

# EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LA LIMPIEZA DE HOYO EN POZOS DE ALTA INCLINACIÓN - ALTO DESPLAZAMIENTO EN LA CUENCA ORIENTE

David Esteban Almeida Campana<sup>1\*</sup>; Raúl Armando Valencia Tapia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gerencia de Perforación. PETROAMAZONAS EP. 6 de Diciembre N34-290. Quito, Ecuador.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería en Geología y Petróleos. Escuela Politécnica Nacional. Ladrón de Guevara E11-253. Quito, Ecuador.

\*E-mail: david\_almeida@petroamazonas.gob.ec

## RESUMEN

La perforación de pozos de alta inclinación y alto desplazamiento, requiere mucha atención a la limpieza del hoyo, teniendo en cuenta el comportamiento físico de los cortes que tienden a formar camas en la cara baja del pozo. Un trabajo previo realizado, estudiando el fenómeno de la acumulación de camas de cortes en pozos del Este de la Cuenca Oriente, determinó una metodología para diagnosticar en la fase de diseño, los posibles problemas de limpieza.

En este trabajo, se ha desarrollado una metodología para diagnosticar el estado de la limpieza del hoyo en tiempo real, mediante el uso de tres herramientas, dos de ellas que incorporan la medición de presión anular, y la tercera, que implica el análisis de los retornos en superficie. Los resultados del uso de esta metodología en un pozo de la Cuenca Oriente, son expuestos demostrando su efectividad.

**Palabras clave:** Perforación, Limpieza, Camas de Cortes, Presión Anular.

## QUALITATIVE EVALUATION OF WELLBORE CLEANNESS ON HIGH ANGLE – HIGH DISPLACEMENT WELLS AT THE ORIENTE BASIN

## ABSTRACT

When drilling high angle – high displacement wells, special attention should be put on wellbore cleanliness, taking into account that cutting beds tend to be formed on the low side of the well. A previous work, which studied this phenomena on wells drilled east of the Oriente Basin, allowed to stablish a methodology to diagnose, on the design phase, possible cleaning problems.

In this article, a methodology to diagnose cleaning problems on a real time basis was developed, and includes the use of three tools; two of them use annular pressure readings, and the last one implies the study of cuttings at Surface. The result of the applied methodology on a well drilled east of the Oriente Basin, is shown in this paper, demonstrating its effectiveness.

**Keywords:** Drilling, Cleanness, Cutting Beds, Annular Pressure.

**Cita:** Almeida, D.E. y Valencia, R.A. (2017). Evaluación cualitativa de la limpieza de hoyo en pozos de alta inclinación – alto de desplazamiento en la Cuenca Oriente. *Revista Fuentes: El reventón energético*, 15 (2), 49-56.



## INTRODUCCIÓN

La Cuenca Oriente se ubica al este del territorio ecuatoriano, en zonas selváticas de alta biodiversidad. El desarrollo de la producción petrolera en esta Cuenca, ha llevado a la perforación de pozos muy cerca, o dentro de reservas naturales. Esto ha obligado a desarrollar técnicas de perforación de pozos que permitan alcanzar objetivos distantes desde una misma plataforma, minimizando el impacto al ambiente por la construcción de facilidades, plataformas y caminos.

Sin embargo, este tipo de perforación implica tratar con fenómenos físicos que no se presentan en pozos de mediana complejidad, con ángulos de inclinación menores de 50° y desplazamiento horizontal corto. En pozos de más de 50° de inclinación, la limpieza del hoyo es un problema mayor, ya que los ripios se evacúan del hoyo con mayor dificultad, y este fenómeno puede llevar a pérdida de herramientas en fondo, pérdida del pozo y altas pérdidas económicas.

Desde finales de la década de 1980, el estudio de este fenómeno ha llamado la atención de industria petrolera a nivel mundial. Estudios experimentales determinaron que durante la perforación a altas inclinaciones, en la cara baja del pozo tienden a formarse “camas de cortes”, y que ante el incremento del caudal del fluido de perforación tienden a formarse dunas por el salto de los cortes hacia atrás en dirección del flujo (Brown, Bern y Weaver, 1989).

Además, en pozos de estas características, cuando la sarta de perforación es movida axialmente, los elementos más gruesos del ensamblaje de fondo (*BHA*) tienden a arrastrar estos cortes causando taponos que llevan a fuerzas de tensión elevadas (Rasi, 1994). La pérdida de presión por fricción en el anular, es el factor principal que afecta la reducción del tamaño de la cama de cortes, y la limpieza del hoyo a altas inclinaciones; y, por tanto, debe prestarse mayor atención a la reología del fluido en cuanto a su efecto en la consolidación de la cama de cortes, antes que en cuanto a la capacidad de suspensión de los mismos, como en el caso de hoyos verticales (Saasen, 1994).

Aplicaciones reales durante la perforación de pozos de alto ángulo, encontraron que la optimización de prácticas de perforación, y la aplicación de un programa de bombeo de píldoras correctamente diseñado, permitían incrementar la eficiencia de perforación y

mejorar sustancialmente la limpieza del hoyo (Power, Hight, Weisinger y Rimer, 2000).

El entendimiento del fenómeno, y la aplicación de herramientas de diagnóstico en tiempo real, pueden ayudar a la toma de decisiones adecuadas para mitigar el problema. En este artículo, se documenta los resultados de aplicar una metodología diseñada para diagnosticar cualitativamente la limpieza del hoyo, durante la perforación del pozo TPTC-034; una vez anticipados problemas de limpieza por métodos de cálculo documentados en un trabajo anterior, y que se detallan aquí como un paso previo.

## METODOLOGÍA

El Pozo TPTC-034, ubicado al Este de la Cuenca Oriente, fue sujeto del estudio que se presenta en este artículo.

El pozo presenta las siguientes características de diseño considerando su profundidad vertical (*TVD*), sección vertical (*Vsec*), inclinación máxima (Inc. Max.) y profundidad medida (*MD*).

**Tabla 1.** Características de diseño Pozo C-034

TVD (pies)	Vsec (pies)	Inc. Max. (grados)	MD > a 50° (pies)
4963	7102	72,54	6644

El punto de desvío (*KOP*) del pozo inició a los 300 pies de profundidad, alcanzando los 50° a los 3101 pies perforados, dentro de la formación Orteguzza. La tangente de 72,54° de inclinación se mantiene por 6644 pies hasta alcanzar el reservorio objetivo, y hasta los 9745 pies de profundidad medida.

El esquema mecánico del pozo incluyó tubería de revestimiento según el cuadro a continuación:

**Tabla 2.** Diseño de tubería de revestimiento

Diámetro Revestimiento (pulg.)	Diámetro Hoyo (pulg.)	MD Asentamiento (pies)
20	26	259
13 3/8	16	5263
9 5/8	12 1/4	8556
7	8 1/2	9745

## METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO PREVENTIVO<sup>1</sup>

### DENSIDAD DE LOS CORTES PRODUCIDOS

La densidad de los cortes producidos al atravesar las diferentes formaciones que se encuentran en la Cuenca Oriente, fue determinada por métodos experimentales a partir de las muestras tomadas durante la perforación de pozos previos.

La Tabla 3 muestra las densidades de los cortes ( $pc$ ) para las diferentes formaciones. Estos datos fueron tomados de la parte Este de la Cuenca, y pueden variar dependiendo de la zona de la Cuenca donde se realice el muestreo.

**Tabla 3.** Densidad de los cortes de las formaciones de la Cuenca Oriente

Formación	$pc$ (lpg)
Arcillolita Chalcana	23,37
Lutita Orteguaza	16,69
Arcillolita Tiyuyacu	18,55
Arcillolita Tena	18,55
Lutita Napo	16,69

### CÁLCULO DE CAUDAL CRÍTICO PARA CADA SECCIÓN

Caudal Crítico ( $Q_{crit}$ ) se define como el caudal requerido para obtener la velocidad anular mínima, que permita el flujo continuo de cortes a la superficie. El fluido de perforación ejercerá una fuerza de empuje sobre el corte sumergido. El efecto que esta fuerza tiene sobre la velocidad de caída del corte, y el caudal crítico ( $Q_{crit}$ ), se pueden determinar a partir de las ecuaciones de Hopkin modificadas por Bizanti y Alkafeef (2003).

Así, se calcularon los caudales críticos máximos para cada una de las secciones considerando cortes de “tamaño promedio” al atravesar las diferentes formaciones geológicas. La Tabla 4 muestra los resultados de los cálculos efectuados (Boas y Almeida, 2017):

1. La Metodología usada para el diagnóstico preventivo, fue expuesta en un artículo previo (Boas y Almeida, 2017). Sin embargo, es de interés para este trabajo exponer brevemente lo tratado en aquel, de forma que el lector pueda hacerse una mejor idea del problema.

**Tabla 4.** Cálculo de caudal crítico para el Pozo C-034

Diámetro Hoyo $dh$ (pulg.)	Diámetro Tubería $dt$ (pulg.)	Punto Cedente $PC$ (lb/100 pies <sup>2</sup> )	Caudal crítico $Q_{crit}$ (gpm)
16	5 1/2	20	2628
12 1/4	5 1/2	20	1220
8 1/2	5 1/2	32	281

A partir de estos cálculos se determinó que la capacidad del equipo de bombeo del taladro de perforación, así como los caudales máximos de trabajo de las herramientas direccionales (1200 gpm), no son suficientes para acarrear de manera continua los cortes a superficie en las secciones de 16” y 12 1/4”.

### ESTABLECIMIENTO DE UNA SOLUCIÓN EN LA ETAPA DE DISEÑO

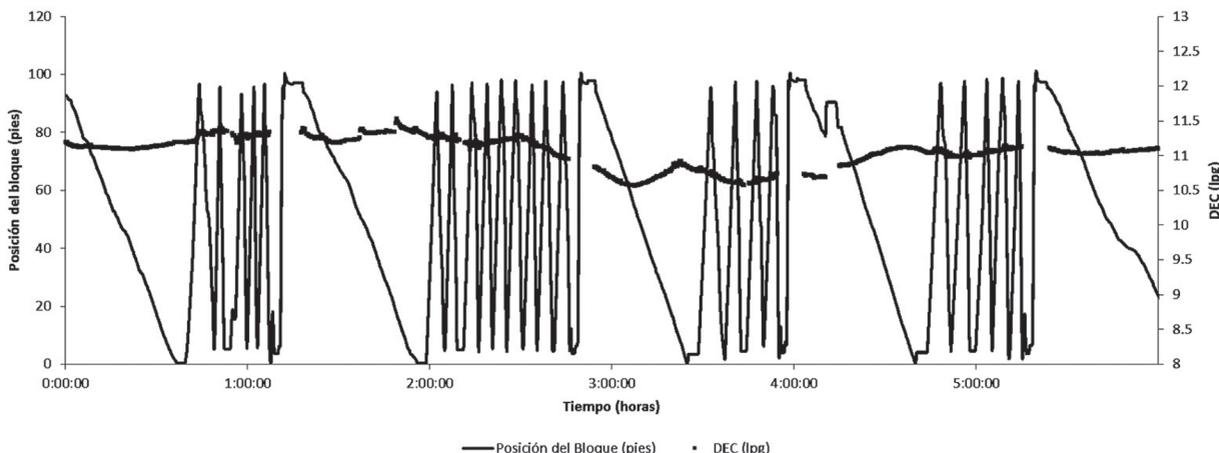
Siendo así, en la etapa de diseño del pozo, se delineó una estrategia de limpieza buscando combinar el efecto de flotación que brinda un fluido más denso, con la erosión de la cama de cortes, aprovechando el efecto mecánico de la rotación de la sarta de perforación en combinación con un fluido de reología media.

Se diseñó un programa de bombeo de “píldoras” o “baches” de fluido de alta densidad y viscosidad, en intervalos periódicos durante la perforación. La densidad seleccionada para las píldoras fue de 13,5 lpg (el fluido de perforación se diseñó para alcanzar un máximo de 11,0 lpg durante la perforación de la sección de 16” y 10,0 lpg en la perforación de la sección de 12 1/4”).

A partir de esto, se recalculó  $Q_{crit}$  obteniéndose los resultados expuestos en la Tabla 5 (Boas y Almeida, 2017).

**Tabla 5.** Cálculo de caudal crítico para el Pozo C-034 - baches de 13.5 lpg

Diámetro Hoyo $dh$ (pulg.)	Diámetro Tubería $dt$ (pulg.)	Punto Cedente $PC$ (lb/100 pies <sup>2</sup> )	Caudal Crítico $Q_{crit}$ (gpm)
16	5 1/2	30	2292
12 1/4	5 1/2	30	1059
8 1/2	5 1/2	32	227



**Figura 1.** Variación de la DEC (lpg) mientras se perfora la sección de 16” del pozo C-034. El caudal de trabajo fue de 1175 gpm constante en cada parada y se tenía 73° de inclinación

Para la sección de 12 1/4”, el caudal crítico con el bombeo de las píldoras permite teóricamente la limpieza del hoyo con el caudal disponible. Sin embargo, para el caso de la sección de 16”, si bien hay una reducción del caudal crítico, todavía sobrepasa por mucho el caudal disponible.

Como segunda medida de prevención, se optó por definir parámetros de perforación y estaciones de circulación que permitan el acarreo paulatino de cortes hacia atrás por efecto de erosión. Se llevó el valor de la rotación de la sarta al máximo, buscando levantar los cortes de la parte baja del pozo y ponerlos en el sentido de flujo. Adicionalmente, se limitó la velocidad de perforación (ROP), buscando no tener incrementos abruptos en la producción de cortes.

La Tabla 6, muestra los parámetros de perforación que fueron definidos (Boas y Almeida, 2017):

**Tabla 6.** Parámetros de perforación definidos por sección.

Diámetro Hoyo <i>dh</i> (pulg.)	Caudal (gpm)	Rotación (RPM)	ROP Máx. (pies/hr)
16	1200	140	220
12 1/4	1200	140	220
8 1/2	420	90	220

En cuanto a las estaciones de circulación, se planificaron estaciones cada 1000 pies durante la perforación, y en los viajes de salida (evitando realizarlo en la misma zona), con máximo caudal y rotación (140 RPM). Durante la corrida de revestimiento se planificaron estaciones de circulación cada 1000 pies, evitando coincidir con las estaciones de la perforación y viaje de salida.

El plan de bombeo de píldoras durante la perforación fue también cuidadosamente analizado. En zonas de arcillolita se planteó el bombeo de píldoras dispersas (40 bls) cada parada perforada, y píldoras viscosas – pesadas (40 bls, 13,5 lpg, 120 seg/ct) cada dos paradas perforadas. En zonas lutíticas se estableció bombear únicamente píldoras viscosa-pesadas cada 2 paradas perforadas. Durante los repasos de la parada se propuso dar el suficiente tiempo de circulación a máximas RPM para que la píldora retorne a superficie. Como práctica se estableció la circulación durante 3 minutos en fondo a máximas RPM, una vez finalizada la perforación de la parada, y el repaso durante 18 minutos como mínimo a máximas RPM de cada parada (Boas y Almeida, 2017).

### METODOLOGÍA PARA EL DIAGNÓSTICO EN TIEMPO REAL

#### DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACIÓN

Sobre la base del principio de que a mayor contenido de sólidos en el fluido, mayor será la presión hidrostática en un punto de la columna, se puede tomar medidas de presión anular en fondo con un sensor acoplado cerca de la broca, para evaluar cualitativamente la concentración de sólidos (cortes) en el fluido de perforación.

Si a esta presión hidrostática, se suman las pérdidas de presión en el anular por fricción debido al flujo, se puede obtener un valor de presión anular total, que transformado a densidad equivalente circulación (DEC), se convierte en una herramienta importante para evaluar la evacuación de cortes.

La transformación de la presión anular a densidad equivalente, en unidades de campo (sistema inglés), se realiza con la siguiente ecuación:

$$DEC = \frac{Pa}{0,052 \times TVD} \quad (1)$$

Donde *DEC* es la Densidad Equivalente de Circulación (lpg), *Pa* es la presión anular (lpc), y *TVD* la profundidad Vertical Verdadera (pies). Trabajando en términos de DEC, se puede tener una idea cualitativa de la carga de cortes en el anular al compararla con la densidad del fluido de perforación, sumada las pérdidas por fricción esperadas a un caudal determinado. Sin embargo, también se puede trabajar en términos de analizar el comportamiento de una curva de DEC graficada contra el tiempo.

Se monitoreó en tiempo real el comportamiento de estas curvas para tomar decisiones sobre la marcha durante la perforación. Un ejemplo se muestra en la Figura 1.

En la gráfica se puede observar cómo mientras se perfora cada parada, la acumulación de cortes frescos del fondo hace que se incremente la DEC, es decir, se tiene un incremento de presión anular.

Conforme se repasa cada parada perforada a máximo caudal y revoluciones en la sarta, y mediante el bombeo de píldoras acorde al diseño inicial, la DEC tiende a disminuir, como un síntoma de la evacuación efectiva de cortes.

Préstese atención al comportamiento de la DEC entre la segunda y tercera hora. Ésta fue una estación de circulación programada a máximo caudal y revoluciones de la sarta. En esta estación se bombearon dos “trenes” de píldoras viscosa-pesada (13,5 lpg, 120 seg/ct, 40 bls).

Al final de la circulación se tiene una disminución de la DEC en aproximadamente 1 lpg, equivalente a esa profundidad a aproximadamente 180 lpc de presión. Al final de la circulación la DEC se sitúa en 10,5 lpg, cercano a la densidad del fluido que en ese punto era de 10,2 lpg. Esto permitió concluir, que para ese momento, al menos en el fondo, se había logrado remover con éxito los cortes.

Cuando se retoma la perforación, se observa que la producción de cortes hace que la DEC incremente nuevamente, debiendo evacuarlos adecuadamente al repasar cada parada.

#### COMPARACIÓN DE DEC TEÓRICA VS. DEC MEDIDA

El comportamiento de la curva de la DEC brinda una idea de sobrecarga del anular con cortes respecto referido a un valor estable o “normal” de DEC. Sin

embargo, no necesariamente puede brindar por sí sola una idea de “limpieza” o “suciedad” del hoyo, si no se compara numéricamente.

Para ello, como metodología se adoptó también la simulación de los valores teóricos de la DEC de un hoyo del que se evacúa efectivamente los cortes, en intervalos de profundidad definidos, de forma que estos puedan ser comparados con las mediciones en tiempo real en fondo.

Las comparaciones se realizaron cada 500 o 1000 pies perforados en zonas de alto ángulo (más de 50°), y sobre la base de ellas se realizaron estaciones de circulación o se modificaron los parámetros de perforación. La Tabla 7 muestra los valores calculados de DEC, y los valores reales DEC para los diferentes intervalos muestreados.

**Tabla 7.** DEC Teórica y DEC Real para intervalos del pozo TPTC-034.

Sección (pulg.)	MD (pies)	DEC Teórica (lpg)	DEC Real (lpg)
16”	4500	11,22	11,32
16”	5000	11,36	11,38
12 1/4”	5500	10,71	10,66
12 1/4”	6000	10,85	11,10
12 1/4”	6500	10,81	11,00
12 1/4”	7000	10,94	11,00
12 1/4”	7500	11,00	11,20

La simulación teórica se puede realizar con cálculos simples “a mano”, aplicando directamente ecuaciones sencillas que consideran las propiedades reológicas del fluido y los diámetros del hoyo y las herramientas; a través de hojas de cálculo digital; o de software especializado para simulaciones hidráulicas de perforación. En este caso se usó la última alternativa.

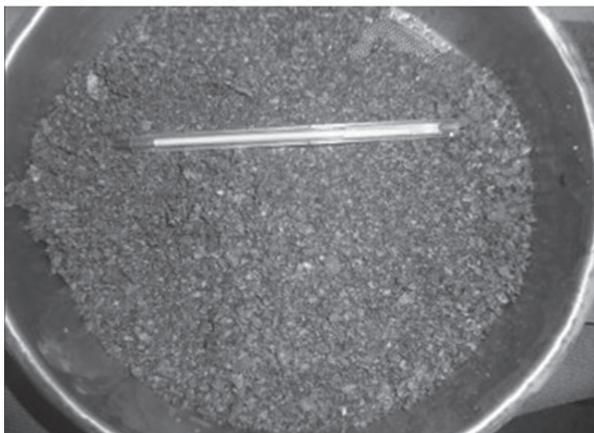
#### ANÁLISIS DE LOS CORTES EN SUPERFICIE

Además del análisis de presión anular, se estableció una metodología para verificar cualitativamente las condiciones de limpieza en superficie. Cada vez que se bombeaba una píldora viscosa, se estudiaron los retornos en las zarandas, analizando el tipo de corte (para verificar signos de inestabilidad del hoyo), su litología y la cantidad de cortes reportado en las zarandas.

Cortes provenientes de formaciones más someras, daban una indicación de formación de camas de cortes y deficiencia en la evacuación de los mismos, indicando la necesidad de detener la perforación y realizar una estación de circulación, a máximas RPM y caudal para evacuar los remanentes. La Figura 2 muestra evidencia

fotográfica de lo observado al retorno de una píldora viscosa pesada.

Para el caso de la muestra registrada en evidencia fotográfica de la Figura 2, se reportó de 5% a 10% de incremento de retornos de arcillolita, material fino a medio de máximo 8 mm, con forma irregular y signos de “re-trabajo”. La descripción litológica fue de 100% arcillolita de la formación Tiyuyacu.



**Figura 2.** Recortes recuperados en zarandas - píldora a 6500 pies.

En vista de que el material fue “re-trabajado” (indicando efecto de erosión mecánica sobre cama de cortes) y que la DEC real mostraba valores un superiores a los calculados, se decidió establecer una estación de circulación a esa profundidad para evacuar los cortes acumulados en la cara baja del pozo.

Estas tres herramientas, el seguimiento de la curva de DEC, la comparación del valor teórico y el calculado, y el análisis de cortes en superficie, se usaron en conjunto como una sola metodología de diagnóstico cualitativo de la limpieza del pozo, durante la perforación del TPTC-034 en las secciones de 16” y 12 1/4”.

Con esta metodología, se buscó probar la efectividad de la metodología previa, usada para definir las prácticas y parámetros de perforación en la etapa de diseño; pero también se probó su valía para predecir condiciones difíciles en el hoyo, para viajes de tubería de perforación y corrida de revestimiento. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente sección.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se puede observar en la sección anterior, la metodología propuesta permite hacerse una idea cualitativa de la limpieza del hoyo y la acumulación de camas de cortes, de manera indirecta.

Para la sección de 16” se estableció que la limpieza del hoyo era buena, con posible formación de camas de cortes en la zona de más de 50° de inclinación, cama de cortes que sin embargo, es erosionada con estaciones de circulación localizada, como se observa en el comportamiento de la curva de DEC. Además los valores de DEC se mantuvieron cercanos a los cálculos teóricos, lo que indica que se lograba remover hacia atrás los cortes acumulados en el ensamblaje de fondo.

El análisis de cortes en superficie permitió observar también cortes de formaciones más someras, lo que indicaba que la cama de cortes estaba siendo erosionada, y que las píldoras lograban acarrear gran parte del material acumulado a superficie, al reportar incrementos de 15% en volumen de retornos.

Para la sección de 12 1/4”, por otro lado, la metodología permitió determinar que las prácticas de limpieza durante la perforación habían permitido erosionar la cama de cortes, mas no eliminarla completamente en toda la sección, esto en función de que las lecturas de DEC se mantenía siempre por encima del cálculo teórico, sobre todo en los repasos de cada parada perforada. El comportamiento de la curva de DEC se mostró más o

menos estable, lo que permitió concluir que la cama de cortes formada era también más o menos homogénea en todo el intervalo.

Los retornos que se tuvieron de cortes en superficie, generalmente provenían de las formaciones que se atravesaban al momento, lo que indicaba que cortes de las formaciones someras que componían las camas, quedaban aún en el hoyo. Las píldoras reportaron incrementos de entre 5% y 10% en volumen de cortes, por lo que era evidente que la capacidad de acarreo no era igual a la sección de 16", sino menor, lo que es lógico, si se considera que la sección tangente es más larga.

Los resultados de la aplicación de la metodología también pueden ser medidos indirectamente. Una medida de la limpieza del hoyo en perforación, es la "facilidad" o "dificultad" con la cual se realizan los viajes de tubería de perforación, así como las corridas de tubería de revestimiento.

Por otro lado, hasta hoy en la Cuenca Oriente, es práctica común realizar "viajes de calibración" con tubería de perforación para "acondicionar" el hoyo previo a la corrida de tubería de revestimiento. Sin embargo, si las condiciones de hinchamiento o inestabilidad de las paredes han sido controladas, el único problema que quedaría por tratar para corridas de tubería de revestimiento, es justamente la limpieza y la formación de las camas de cortes.

Siendo así, una forma de determinar cualitativamente buena limpieza de hoyo, es verificar la "calidad de viaje" a través de la velocidad de sacada de la tubería de perforación.

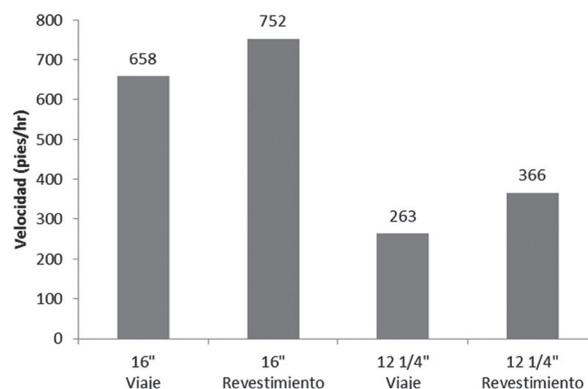
En zonas con mayor acumulación de cortes, será necesario realizar mayor cantidad de estaciones de circulación para removerlos, que en zonas de menor acumulación. Para el pozo estudiado en este trabajo, la sección que presenta mayor dificultad en cuanto a limpieza es la de 12 1/4", ya que se tiene una tangente continua de 3293 pies a 73° de inclinación en hoyo abierto. Esto fue corroborado aplicando la metodología planteada.

Con lo explicado líneas arriba en mente, se estableció la necesidad de realizar cinco estaciones de circulación durante el viaje de salida en la sección de 12 1/4" (en la sección de 16" se realizaron solo 3 estaciones), pues se sospechaba una acumulación de cortes continua en la cara baja del pozo. Las estaciones de circulación se realizaron espaciadas 1000 pies las primeras tres (tomando en cuenta la primera en fondo), y luego cada

500 pies las siguientes, puesto que el arrastre de la sarta durante el viaje (40 klbs por encima del peso medido en ese punto) mostraba acumulación de cortes en la parte más somera del hoyo abierto.

El diagnóstico de limpieza elaborado con la metodología planteada, permitió establecer con confianza, la posibilidad de correr la tubería de revestimiento, sin necesidad de viajes de calibración en las secciones de 16" y 12 1/4". Como era de esperar, la corrida de revestimiento se previó más lenta para la sección de 12 1/4". Adicionalmente, al determinar que había una alta probabilidad de que todavía exista una cama de cortes (aunque ya erosionada) en el hoyo, se contempló la necesidad de correr el revestimiento con anillos de torque, que permitieran rotar la tubería mientras se circula, para ayudar aún más en la remoción de esos cortes remanentes.

La Figura 3 muestra las velocidades de viaje de la tubería de perforación, en hoyo abierto (sin revestimiento) para las secciones de 16" y 12 1/4", y las velocidades de corrida de tubería de revestimiento para las mismas secciones.



**Figura 3.** Velocidades de viaje y corrida de revestimiento pozo TPTC-034.

Como se predijo, de acuerdo al diagnóstico entregado por la metodología planteada, la tubería de revestimiento bajó totalmente libre en la sección de 16". Por otro lado, en la sección de 12 1/4" bajó libre hasta los 7890 pies, donde el arrastre de la cama de cortes ya erosionada, obligó a continuar con caudal y rotación hasta el fondo (los últimos 620 pies), situación que se había previsto de igual forma.

## CONCLUSIONES

Lo anterior expuesto, permite concluir que la metodología planteada para el diagnóstico cualitativo en tiempo real de la limpieza del hoyo, se convirtió en

una herramienta adecuada para la toma de decisiones durante la ejecución de la operación de perforación del pozo.

Si bien al momento existe software desarrollado sobre la base de algoritmos matemáticos, que buscan simular la formación de camas de cortes, estos todavía no logran considerar todas las variables involucradas para una aproximación adecuada. Siendo así, las herramientas de análisis cualitativo, como la metodología desarrollada y publicada en este artículo, se convierte en una herramienta valiosa para la definición de prácticas operacionales que ayuden a mitigar el problema, y lleven a optimizar tiempo y costos en la perforación de pozos.

No es posible con el uso de esta metodología, generalizar comportamientos únicos de los cortes para todos los pozos, combinando los comportamientos específicos analizados en cada herramienta; sin embargo, el entendimiento físico del fenómeno permite elaborar “imagen” de lo que ocurre en el pozo, que oriente la toma de decisiones en tiempo real, optimizando el uso de recursos.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a PETROAMAZONAS EP, por brindar las facilidades para la realización de este estudio y la publicación de sus resultados. En especial agradecen a su Gerente Coordinador de Operaciones, Ing. Darío Cuenca, y Gerente de Perforación, Ing. Freddy Ramírez.

## REFERENCIAS

1. Bizanti, M. S. & Alkafeef, S. F. (2003). A Simplified Hole Cleaning Solution to Deviated and Horizontal Wells. Society of Petroleum Engineers. doi: 10.2118/81412-MS
2. Boas, J. y Almeida, D. (2017). Prácticas para la optimización de la limpieza hoyo, en la perforación de pozos de alto ángulo y largo alcance en el campo Tiputini – Bloque 43, PETROLEO&GAS, 13 (1), 23-28.
3. Brown, N. P., Bern, P. A. & Weaver, A. (1989). Cleaning Deviated Holes: New Experimental and Theoretical Studies. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/18636-MS
4. Power, D. J., Hight, C., Weisinger, D. & Rimer, C. (2000). Drilling Practices and Sweep Selection for Efficient Hole Cleaning in Deviated Wellbores. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/62794-MS.
5. Rasi, M. (1994). Hole Cleaning in Large, High-Angle Wellbores. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/27464-MS.
6. Saasen, A. (1998). Hole Cleaning During Deviated Drilling - The Effects of Pump Rate and Rheology. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/50582-MS.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Tabla de conversión de unidades de campo (UC) a unidades del Sistema Internacional (SI).

Medida	UC	SI	Factor de conversión
Longitud	pie	m	0,3048
Diámetro	pulg	m	0,0254
Densidad	lpg	Kg/m <sup>3</sup>	119,83
PC	lb/100 pies <sup>2</sup>	Pa	0.4788
Caudal	gpm	m <sup>3</sup> /s	7,57x10 <sup>-5</sup>
Velocidad	pies/hr	m/s	0,3048
Presión	lpc	Pa	6894,76
Volumen	Bl	m <sup>3</sup>	0,1590
Visc. de embudo	seg/ct	seg/m <sup>3</sup>	4000

**Recepción:** 4 de marzo de 2017

**Aceptación:** 18 de mayo de 2017