Agradecemos a Sandro Alves (Gerente Centro de Operaciones Remotas de YPF); a los integrantes del Centro de Monitoreo Remoto Regional No Convencional; a Alberto Cinquegrani, Gerente P&WO Regional No Convencional; y a Raul Krasuk, Gerente de Operaciones P&WO de Argentina.