

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA MECÁNICA DE BROCA HÍBRIDA EN LA
PERFORACIÓN DE LA SECCIÓN 8½" EN EL PIEDEMONTES LLANERO

MARÍA JOSÉ LLANES PARDO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C.
2017

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA MECÁNICA DE BROCA HÍBRIDA EN LA
PERFORACIÓN DE LA SECCIÓN 8½" EN EL PIEDEMONTA LLANERO

MARÍA JOSÉ LLANES PARDO

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
JESUS VERGARA
Ingeniero de Petróleos

Orientador
CARLOS ESPINOSA
Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C.
2017

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C, Abril de 2017

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUÍS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica de Postgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano de Ingenierías y Decano de Carrera

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director (E) Programa de Ingeniería de Petróleos

Dr. EDGAR DAVID CEDEÑO LIGARRETO

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el correspondiente documento.

A Dios, por ser mi guía, fuerza y apoyo siempre.
A Mi familia, mis papás y mi hermano por su amor, esfuerzo, apoyo incondicional, respaldo y motivación siempre.
A Juan Camilo por ser mi apoyo y mi ángel en este camino.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

COMPAÑÍA BAKER HUGHES DE COLOMBIA, por su aporte geológico, técnico y financiero en todas las etapas de desarrollo del proyecto y acompañamiento.

Ing. Sandro Mendoza, por su confianza y oportunidad para la elaboración de este proyecto.

Ing. Jesús Vergara, por su tiempo, experiencia, conocimientos compartidos y por su compromiso y colaboración en la dirección del trabajo de grado.

Ing. Daniel Alejandro Rodríguez, por su apoyo en la realización de este proyecto.

Ing. Carlos Espinosa e Ing. Walter Tobón, por su apoyo, experiencia y asesorías a lo largo de este proyecto.

A los orientadores técnico, geológico y financiero por su disposición, consejos y tiempo dedicado para la culminación este proyecto.

A las directivas, profesores y personal administrativo de la Universidad América por el apoyo y la capacitación recibida durante la carrera.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	25
1.GENERALIDADES DEL CAMPO FLOREÑA	26
1.2 HISTORIA DEL CAMPO FLOREÑA	26
1.3 LOCALIZACIÓN	26
1.4 MARCO GEOLÓGICO	29
1.4.1 Columna Estratigráfica Generalizada	29
1.4.2 Estratigrafía	30
1.4.2 Geología Estructural	35
1.4.3 Geología del Petróleo	36
1.5 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO	38
1.5.1 Método de producción	38
1.5.2 Tipo de fluido	38
1.5.3 Número de pozos	38
1.5.4 Tiempo de producción	38
1.5.5 Producción acumulada	38
2. GENERALIDADES DE LA PERFORACIÓN	40
2.1 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN	40
2.1.1 Peso sobre la broca (WOB)	40
2.1.2 Revoluciones por minuto (RPM)	40
2.1.4 Tasa de flujo (GPM)	41
2.1.5 Pérdida de Presión (SPP)	41
2.2 BROCAS DE PERFORACIÓN	41
2.3 TIPOS DE BROCAS CONVENCIONALES	42
2.3.1 Brocas PDC	44
2.3.2 Brocas tricónicas	48
2.4 BROCAS HÍBRIDAS	54
2.4.1 Calificación de brocas híbridas	56
2.5 ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA	58
3. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN DE LOS POZOS DE ESTUDIO CON BROCA PDC Y BROCA HÍBRIDA	59

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN EL POZO FL1 PARA EL INTERVALO DE 18074 A 18179 PIES CON BROCA HÍBRIDA	69
3.1.1 Broca	69
3.1.2 Parámetros de perforación	70
3.1.3 Calificación de la broca	71
3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PERFORACIÓN EN EL POZO FL1 PARA EL INTERVALO DE 18179 A 18264 PIES CON BROCA PDC	71
3.2.1 Broca	71
3.2.2 Parámetros de perforación	71
3.2.3 Calificación de la broca	73
3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PERFORACIÓN EN EL POZO FL1 PARA EL INTERVALO DE 18264 A 18437 PIES CON BROCA PDC	73
3.3.1 Broca.	73
3.3.2 Parámetros de perforación	73
3.3.3 Calificación de la broca	74
3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN EL POZO FL2 PARA EL INTERVALO 11520 A 12445 PIES CON BROCA HÍBRIDA	74
3.4.1 Broca	74
3.4.2 Parámetros de perforación	74
3.4.3 Calificación de la broca	75
3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN EL POZO FL2 PARA EL INTERVALO 12445 A 13005 PIES	75
3.5.1 Broca	76
3.5.2 Parámetros de perforación	76
3.5.3 Calificación de la broca	76
3.6 COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN LOS POZOS PERFORADOS CON BROCA PDC Y BROCA HÍBRIDA	77
3.6.1 Comparación de la ROP efectiva entre las brocas corridas en los intervalos de estudio	77
3.6.2 Comparación del torque promedio presentado con el uso de las brocas corridas en los intervalos de estudio	78
3.6.3 Relación entre la tasa de perforación y torque	79
3.6.4 Relación entre el peso sobre la broca y el torque	81

4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS BROCAS SEGÚN SU EFICIENCIA MECÁNICA	83
4.1 EVALUACIÓN DE LA BROCA HÍBRIDA USADA EN EL POZO FL1 EN LA FORMACIÓN MIRADOR	84
4.2 EVALUACIÓN DE LA BROCA PDC USADA EN EL POZO FL1 EN LA FORMACIÓN MIRADOR	85
4.3 EVALUACIÓN DE LA BROCA PDC USADA EN EL POZO FL1 EN EL INTERVALO DE 18264 A 18437 PIES	86
4.4 EVALUACIÓN DE LA BROCA HÍBRIDA USADA EN EL POZO FL2 EN EL INTERVALO DE 11520 A 12445 PIES	87
4.5 EVALUACIÓN DE LA BROCA PDC USADA EN EL POZO FL2 EN EN EL INTERVALO DE 12445 A 13005 PIES	89
4.6 COMPARACIÓN ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA PARA LOS INTERVALOS DE ESTUDIO	91
5. ANÁLISIS FINANCIERO	94
5.1 TASA DE INTERÉS DE OPORTUNIDAD (TIO)	94
5.2 ANÁLISIS DE COSTOS (OPEX)	95
5.3 EVALUACIÓN FINANCIERA	96
5.3.1 Valor presente neto (VPN)	98
5.3.1.2 Flujo de efectivo para la broca PDC y la broca híbrida en la Formación Los Cuervos	100
5.3.2 Diferencia en el costo total por broca proyectado a cinco años en la Formación Mirador	102
5.3.3 Diferencia en el costo total por broca proyectado a cinco años en la Formación Los Cuervos	102
6. CONCLUSIONES	103
7. RECOMENDACIONES	104
BIBLIOGRAFÍA	105
ANEXOS	107

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Brocas convencionales	43
Tabla 2. Clasificación IADC para brocas de cortadores fijos	
Tabla 3. Clasificación IADC para brocas tricónicas	51
Tabla 4. Ejemplo de calificación de broca híbrida.	57
Tabla 5. Especificaciones para cada Pozo de estudio	59
Tabla 6. Especificaciones de las brocas de estudio y condiciones de operación en el Pozo L1.	60
Tabla 7. Calificación de la broca híbrida usada para perforar el intervalo A (18094-18179 pies) en el Pozo L1.	60
Tabla 8. Calificación de la broca PDC usada para la perforación del intervalo B (18179-18264 pies) en el Pozo L1	60
Tabla 9. Calificación de la broca PDC usada para la perforación del intervalo C (18264–18438 pies) en el Pozo L1	60
Tabla 10. Especificaciones de las brocas de estudio y condiciones de operación en el Pozo L2.	65
Tabla 11. Calificación de la broca híbrida usada para la perforación del intervalo D (11520 a 12445 pies) en el Pozo L2	65
Tabla 12. Calificación de la broca PDC usada para la perforación del intervalo E (12445-13005 pies) en el Pozo L2.	65
Tabla 13. Parámetros de operación en los intervalos de estudio	
Tabla 14. Costo por pie para la perforación de la Formación Mirador en la sección de 8 ½”,	96
Tabla 15. Costo por pie para la perforación de la Formación Cuervos en la sección de 8 ½”,	96
Tabla 16. Cálculo del costo total con el uso de broca PDC en la Formación Mirador y en la Formación Los Cuervos	97
Tabla 17. Cálculo de la inversión total con el uso de broca híbrida en la Formación Mirador y Formación Los Cuervos	98
Tabla 18. Proyección a cinco años de los costos totales	101

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Producción acumulada de petróleo y gas para el Campo Floreña	39
Gráfica 2. ROP y profundidad perforada para cada intervalo de estudio.	78
Gráfica 3. Relación entre el ROP y Torque para los intervalos de estudio en la Formación Mirador	80
Gráfica 4. Relación entre la ROP y Torque para los intervalos de estudio en la Los Cuervos	81
Gráfica 5. Relación entre el WOB y el Torque en los intervalos de estudio en la Formación Mirador	82
Gráfica 6. Relación entre el WOB y el Torque en los intervalos de estudio en la Formación Los Cuervos	82
Gráfica 7. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L1 en el intervalo A (18094 ft a 18179 ft) en la Formación Mirador	85
Gráfica 8. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L1 en el intervalo B (18179 a 18264 pies)	86
Gráfica 9. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L1 en el intervalo C (18264 a 18437 pies)	87
Gráfica 10. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L2 en el intervalo D (11520 pies a 12445 pies) en la Formación Los Cuervos	88
Gráfica 11. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L2 en el intervalo E (12446 pies a 12986 pies) en la Formación Los Cuervos.	90
Gráfica 12. ROP vs MSE intervalos de estudio en el Pozo FL1 en la Formación Mirador	92
Gráfica 13. ROP vs MSE intervalos de estudio del Pozo FL2 en la Formación Los Cuervos	93

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Energía Específica	58
Ecuación 2. Energía Mecánica Específica	58
Ecuación 3. Eficiencia mecánica sin confinamiento	83
Ecuación 4. Eficiencia mecánica con confinamiento	83
Ecuación 5. Cálculo de costo por pie	95
Ecuación 6. Cálculo matemático del VPN	98

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Variación de los parámetros de perforación respecto a la profundidad en los intervalos A, B y C en el pozo L1	108
ANEXO B. Variación de los parámetros de perforación respecto a la profundidad en los intervalos D y E en el pozo L2	109
ANEXO C. Hoja técnica broca usada en el intervalo A en el pozo L1	110
ANEXO D. Hoja técnica broca usada en el intervalo B en el pozo L1	111
ANEXO E. Hoja técnica broca usada en el intervalo C en el pozo L1	112
ANEXO F. Hoja técnica broca usada en el intervalo D en el pozo L2	113
ANEXO G. Hoja técnica broca usada en el intervalo E en el pozo L2	114

ABREVIATURAS

°C	Grados Celsius de temperatura
°F	Grados Fahrenheit de temperatura
Ab	Área de la broca
AFI	Ángulo de fricción interna de la roca
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
BHA	Ensamblaje de fondo (Bottom Hole Assembly)
Bls	Barriles
CCS	Resistencia a la compresión con confinamiento.
CPF	Costo por pie (Cost per feet)
DSE	Energía específica de perforación (Drilling Specific Energy)
ECD	Densidad circulante equivalente. (Equivalent Circulating Density)
EFFM	Eficiencia mecánica
Fm	Formación
Ft	Feet (pies)
Ft/h	Pies/Hora
Gpm	Galones por minuto
h	Hora
IADC	Asociación internacional de contratistas de perforación (International Association of Drilling Contractors).
IPP	Índice de precio al productor
KBPD	1000 barriles por día
Km	Kilómetros
m	Metros
MD	Profundidad medida (Measure depth)
MSE	Energía mecánica específica (Mechanical Specific Energy)
OD	Diámetro externo (Outer Diameter)
P	Presión
PP	Presión de poro
PPG	Libras por galón (Pounds per gallon)
PSI	Libras por pulgada cuadrada (Pounds per Square Inch)
PV	Viscosidad plástica. (Plastic Viscosity)
ROP	Rata de penetración (Rate Of Penetration)
RPM	Revoluciones por minuto (Revolution Per Minute)
SE	Energía específica (Specific Energy)
Seg	Segundos
SPP	Pérdida de presión en el sistema. (StandPipe Pressure)
T	Torque

TIO	Tasa de interés de oportunidad.
TOC	Carbono orgánico total (Total Organic Carbon)
UCS	Resistencia a la compresión de la roca sin confinamiento.
USD	Dólar estadounidense
WOB	Peso sobre la broca (Weight On Bit)

GLOSARIO

AFLORAMIENTO: área total en la que una unidad rocosa aparece en superficie o inmediatamente debajo de los sedimentos superficiales, ya sea visible o no.

AMBIENTE ANÓXICO: aquel ambiente que carece de oxígeno.

AMBIENTE DE DEPOSITACIÓN: punto geográfico donde se da la acumulación de sedimentos. Los ambientes de depositación suelen clasificarse en continentales, marinos o de transición.

ANTICLINAL: pliegue producido en las rocas en forma de arco en el que las capas de roca son convexas hacia arriba. Las rocas más antiguas se encuentran en la parte central de la estructura, mientras que las más modernas se encuentran hacia la parte externa.

ARCILLOLITA: roca sedimentaria de origen detrítico, compacta y sin fisilidad cuyo tamaño de grano es inferior a 1/256 milímetros. Está compuesta por filosilicatos de aluminio hidratados, con presencia ocasional de hierro, magnesio y metales alcalinos.

ARENA: material sedimentario de origen detrítico, formado por granos cuyo diámetro oscila entre 0,0625 y dos milímetros. Está compuesta principalmente por sílice en forma de cuarzo.

ARENISCA: roca sedimentaria clástica cuyos granos son generalmente del tamaño de la arena. Posee un grado relativamente alto de porosidad y permeabilidad, lo cual le da la propiedad de buena roca reservorio. Está compuesta por granos de cuarzo y cemento silíceo.

BHA: (bottom hole assembly). Ensamblaje en fondo usado para el adecuado direccionamiento del pozo. Agrupa el conjunto de herramientas entre la broca y la tubería de perforación.

BROCA: herramienta usada en perforación para el corte de la formación.

CABALGAMIENTO: desplazamiento horizontal y superposición de una gran masa de materiales sobre otro grupo de materiales debido a la acción de las fuerzas tectónicas.

CAMPO: área que contiene uno o más yacimientos de petróleo, relacionados con los mismos aspectos geológicos estructurales y/o estratigráficos.

CHERT: roca silíceas de origen químico de estructura microcristalina, presente en rocas carbonatadas formando nódulos interstratificados. Está compuesta principalmente por cuarzo microcristalino, criptocristalino y microfibrroso.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA: representación gráfica vertical de las unidades litológicas conformantes de un área específica.

CONCORDANCIA: cuando existe paralelismo entre dos unidades estratigráficas superpuestas.

CONGLOMERADO: roca sedimentaria clástica de grano grueso generalmente con un diámetro mayor a cinco milímetros, con matriz de grano fino de arena, limo o material cementante natural.

DEPOCENTRO: área de depositación de mayor espesor de una cuenca.

DEPOSITACIÓN: proceso geológico que representa la caída de partículas que han sido erosionadas y transportadas por el viento, para su posterior acumulación y sedimentación.

DETRÍTICOS: término usado en el origen de roca sedimentaria que se encuentra formada por restos de otras rocas que han sido transportados por el viento, el agua o los glaciares.

DISCORDANCIA: interrupción en la secuencia geológica, representando un intervalo de tiempo en el cual no se produjo depositación. En este intervalo las rocas infrayacentes pueden haber sufrido algún tipo de proceso geológico que ocasiona que no exista paralelismo entre la estructura superior e inferior de la discordancia.

DRILL OFF TEST: prueba utilizada con el fin de determinar el valor óptimo en parámetros como el peso sobre la broca (WOB) y las revoluciones por minuto (RPM).

DRILL PIPE: tubería de perforación. Conecta el equipo de superficie con el BHA y la broca y permite levantar, bajar y transmitir rotación al equipamiento de fondo.

EPIDOTA: grupo de minerales que incluyen los silicatos básicos de calcio, aluminio, hierro y manganeso.

FACIES: carácter distintivo de los estratos o de ciertos constituyentes, que generalmente refleja sus condiciones ambientales de formación.

FALLA: interrupción existente en las capas de una roca, a lo largo de la cual existe un desplazamiento observable.

FALLA INVERSA: se da cuando el bloque de techo se desplaza en forma ascendente a lo largo del plano de falla respecto al bloque de piso. Este movimiento suele producirse en zonas de compresión. Cuando una falla inversa presenta inclinación inferior a 45 grados, toman el nombre de fallas de cabalgamiento.

FALLA NORMAL: se da cuando el bloque de techo se desplaza hacia abajo respecto al bloque de piso, y la superficie de falla se inclina en forma abrupta usualmente con un ángulo entre 50 y 90 grados.

FLUIDO DE PERFORACIÓN: fluido que es circulado a través del pozo en operaciones de perforación.

FORMACIÓN: unidad fundamental de la litoestratigrafía. Un cuerpo de roca suficientemente característico y continuo para ser mapeado.

FOSFATOS: grupo complejo de minerales que tienen como característica común la presencia del anión $(PO_4)^{3-}$. Es un elemento constitutivo de las rocas eruptivas y acompañante de minerales metálicos.

GAUGE: hace referencia a la calibración de los diámetros de brocas y estabilizadores, con el fin de garantizar el diámetro del hueco perforado.

GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO: aplicación de la geología encargada del estudio de las características litológicas relacionadas con la formación, migración, entrapamiento y almacenamiento del petróleo. Entre sus objetivos se encuentra la localización y prospección de yacimientos de petróleo.

GRANATE: grupo de silicatos complejos de aluminio, hierro, manganeso, cromo, calcio y magnesio. Comúnmente están presentes en rocas metamórficas.

GRAVEDAD API: Propiedad que establece la calidad y tipo de crudo. Está relacionada con la gravedad específica de cada hidrocarburo.

HIDROCARBURO: compuesto orgánico, formado por hidrogeno y carbono. Se encuentra en forma de gases, líquidos y sólidos. Los hidrocarburos más comunes son el gas natural, el petróleo y el carbón.

ILMENITA: mineral débilmente magnético, presente en rocas metamórficas e ígneas básicas (gabro, diabasa, piroxenita). Compuesta principalmente por óxido

de hierro y óxido de titanio. Se presenta en forma de tubulares delgados y romboédricos.

INGAUGE: cuando el calibre de la broca o del estabilizador es igual antes y después de la corrida.

IPP: (índice de precio al productor). Indicador de la evolución de los precios de venta del productor.

LAMINACIÓN: proceso de formación de capas delgadas (láminas) en algunas estructuras rocosas.

LENTE: miembro constituido por roca de aspecto lenticular y de características litológicas diferentes a la de la unidad que lo contiene.

LIMOLITA: roca sedimentaria detrítica, perteneciente al grupo de rocas clásticas. Procede de la cementación y compactación de partículas detríticas intermedias entre arcillas y arenas. Su tamaño de grano oscila entre 1/16 y 1/256 mm y está compuesta por arcillas, limos y coloides.

LUTITA: roca sedimentaria con baja cementación, presenta textura pelítica y está compuesta por partículas de tamaño de arcilla. Constituye más de la mitad de las rocas sedimentarias. Su tamaño de grano se encuentra entre 1/16 mm y 1/256 mm de diámetro.

LODOLITA: roca sedimentaria no laminar constituida por granos del tamaño de lodo y que incluye proporciones similares de arcilla y limo.

NÓDULO: masa decimétrica o centimétrica que se diferencia por su composición y/o su estructura del resto de la roca que la contiene.

OUTGAUGE: Cuando el calibre de la broca no es el mismo una vez finaliza la corrida. (Fuera de calibre)

PERMEABILIDAD: capacidad de la roca de permitir el flujo de fluidos a través de sus poros interconectados.

POROSIDAD: medida de la capacidad de almacenamiento que posee una roca. Está definida como la fracción del volumen total de la roca que corresponde a espacios para almacenar fluidos.

POZO: hace referencia a cualquier perforación del suelo, cuyo objetivo es extraer fluidos de un yacimiento.

POZO DE DESARROLLO: pozo perforado con el objetivo de producir las reservas de un yacimiento.

POZO EXPLORATORIO: pozo que se perfora como investigación de una nueva acumulación de hidrocarburos. En este caso, la estructura rocosa no es conocida a detalle.

PROPIEDADES PETROFÍSICAS: propiedades relacionadas con las características de la roca y los fluidos contenidos en esta, así como su movimiento a través del medio poroso.

ROCA GENERADORA: roca rica en contenido de materia orgánica, que al recibir la temperatura y presión necesarias generara hidrocarburos. Usualmente las rocas generadoras típicas son Lutitas o calizas.

ROCA RESERVORIO: roca que posee la capacidad de almacenar fluidos y permitir su paso a través de esta, por lo cual debe poseer buenas condiciones de porosidad y permeabilidad.

ROCA SELLO: roca de baja permeabilidad que actúa como barrera frente a la migración de petróleo. La permeabilidad de una roca capaz de retener fluidos oscila entre 10^{-6} y 10^{-8} darcies.

ROP EFECTIVA (ft/h): ROP en tiempo real. Su cálculo se da dividiendo los pies perforados entre el tiempo efectivo.

ROP PROMEDIO (ft/h): promedio aritmético de la ROP obtenida en la perforación.

RUTILO: pertenece al grupo de los minerales óxidos, es un óxido de titanio. Su dureza oscila entre 6 y 6,5. Se halla principalmente en calizas metamorfizadas.

SIDERITA: mineral pesado romboédrico compuesto por carbonato de hierro. Se deposita en medios pantanosos y en ausencia de oxígeno y usualmente se presenta en forma de cristales romboédricos.

SIDETRACK: desviación en la perforación de un pozo debido a una obstrucción.

TIEMPO EFECTIVO (h): tiempo en el cual la broca estuvo trabajando en contacto con la formación.

TRAMPA: es una configuración rocosa impermeable que evita la migración de hidrocarburo.

TRAMPA ESTRATIGRÁFICA: está relacionada con las propiedades de la formación rocosa.

TRAMPA ESTRUCTURAL: relacionada con las trampas de hidrocarburos que se forman en las estructuras geológicas, tales como pliegues o fallas.

TORQUE (T) lbf-ft: fuerza que se requerida para que un eje o mecanismo rotatorio gire.

TURMALINA: mineral silicato. Su dureza oscila entre 7 y 7,5. Puede encontrarse en rocas sedimentarias como material detrítico.

ZIRCÓN: mineral compuesto por silicato de zirconio. Su tamaño medio oscila entre 100 y 300 μm . Su dureza es de 7,5.

RESUMEN

Se evaluó la implementación en el Piedemonte Llanero de Colombia de una broca híbrida, la cual integra el mecanismo de corte de una broca de conos y una broca PDC, comparando su desempeño con el de una broca PDC.

Se inicia con la descripción de las generalidades de la Cuenca de la Cordillera Oriental así como la historia de producción del Campo Floreña, continuando con una descripción teórica de los tipos convencionales de brocas de perforación, así como de la broca híbrida en cuestión.

A continuación se realizó una descripción de los resultados obtenidos con la perforación tanto de broca PDC como de broca híbrida en la perforación de los intervalos de estudio, para su posterior análisis.

Una vez completado lo anterior, se procedió a realizar la comparación entre el desempeño de la broca PDC y el desempeño de la broca híbrida en los intervalos correspondientes para cada caso, esta comparación se hizo con base en los parámetros de perforación y la energía mecánica específica, esto con el fin de evaluar el tipo de broca más eficiente en las Formaciones de estudio.

Finalmente se determinó el valor de la inversión en términos de brocas para futuras campañas de perforación en la Formación Mirador y Formación Los Cuervos, evaluando los dos tipos de broca.

Palabras Clave: Broca Perforación, Broca híbrida, Perforación, Energía Mecánica Específica,

INTRODUCCIÓN

La perforación de pozos petroleros corresponde a una etapa fundamental en la extracción y producción de hidrocarburos, razón por la cual se requiere un continuo avance en las tecnologías aplicadas en dicho proceso. Entre estas tecnologías se encuentra el constante avance en materia de brocas buscando optimizar tiempos totales de perforación y parámetros como la energía aplicada, ROP y torque.

En este proyecto se lleva a cabo la evaluación de la implementación de una nueva tecnología de brocas, la cual integra la estructura y funcionamiento de una broca de conos y de una broca PDC y busca mitigar los efectos adversos sobre el torque y energía mecánica específica aplicada en los procesos de perforación en el área de estudio (Campo Floreña).

El estudio se realiza con base en datos obtenidos en la perforación de los intervalos de estudio con broca convencional (PDC) y con broca híbrida, analizando tanto los parámetros de operación como las condiciones físicas de las brocas a estudiar una vez retiradas de fondo, estas condiciones, son posteriormente comparadas con el fin de determinar la broca cuyo desempeño conlleve a una perforación más efectiva en términos de energía mecánica específica, rata de penetración y tiempos efectivos, lo cual se ve reflejado en beneficios económicos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia mecánica de broca híbrida en la perforación de la sección 8½" en el Piedemonte Llanero

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las generalidades del Campo Floreña.
2. Describir generalidades de la perforación de pozos petroleros.
3. Describir los resultados obtenidos en la perforación con broca PDC y broca Híbrida de los pozos a estudiar en el Piedemonte Llanero.
4. Analizar los resultados obtenidos en la perforación de los pozos de estudio en el Piedemonte Llanero con brocas PDC.
5. Analizar los resultados obtenidos tras la perforación con el uso de la broca híbrida en el pozo de estudio en el Piedemonte Llanero.
6. Comparar los resultados obtenidos tras la aplicación de las Brocas PDC y Broca híbrida en las operaciones de perforación estudiadas.
7. Determinar tipo de broca cuyo desempeño conlleve a la mayor eficiencia mecánica.
8. Evaluar la viabilidad financiera de la aplicación de la Broca híbrida mediante el indicador de Valor Presente Neto (VPN) para las operaciones de perforación.

1. GENERALIDADES DEL CAMPO FLOREÑA

En este capítulo se presenta una breve descripción del Campo Floreña, incluyendo antecedentes, localización, marco geológico e historia de producción.

1.2 HISTORIA DEL CAMPO FLOREÑA

El Campo Floreña se encuentra dentro del contrato de Asociación del Piedemonte, el cual consiste en un bloque exploratorio otorgado por Ecopetrol a la British Petroleum Colombia (BP) en 1989. Fue firmado en 1992 y su vigencia se extiende hasta el año 2020¹.

Fue descubierto en 1995, con el Pozo Floreña 1 con una profundidad aproximada de 15000 pies mostrando potencial hidrocarburífero en la Formación Barco. En Junio de 1996 se perforó el Pozo Floreña 2, el cual no mostró presencia de hidrocarburos. En 1998 se perforó el Pozo Floreña 3 alcanzando una profundidad promedio de 16000 pies, el cual mostró potencial hidrocarburífero en la Formación Barco. A diferencia de los campos cercanos, la formación productora no se encontró a la profundidad de Mirador, sino que estaría ubicada aproximadamente a 15000 pies de profundidad en la Formación Barco.

A Noviembre de 2016 el área estimada del Campo es de 25741 Ha y continúa bajo la operación de EQUIÓN ENERGÍA LIMITED, tras la venta de los activos de BP.

1.3 LOCALIZACIÓN

El Campo Floreña está ubicado en el Piedemonte Llanero, en la Cuenca de la Cordillera Oriental de Colombia, la cual está ubicada entre el Valle del río Magdalena y la Cuenca de los Llanos Orientales. El campo se encuentra en el Departamento de Casanare, en el Municipio de Yopal, específicamente en el corregimiento El Morro. El Campo Floreña limita al sur con los Campos Cusiana y Cupiagua, al sureste con el Campo Pauto, al Norte con la quebrada Aracaleña y el Campo Niscota.

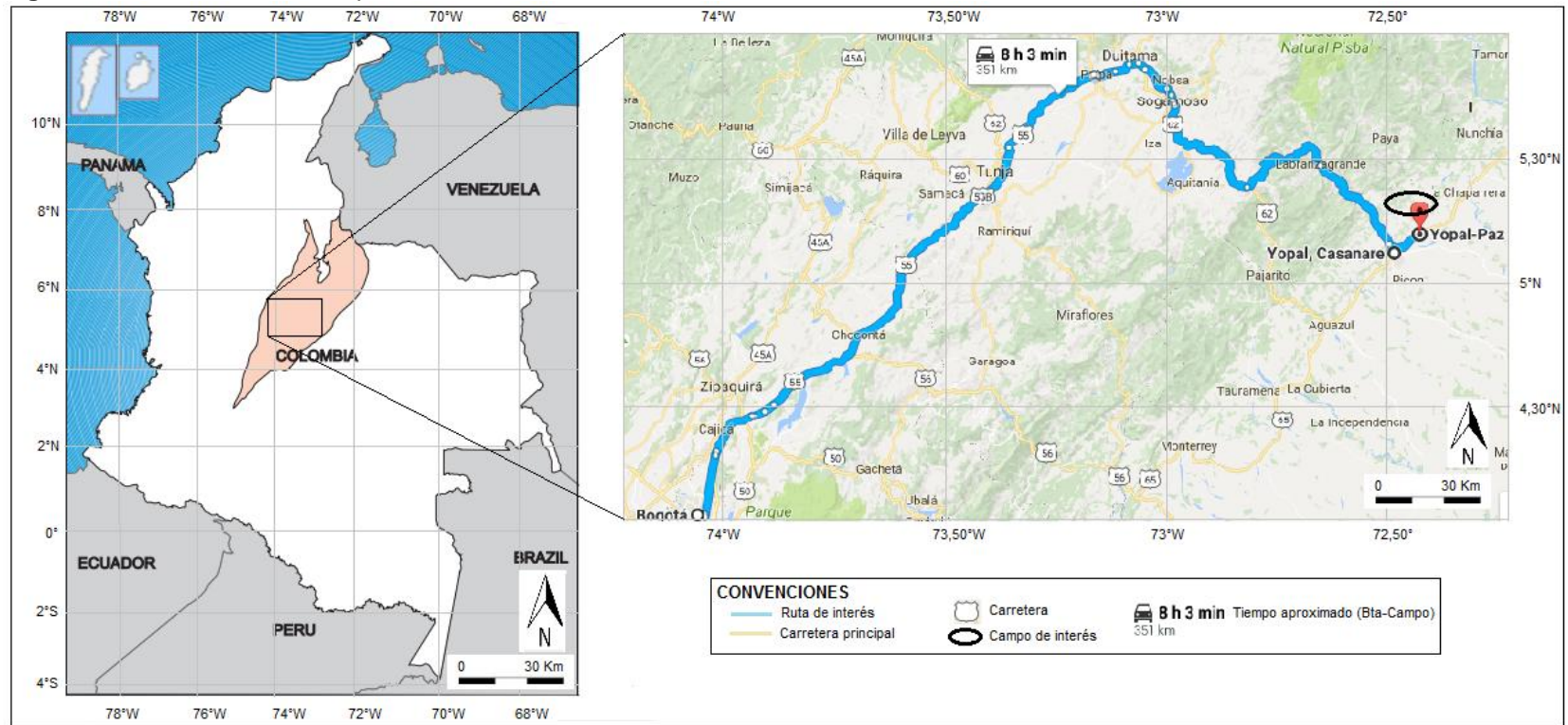
Para acceder al Campo partiendo desde Bogotá se toma la salida por la autopista norte, siguiendo la ruta 55 recorriendo 230 kilómetros aproximadamente hasta Sogamoso y pasando por Villapinzón, Paipa y Duitama. A continuación se toma la vía 62 hacia el sur, recorriendo aproximadamente 50 km hasta llegar a

¹FEDESARROLLO. Evaluación económica de los contratos de Asociación Piedemonte y Recetor. [En línea] [01 Septiembre de 2015] disponible en: <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/1348/1/Repor_Agosto_1996_Fedesarrollo.pdf>

Labranzagrande, desde allí se sigue al sureste la vía hacia Paz de Ariporo a 79 km aproximadamente. A continuación se toma la ruta 65 que conduce a Yopal a los tres kilómetros aproximadamente. Finalmente se toma hacia el noreste la vía hacia el Corregimiento El Morro el cual se ubica a 12 kilómetros aproximadamente de Yopal.

En la **Figura 1** presenta la localización del Campo Floreña y las vías de acceso ya mencionadas.

Figura 1. Localización del Campo Floreña



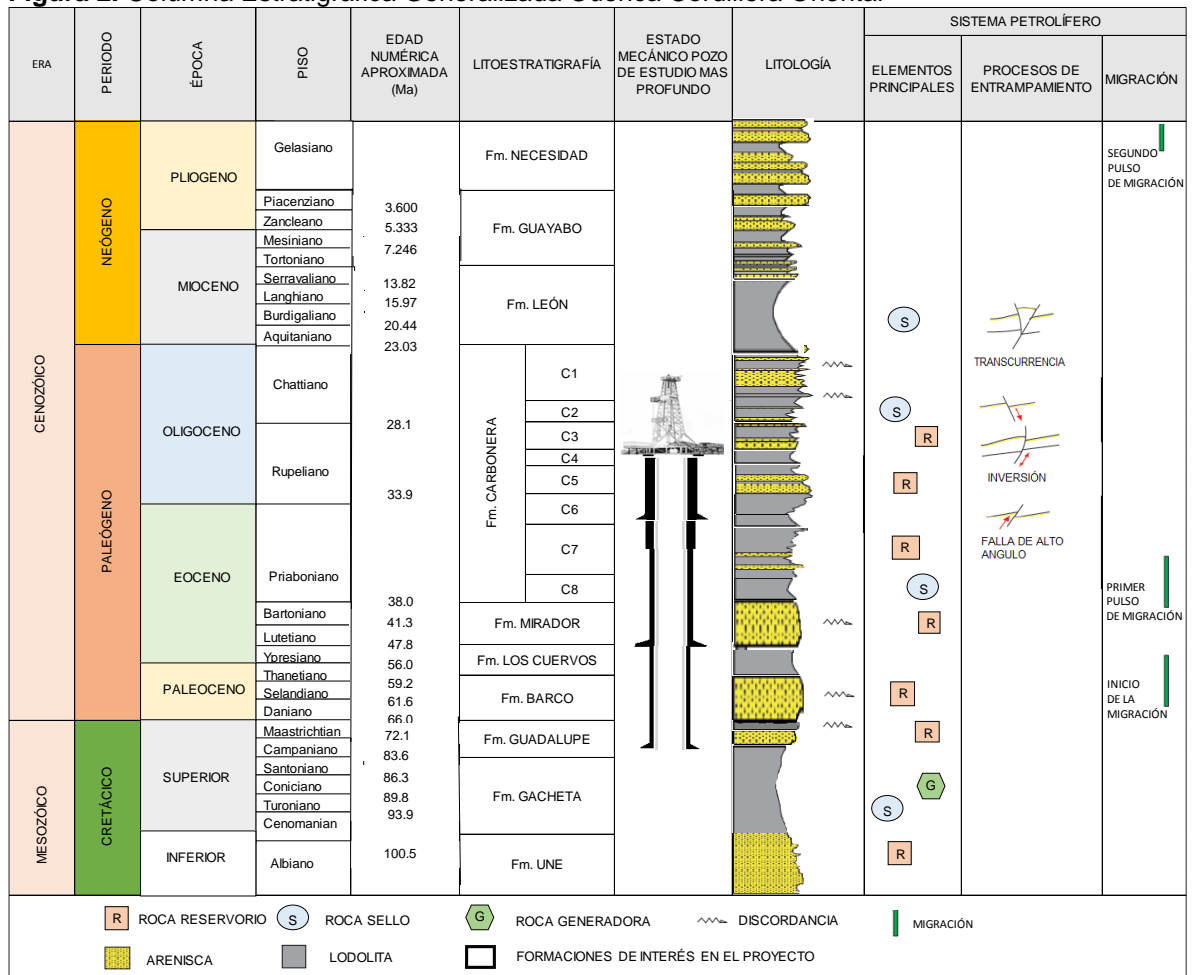
Fuente: GOOGLE MAPS. Mapa ruta Bogotá-Yopal. [en línea]. Disponible en: <https://www.google.com.co/maps/dir/Bogot%C3%A1/Yopal+-+Casanare/@5.2574748,-73.7982078,9z/data=!3m1!4b1!4m13!4m12!1m5!1m1!1s0x8e3f9bfd2da6cb29:0x239d635520a33914!2m2!1d-74.072092!2d4.7109886!1m5!1m1!1s0x8e6b0dca93add7cb:0x46dfbc4a24770cfe!2m2!1d-72.400523!2d5.348903>

1.4 MARCO GEOLÓGICO

A continuación se describe la estratigrafía, geología estructural y geología del petróleo, asociadas con el Campo Floreña.

1.4.1 Columna Estratigráfica Generalizada. La **Figura 2** corresponde a la columna estratigráfica generalizada correspondiente a la Cuenca de la Cordillera Oriental a la cual pertenece el Campo Floreña. Comprende rocas del Mesozoico y el Cenozoico. Adicionalmente se muestra el estado mecánico correspondiente al pozo de estudio más profundo, así como las formaciones de interés y los elementos y procesos asociados al sistema petrolífero del Campo.

Figura 2. Columna Estratigráfica Generalizada Cuenca Cordillera Oriental



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos. "Open Round Colombia 2010. Cordillera Oriental". Modificado por el autor.

1.4.2 Estratigrafía. A continuación se presenta una descripción general de las formaciones presentes en la Cuenca, de la más antigua a la más reciente.

1.4.2.1 Formación Une. La edad de la formación está comprendida en el cretáceo inferior entre el Albiano y el Cenomaniano tal como se indica por Julivert². Principalmente está conformada por areniscas cuarzosas con intercalación de Lutitas y de limolitas carbonosas. La topografía característica de esta formación está dada por escarpes. Se observan afloramientos de capas delgadas a gruesas con laminación cruzada de areniscas cuarzosas de grano grueso a fino. La Formación Une tiene un espesor promedio de 400 metros. Corresponde a una sedimentación de tipo estuario, sobre depósitos de origen marino. Infayace de manera concordante la Formación Gachetá y suprayace discordantemente las areniscas del periodo paleozoico correspondientes al Basamento.

1.4.2.2 Formación Gachetá. La edad de la formación está comprendida entre el Cenomaniano y el Coniciano. Está constituida por una secuencia de Lutitas de color gris a negro, con presencia ocasional de areniscas con posible composición calcárea. En general representa un depósito de lodolitas marinas, chert y fosfatos. Es considerada la roca generadora de la Cuenca. El ambiente de depositación de la Formación Gachetá es estuario de dominio mareal. El espesor máximo encontrado en la Cuenca es superior a 600 pies según lo indicado por Guerrero³. Infrayace de manera concordante la Formación Guadalupe y suprayace concordantemente la Formación Une.

1.4.2.3 Formación Guadalupe. La edad de la Formación corresponde al Campaniano según FAJARDO⁴. Representa el tercer reservorio de hidrocarburos más importante de la Cuenca. Constituye una secuencia de areniscas con intercalación ocasional de Lutitas. Se establece un ambiente de depósito transicional a marino somero. El espesor en la zona de estudio supera los 600 pies. La Formación Guadalupe infrayace de manera discordante la Formación Barco y suprayace de manera concordante la Formación Gachetá.

²JULIVERT, M et. al.. Léxico estratigráfico. Colombie: Précambrien, Paléozoïque, Mésozoïque, et intrusions d'âge mésozoïque – tertiaire. Volumen V, Fasciculo 4a. Centre National de la Recherche Scientifique, Paris. 1969

³GUERRERO, Javier. SARMIENTO, Gustavo. Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero: Implicaciones en exploración Petrolera. Geología Colombiana 20. Bogotá: UNAL, 1996. p. 3-19.

⁴FAJARDO, A. Modelo Estratigráfico Llanos y Piedemonte, Definición del modelo estratigráfico en el intervalo Cretáceo tardío a Mioceno Medio en la Cuenca de los Llanos Orientales. 2000.

1.4.2.4 Formación Barco. Su edad geológica es tentativamente el Eoceno inferior según Notestein, Hubman y Bowler⁵. Está compuesta por areniscas generalmente de color gris de grano muy fino a medio, localmente con contenido abundante de láminas micáceo-carbonáceas, lutitas y limolitas intercaladas. En la parte superior de formación es común encontrar capas delgadas de carbón. La formación Barco constituye un importante reservorio de hidrocarburos dentro del Piedemonte. Con un espesor promedio de 194 pies. Representa un ambiente de depositación fluvial y de llanura costera. Infrayace de manera concordante a la Formación Los Cuervos y suprayace discordantemente la Formación Guadalupe.

1.4.2.5 Formación Los Cuervos. La edad de la formación corresponde al Eoceno Inferior según VAN DER HAMMEN⁶. Está constituida principalmente por arcillolitas y lutitas carbonáceas de color gris oscuro con capas de carbón en la base cuyo espesor varía entre 1,6 y 8,2 pies y ocasionalmente presencia de areniscas de grano fino, también se tiene la presencia de areniscas arcillosas cuyo espesor no es superior a seis metros. Según Notestein, Hubman y Bowler⁷ el espesor de la Formación varía de 245 a 490 metros. Con base en las facies observadas el ambiente de depositación corresponde a una llanura costera supramareal. Infrayace discordantemente la Formación Mirador y suprayace concordantemente la Formación Barco.

⁵NOTESTEIN, F. HUBMAN C AND BOWLER J., Geology of the Barco Concession, 1944 , citado por DUEÑAS, Daniel. Evaluación del impacto de la potencia hidráulica de la broca en el desempeño de la perforación usando el método energía mecánica específica de perforación en el Campo Floreña. 2015. p. 35.

⁵GONZÁLEZ GUZMÁN, A. A palynological study on the upper Los Cuervos and Mirador Formations. 1967 p 129

⁶VAN DER HAMMEN, Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. 1958.

⁷NOTESTEIN, F. HUBMAN C AND BOWLER J., Geology of the Barco Concession, 1944

1.4.2.6 Formación Mirador. La edad de la arenisca de esta formación es el Eoceno Inferior según lo indicado por Notestein, Hubman y Bowler⁸. Está conformada por areniscas con granulometría variable, generalmente granulodecreciente de base a techo, compuesta por feldespato, cuarzo y glauconita. Ocasionalmente dichas areniscas se encuentran separadas por arcillolitas carbonáceas grises. Constituye el reservorio de mayor importancia de la Cuenca. Su espesor promedio en el Campo es 900 pies. Según sus características estratigráficas, la Formación Mirador puede dividirse en Mirador Inferior y Mirador Superior. Las facies encontradas en Mirador Inferior corresponden a depositación continental, mientras que las de Mirador Superior, corresponden a un ambiente transicional de bahías o estuarios. Infrayace de manera concordante la Formación Carbonera y suprayace de manera discordante la Formación Los Cuervos.

1.4.2.7 Grupo Carbonera. La edad del Grupo Carbonera es el Eoceno Tardío según Julivert⁹, sin embargo Kuyl *et al*¹⁰ señala una extensión de la edad hasta el Oligoceno según evidencias palinológicas. El Grupo Carbonera está constituido principalmente por Lutitas y arcillolitas, estratificadas con areniscas arcillosas, también tiene contenido de areniscas cuyo espesor varía entre uno y 30 metros. Según Sutton¹¹, las partes superior e inferior constituyen capas de carbón lignítico. El Grupo Carbonera tiene un espesor promedio de 500 metros. Su origen es no marino. El contacto inferior es concordante con la Formación Mirador y el contacto superior es concordante con la Formación León. Está conformado por ocho miembros operacionales denominados del C8 al C1. Los cuales, los niveles pares son transgresivos, fino granulares e importantes sellos regionales; los impares son regresivos y arenosos. El grupo Carbonera infrayace concordantemente la Formación León y suprayace concordantemente la Formación Mirador.

- **Unidad C8.** Está compuesta por una secuencia de arcillolitas de color gris claro. Tiene un espesor promedio de 500 pies. Localmente puede encontrarse pequeñas cantidades de areniscas muy finas. El contacto inferior se da de manera concordante con la Formación Mirador y superior de igual manera concordante con la Unidad C7.

⁸NOTESTEIN, F. HUBMAN C AND BOWLER J, 1944. Geology of the Barco Concession, citado por DUEÑAS, Daniel. Evaluación del impacto de la potencia hidráulica de la broca en el desempeño de la perforación usando el método energía mecánica específica de perforación en el Campo Floreña. 2015. p. 36.

⁹Julivert, M. Lexique Stratigraphique International Amérique Latine: Colombie, v. 5. 1968.

⁹ ETCHART, H., Consideraciones sobre la estratigrafía del Cenozoico Superior en el suroeste del Estado Zulia. 1977. p 339-347

¹⁰KUYL, O. P.; J. MULLER Y H. TH. WATERBOLK, 1955. The application of palynology to oil geology with reference to western Venezuela. Geol. en Mijnb., New. Ser., 17(3): 49-76.

¹¹ SUTTON, F. A., 1946. Geology of Maracaibo basin, Venezuela, Am. Assoc. Geol., Bull., 30: 1621-1741.

- **Unidad C7.** Conformada por areniscas con presencia ocasional de Lutitas y arcillolitas. Las areniscas son cuarzosas, de color gris claro. Su ambiente de depositación es marino somero, deltaico y continental.
- **Unidad C6.** Conformada por intercalaciones de Lutitas y arcillolitas, de color gris claro, gris medio y gris verdoso, con presencia ocasional de areniscas. Su espesor promedio en la Cuenca es de 400 pies. Sus límites inferior y superior son concordantes con la Unidad C7 y C5 respectivamente.
- **Unidad C5.** Consiste en una secuencia de lodolitas con areniscas poco consolidadas de tamaño de grano medio a grueso y limolitas. La entrada a esta unidad está marcada por la presencia de areniscas abrasivas.
- **Unidad C4.** Compuesta por una alternancia de limolitas, areniscas y Lutitas de color gris claro a gris verdoso, moderadamente consolidadas a bien consolidadas. Su espesor promedio es 400 pies.
- **Unidad C3.** Hacia la base está compuesta por lodolitas grises laminadas, y lodolitas blancas macizas, con presencia ocasional de areniscas. Hacia el tope está compuesta por areniscas cuarzosas macizas, de color gris claro a gris medio, algunas veces conglomeraticas. En los intervalos lodosos laminados es común la presencia de restos de plantas y material carbonoso. Las areniscas de esta unidad son de grano medio a grueso, generalmente mal seleccionadas. Pertenece al Mioceno Temprano.
- **Unidad C2.** Constituida por una sucesión homogénea de lodolitas laminadas grises y lodolitas macizas blancas. La presencia de capas de arena delgadas se incrementa hacia el tope. En los intervalos laminados existe presencia de restos de plantas y material carbonoso. Limita por la parte superior de manera discordante con la Unidad C1.
- **Unidad C1.** Presenta sucesiones granodecipientes con areniscas conglomeraticas y conglomerados arenosos cuarzosos hacia la base, gradando a areniscas cuarzosas de grano fino a muy fino. Ocasionalmente existe presencia de lodolitas laminadas grises. El ambiente de depositación de esta unidad es de origen Fluvial. La unidad C1 infrayace de manera concordante a la Formación León.

1.4.2.8 Formación León. La Formación León tiene una edad del Oligoceno, según VAN DER HAMMEN¹². Según Notestein, Hubman y Bowler¹³ constituye una secuencia homogénea de lodolitas laminadas verde claras, hacia la base gris verdosas y hacia el tope verde amarillentas. En los intervalos laminados es común la presencia de bioturbaciones verticales y horizontales y algunos restos de material carbonoso. En los intervalos macizos es común la presencia de nódulos de siderita. Adicionalmente se tiene presencia de minerales pesados tales como zircón-Tumalina-rutilo. Según Notestein, Hubman y Bowler¹⁴ la profundidad de la Formación oscila entre 510 y 785 metros. Según las facies encontradas, la depositación está dada por un ambiente marino somero. La Formación León infrayace concordantemente la Formación Guayabo y suprayace concordantemente la Formación Carbonera.

1.4.2.9 Formación Guayabo. La Formación pertenece al Oligoceno superior según lo indicado por VAN DER HAMMEN¹⁵. Corresponde a una alternancia de arcillolitas muy solubles con areniscas mal seleccionadas, de grano fino a muy grueso. La parte basal se encuentra constituida por conglomerados gruesos y areniscas ásperas, el resto del grupo se compone de arcillolitas grises a rojas, arcillolitas arenosas y arenas arcillosas. Las lodolitas son generalmente bioturbadas, carbonáceas y contienen pequeñas capas de lignito. En la parte superior se tiene una asociación de minerales pesados conformados por granate-epidota-esfeno. Ocasionalmente se tiene la presencia de lentes de carbón. La sedimentación de la Formación Guayabo es de carácter continental, con alguna influencia marina, se presentan dunas y llanuras de inundación. Infrayace discordantemente la Formación Necesidad y suprayace concordantemente la Formación León.

¹²VAN DER HAMMEN. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. 1958

¹³NOTESTEIN, F. HUBMAN C AND BOWLER J. Geology of the Barco Concession. 1944. citado por DUEÑAS, Daniel. Evaluación del impacto de la potencia hidráulica de la broca en el desempeño de la perforación usando el método energía mecánica específica de perforación en el Campo Floreña. 2015. p. 39.

¹⁴Íbid.

¹⁵VAN DER HAMMEN. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. 1958

1.4.2.10 Formación Necesidad. Se ubica de manera provisional en el Plioceno Superior- Pleistoceno Inferior. Según Etchart¹⁶ la formación está compuesta por una secuencia de arcillolitas gris claras a gris celeste, limolitas de color rosado amarilloroso con fuertes variaciones de espesor, ocasionalmente lentes de areniscas gruesas y conglomerados poco consolidados, con una matriz limosa de color gris a gris celeste. Tal como lo indica JULIVERT¹⁷ la formación contiene una asociación de minerales pesados a basa de ilmenita, rutilo, zircón y turmalina. El espesor es aproximadamente 50 metros. La formación Necesidad suprayace discordantemente la Formación Guayabo.

1.4.2 Geología Estructural. La Cordillera Oriental de Colombia es un cinturón orogénico divergente cuya fase principal de levantamiento ocurrió después del Mioceno Medio¹⁸ debido a la reactivación tectónica de fallas normales de cuencas del Jurásico superior y cretácico inferior, que estuvieron dadas por continuas regresiones y trasgresiones marinas, así como gran actividad tectónica y volcánica.

Debido a dichos eventos, se llevó a cabo una inversión de las fallas normales presentes, lo cual a su vez generó la formación de un grupo de fallas de cabalgamiento conformadas por la Falla Santa María, Yopal y Guaicaramo, siendo estas constituyentes de la principal estructura geológica de la Cordillera Oriental, así mismo hace parte de dicha estructura el sistema de Fallas Cusiana-Tamara. En la **Figura 3.** se observa el corte geológico del Piedemonte Llanero y los sistemas de fallas ya mencionados.

El Campo Floreña se caracteriza por su compleja geología estructural conformada principalmente por un sistema de fallas inversas producto de eventos tectónicos compresivos que dieron origen a la Cordillera Oriental, según como lo indica ARIANA¹⁹.

Asimismo según lo indicado por RAMIREZ²⁰ hace parte de la geología estructural de esta región, hacia el oeste el Sinclinal de Nazareth el cual consiste en el mayor

¹⁶ETCHART, H., Consideraciones sobre la estratigrafía del Cenozoico Superior en el suroeste del Estado Zulia. 1977. p 339-347.

¹⁷Julivert, M. Lexique Stratigraphique International Amérique Latine: Colombie, v. 5. 1968.

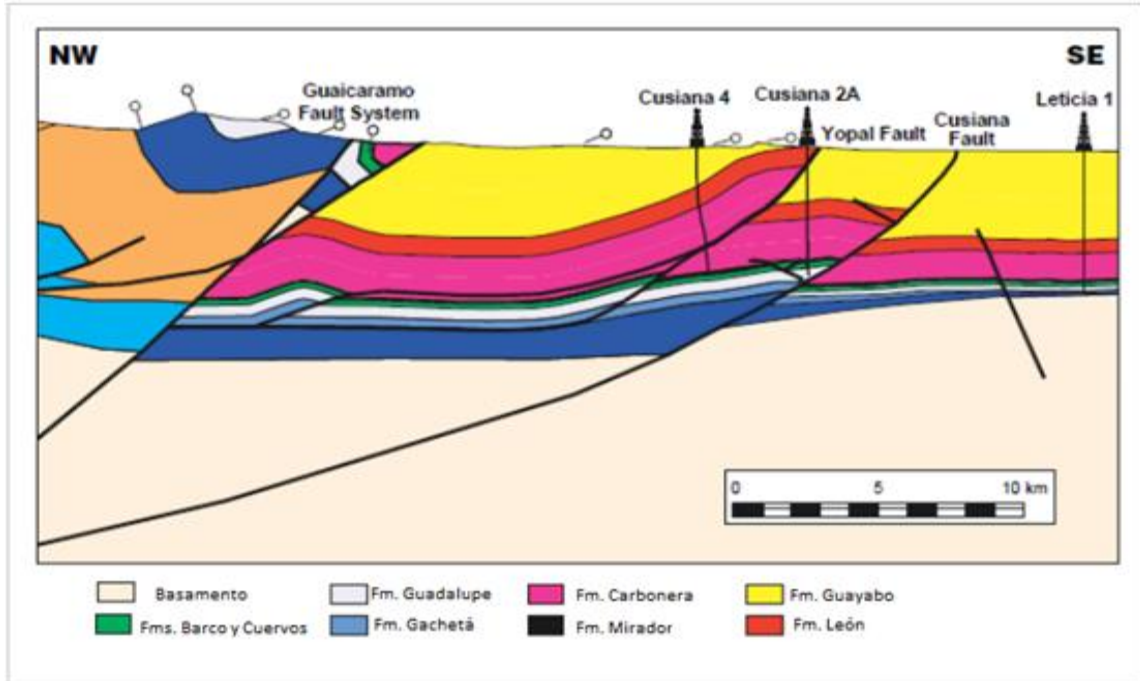
¹⁸VAN DER HAMMEN. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. 1958.

¹⁹ARIANA, Cartografía geológica de las áreas Floreña y Pauto, Bloque Piedemonte, Departamento de Casanare. Bogotá, Colombia, 2007. p. 45.

²⁰RAMIREZ, Luis. Determinación de los patrones de fracturamiento de la Formación Mirador en el anticlinal del Guavio, mediante el análisis de imágenes de pozo, implicaciones en la permeabilidad y productividad del reservorio. Bogotá, 2011. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. Departamento de Geociencias.

depocentro del área, cuyas rocas aflorantes están cubiertas discordantemente por depósitos de abanicos aluviales del cuaternario. Hacia la parte central se encuentra el anticlinal del Guavio con exposición de rocas del Oligoceno de la Formación Carbonera, el sinclinal de Río Amarillo y el anticlinal tumbado del Silbadero.

Figura 3. Corte geológico del Piedemonte Llanero en el área del Campo.



Fuente: PIRAQUIVE, Alejandro. Modelamiento estructural basado en un análisis de deformaciones en el frente del Piedemonte Llanero Cordillera Oriental de Colombia. 2011. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4240/1/194675.2011.pdf>

1.4.3 Geología del Petróleo. A continuación se presenta una descripción de las características geológicas relacionadas con la generación, migración y entrapamiento de hidrocarburos en la Cuenca, así como de los parámetros importantes dentro del sistema petrolífero asociado.

1.4.3.1 Roca generadora. La Formación Gachetá se identifica como la principal fuente generadora de la Cuenca de la cordillera oriental. Cuenta con un valor de Carbono Total Orgánico (TOC por sus siglas en inglés) entre 1% y 3% y kerógeno tipo II rico en hidrógeno y kerógeno tipo III con capacidad de generar aceite y gas. Los fluidos generados presentan un valor promedio de reflectancia de vitrinita de 0,49%, lo cual los clasifica como marginalmente maduros.

1.4.3.2 Roca reservorio. En el caso del Campo Floreña las formaciones correspondientes a los reservorios son Mirador con permeabilidad entre 1-10 mD, Barco cuya permeabilidad es menor a 10 mD y Guadalupe con permeabilidad inferior a 10 mD. Las porosidades de dichas formaciones oscilan entre 15% y 20%. Según la columna estratigráfica generalizada citada previamente en la cuenca los principales reservorios de la Cuenca son las areniscas de la Formación Carbonera, la Formación Mirador, Barco y Guadalupe.

1.4.3.3 Roca sello. Corresponde principalmente a arcillas originadas en ambientes marinos y costeros. Dentro de la Formación Carbonera en las unidades arcillosas (C2, C4, C6) las cuales actúan como sellos locales de las unidades arenosas (C1, C3, C5 y C7) por su parte la unidad C8 actúa como sello de la Formación Mirador. La Formación Los Cuervos corresponde al sello de la Formación Barco. En cuanto a la Formación Guadalupe, su sección lodolítica hace de sello para la unidad de areniscas en la misma.

1.4.3.4 Migración. La migración de hidrocarburo desde la roca generadora hacia las diferentes formaciones reservorio, se ha dado en dos pulsos, de los cuales el primero se dio durante el Cretácico tardío en el cual el petróleo depositado en la parte norte a la parte central de la Cuenca de la Cordillera Oriental y el segundo se dio desde el Mioceno a la actualidad en el cual migra el petróleo desde la parte central de la Cordillera Oriental hacia las partes marginales. El proceso de migración en esta zona se dio a partir del periodo Paleógeno Tardío hasta el inicio del levantamiento de la Cordillera Oriental.

1.4.3.5 Trampas. La cuenca cuenta principalmente con trampas estructurales, asociadas a fallas de cabalgamiento producto de la inversión de fallas normales preexistentes. El campo cuenta con trampas de tipo estructural asociadas a la presencia de anticlinales estrechos y alargados con flancos fallados que involucran rocas del cretáceo en su núcleo, según lo indicado por GÓMEZ²¹, así como una serie de fallas inversas y pliegues compresionales.

1.5 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO

El Campo Floreña fue descubierto en el año 1995 y en el año 1998 se declaró su comercialidad con reservas estimadas en 127 millones de barriles de hidrocarburo líquido y 316 giga pies cúbicos de gas y un área estimada de 25741 Ha. Sin embargo fue sólo hasta el año 2001 que se iniciaron operaciones de producción con los Pozos Floreña 1 y Floreña 3.

1.5.1 Método de producción. Se cuenta con una presión de yacimiento alta la cual oscila entre 5000 y 6000 psi es por esto que el Campo Floreña produce por flujo natural. La reinyección de gas a la formación es usada como método de mantenimiento de presión. A la actualidad, se mantiene dicha producción por flujo natural.

1.5.2 Tipo de fluido. El campo contiene principalmente gas con 5% de CO₂ y condensado con hidrocarburos livianos. La gravedad API aproximada es de 40°API. Según lo indicado por BELTRÁN²² los cortes de agua varían entre 1 y 60%. La principal Formación productora del Campo es la Formación Barco.

1.5.3 Número de pozos. A la fecha hacen parte del Campo Floreña 21 Pozos, de los cuales un pozo es inyector de agua, cuatro inyectores de gas y 16 pozos son productores.

1.5.4 Tiempo de producción. El tiempo de producción para el Campo es de 15 años aproximadamente teniendo en cuenta que fue declarado comercial en el año 2001.

1.5.5 Producción acumulada. A la fecha de Julio de 2015 el Campo alcanzó la producción máxima de 41000 barriles de crudo según lo indicado por ECOPETROL²³.

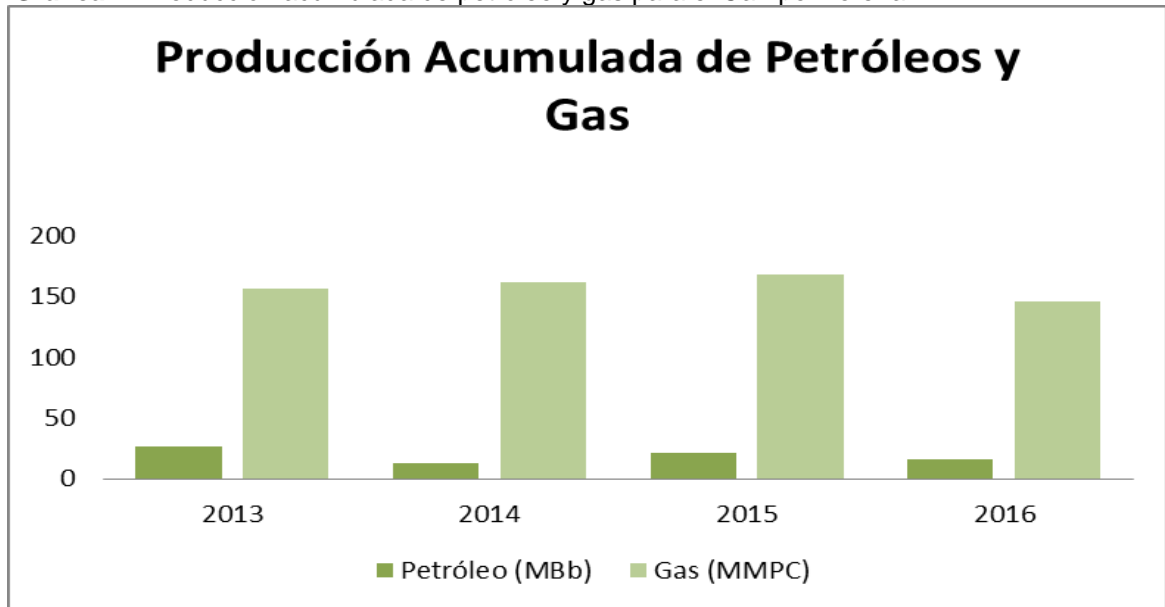
En la **Gráfica 1** se encuentra la producción de petróleo y gas en el Campo Floreña, desde el año 2013 hasta Junio de 2016.

²¹GÓMEZ, Luis. SOTELO, Clara. CÓRDOBA, Fabio. Cordillera Oriental de Colombia, expectativas para la exploración petrolera. 2000. p. 388.

²²BELTRÁN, Andrés. HERNANDEZ, Cristian. Implementación de un modelo predictivo para la determinación de tiempos operativos no planeados por fenómenos de naturaleza geo mecánica en pozos de perforados en el Piedemonte Llanero. Bogotá, 2012, p. 37. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos. Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería de Petróleos

²³ECOPETROL. Los Campos Floreña y Pauto alcanzaron record de producción de 41 mil barriles

Gráfica 1. Producción acumulada de petróleo y gas para el Campo Floreña



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Estadísticas de producción por Campo. [en línea]. Disponible en: <http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>. Elaborado por el autor.

2. GENERALIDADES DE LA PERFORACIÓN

En este capítulo se lleva a cabo una descripción de las generalidades de la perforación de pozos petroleros, de los tipos de brocas existentes para tal fin, así como de la Energía Mecánica Específica, término que es importante a lo largo del proyecto, debido a su directa relación con la eficiencia mecánica de las brocas de perforación.

2.1 PARÁMETROS DE PERFORACIÓN

2.1.1 Peso sobre la broca (WOB). (Klbf). Hace referencia al peso total transmitido por la sarta de perforación a la broca. Debe tenerse en cuenta que a medida que el desgaste de la broca aumenta, mayor será el peso al cual se debe someter.

2.1.2 Revoluciones por minuto (RPM): Hace referencia al número de rotaciones ejecutadas por la broca en fondo. Las RPM están altamente relacionadas con la velocidad a la cual gira el ensamblaje de fondo en el pozo, como efecto de la rotación aplicada en superficie y transmitida por la sarta de perforación.

2.1.3 Torque: (Klbf-ft). Hace referencia a la resistencia a la rotación por parte del ensamblaje de fondo ocasionada por la fricción con las paredes del pozo. En formaciones con alta alternancia litológica el torque varía debido a la interacción de la broca con las diferentes propiedades litológicas de las formaciones. En el caso de que la perforación se lleve a cabo con una broca tipo PDC torques superiores a los trabajados normalmente a lo largo de la perforación pueden indicar daño en la estructura de corte, mientras que torques más bajos a los esperados podrían indicar un efecto de embolamiento de la broca o estructura de corte atrapada.

- **Arrastre:** Corresponde a la resistencia axial que se opone al movimiento, causada por la interacción entre la tubería y la formación perforada, mientras se lleva a cabo el deslizamiento de la sarta de perforación. La presencia de este parámetro se ve reflejada en un incremento en el peso de la sarta, una vez esta es levantada de fondo. El arrastre se incrementa a medida que aumenta la profundidad o el alcance lateral, causando aumento del torque, dificultad en la transferencia del peso a la broca y en el control de orientación de la herramienta,

lo cual a su vez se ve reflejado en problemas en el mantenimiento de la trayectoria así como en la reducción en la velocidad de perforación²⁴.

Un incremento en el torque y en el arrastre puede ser indicador de problemas de estabilidad del pozo, puntos apretados a lo largo del mismo y limpieza deficiente del pozo.

2.1.4 Tasa de flujo (GPM): Hace referencia a la cantidad de fluido de perforación bombeado a fondo, debe tenerse en cuenta que un bajo galonaje puede traducirse en una limpieza de fondo poco efectiva y por consiguiente en un posible embolamiento de la broca en formaciones arcillosas y disminución en la rata de perforación.

2.1.5 Caída de Presión (SPP). Stand Pipe Pressure (psi). Hace referencia a la pérdida total de presión en el sistema ocasionada por el efecto de fricción del fluido. Es la suma de la pérdida de fricción en el anular, caída de presión en la sarta de perforación, caída de presión en el ensamblaje de fondo y la caída de presión a través de la broca.

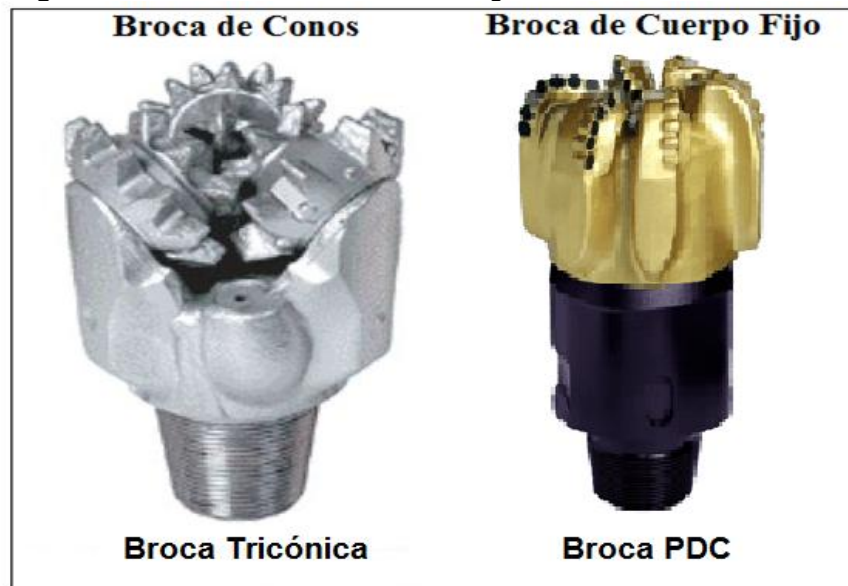
La selección del tamaño de las boquillas de la broca, permite estimar la presión así como la velocidad crítica para una limpieza adecuada del hueco.

2.2 BROCAS DE PERFORACIÓN

Una broca de perforación corresponde a la herramienta ubicada en la parte inferior de la sarta de perforación, y su función principal corresponde a la acción de corte de la formación rocosa. Las brocas convencionales se clasifican según su diseño, en brocas de conos y brocas de cuerpo fijo, tal como se observa en la **Figura 4**.

²⁴DUPLANTIS, Steven. Perforación en el modo de deslizamiento con torsión. Houston, Texas. 2016.

Figura 4. Clasificación de las brocas según su diseño



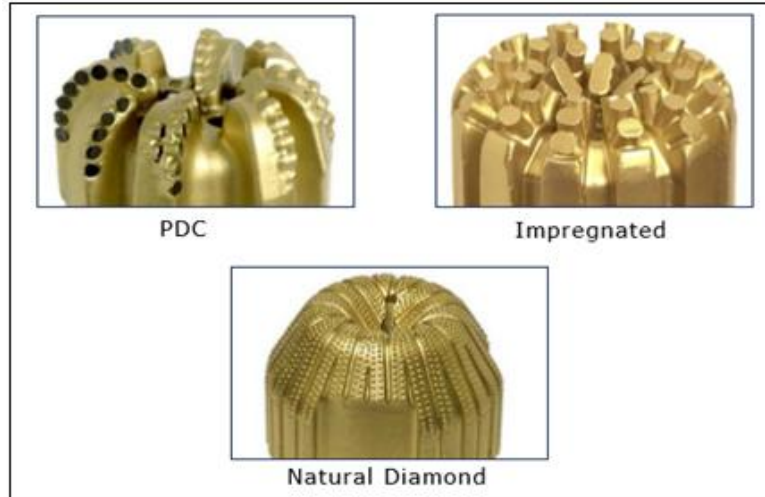
Fuente: PETROLEUM SUPPORT. "Drilling Bit Type" 2015. [en línea].
Disponible en internet: <http://petroleumsupport.com/drilling-bit-type/>.
Modificada por el autor.

2.3 TIPOS DE BROCAS CONVENCIONALES. La clasificación de las brocas de perforación se describe en la **Tabla 1**

Tabla 1. Brocas convencionales

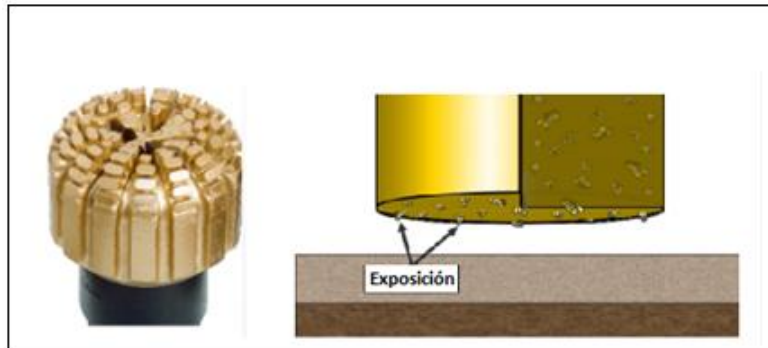
TIPOS DE BROCA CONVENCIONALES		DESCRIPCIÓN	MECANISMO DE CORTE
Brocas de cortadores fijos. (Figura 5, pág. 44)	PDC	Las brocas de diamante policristalino consisten en cortadores hechos a base de diamantes sintéticos pegados entre sí con cobalto, y estos a su vez adheridos a una superficie de carburo de tungsteno tal como se observa en la Figura 7 (pág. 45). Este proceso se lleva a cabo a condiciones de presión y temperatura altas. Dichos cortadores, van unidos al cuerpo de la broca	El corte de la formación se da por un mecanismo de cizallamiento, en el cual la dirección de carga y fractura resultante son aproximadamente paralelas. Una vez el cortador penetra la formación, la punta de este corta y remueve la formación en forma de capas, tal como se muestra en la Figura 8 (pág. 46).
	Diamante Natural	Inicialmente los cortadores usados en las brocas de cortadores fijos eran diamantes naturales. La aplicación principal de este tipo de broca, se da en formaciones con dureza media a muy alta. El tamaño y la cantidad de diamantes usados se da según el tipo de formación. De esta manera, formaciones con mayor dureza requerirán diamantes de menos tamaño y viceversa	Este tipo de broca corta la formación bajo la acción de arado, haciendo surcos o hendiduras en la formación. Este mecanismo de corte es menos eficiente que el usado por la broca PDC, por lo cual este tipo de broca debe ser empleada con turbina.
	Impregnada	Su estructura de corte consiste en diamantes sintéticos, agudos y de tamaño fino. El mecanismo usado se basa en moler la formación, lo cual las hace efectivas en formaciones duras y muy agresivas y a velocidades de rotación altas. A medida que la broca hace contacto con la formación y la capa de carburo de tungsteno se va desgastando, hace exposición de una nueva capa que incluye la red de diamantes. Un ejemplo de este proceso se ilustra en la Figura 6 (pág. 44)	
Brocas tricónicas		Como su nombre lo indica, estas brocas poseen tres conos, los cuales giran de forma independiente sobre su propio eje, triturando la formación, siendo este el principal mecanismo de corte. Un parámetro de perforación importante en este tipo de broca, son las revoluciones por minuto, las cuales no deben exceder las 300 KRPM, con el fin de evitar la pérdida de los conos. Están compuestas por tres partes principales.	En las brocas tricónicas el corte se da por trituración. De esta forma se ejerce una carga perpendicular en la roca, ocasionando una serie de fracturas que se propagan radialmente desde el punto de contacto, como se observa en la Figura 12 (pág. 49)

Figura 5. Clasificación Brocas de Cortadores Fijos



Fuente: BAKER HUGHES INC. "Drill Bit Foundation-PDC Bit ". p. 2. 2008

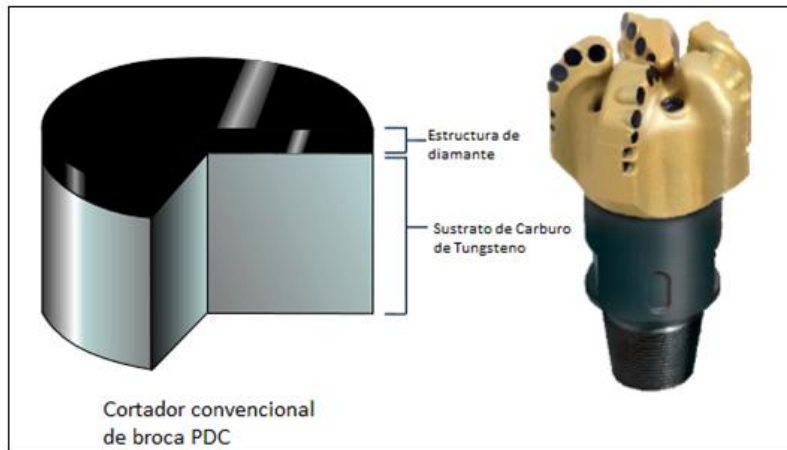
Figura 6. Mecanismo de corte de Broca Impregnada.



Fuente: BAKER HUGHES INC. "Drill Bit Foundation-PDC Bit ". 2008.
Modificada por el autor.

2.3.1 Brocas PDC. A continuación se presenta la estructura, el perfil y la clasificación IADC de una broca de Diamante Policristalino.

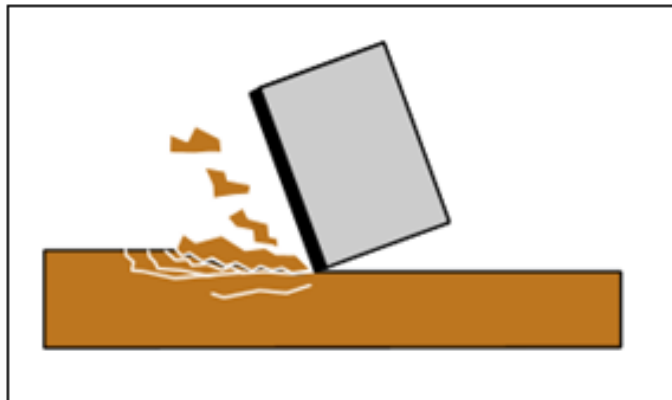
Figura 7. Cortadores de Broca PDC



Fuente: BAKER HUGHES INC. "Drill Bit Foundation-PDC Bit". p.3. 2008. Modificada por el autor.

- **Estructura de la broca PDC.** A continuación se describe de manera general los principales componentes de una broca PDC.
 - **Shank.** Contiene una conexión roscada, por medio de la cual se une la broca a la sarta de perforación. Está hecha de una aleación de acero y va roscada al cuerpo.
 - **Blank.** Corresponde al "esqueleto" del cuerpo de matriz de la broca. Está hecho de acero dúctil suave y se encuentra roscado por su parte inferior a la corona.
 - **Estructura de corte.** Está compuesta por cortadores, aletas y junk slots. Los cortadores rompen la formación y están unidos a las aletas, las cuales cumplen la función de dar soporte a los mismos, así como de formar una estructura que permita el flujo del fluido de perforación y la remoción de los cortes, (junk slots)

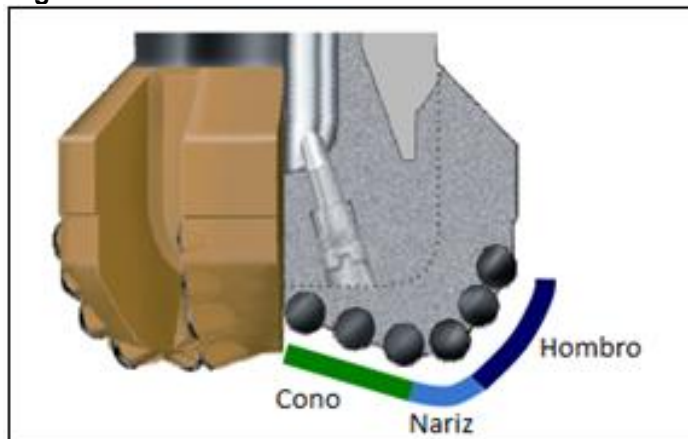
Figura 8. Mecanismo de corte de Broca PDC.



Fuente: BAKER HUGHES INC.
"Drilling Bits Foundation-PDC Bit". p. 41. 2008

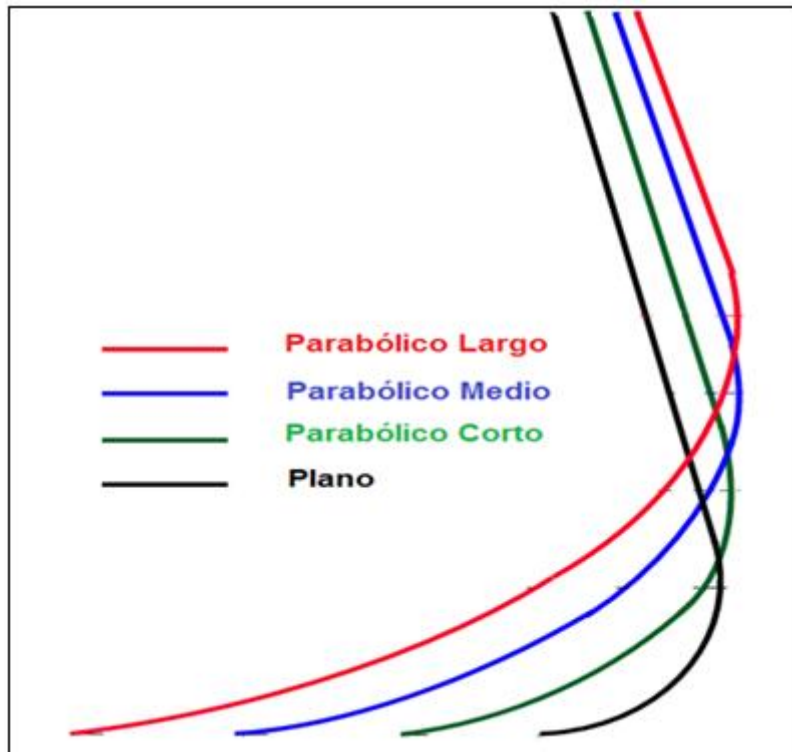
- **Perfil de broca PDC.** El perfil de una broca hace referencia a su estructura vista lateralmente. El principal objetivo del perfil de la broca es optimizar la estabilización de la misma y permitir que el daño de la estructura de corte sea uniforme. En la **Figura 9.** se observa el perfil de una broca PDC con sus respectivas secciones; hombro, nariz y cono. El perfil de la broca, es un factor importante en la determinación de la cantidad de cortadores por aleta, mientras más alta sea la longitud del perfil habrá mayor cantidad de cortadores, por consiguiente menor daño, pero la broca será menos estable. En la **Figura 10** se pueden observar los tipos de perfil para una broca.

Figura 9. Perfil de Broca PDC



Fuente: BAKER HUGHES INC.
"Drilling Bits Foundation-PDC Bit". p.53. 2008. Modificada por el autor.

Figura 10. Clasificación de los perfiles de la broca.



Fuente: RODRIGUEZ, Rogers. Smith Technologies.
Drill Bits Seminar.

2.3.1.4 Clasificación IADC para brocas de cortadores fijos. La IADC desarrolló un código con el fin de clasificar todos los tipos de brocas de cortadores fijos, según su composición y diseño. ‘Se trata de un código de cuatro caracteres (una letra y tres números) que describen siete características básicas’²⁵, el cual puede observarse en la **Tabla 2**. A diferencia de la clasificación IADC para brocas de conos, la presente clasificación no está relacionada con el tipo de formación a perforar.

²⁵ Origen del petróleo e historia de la perforación en México.

Tabla 2. Clasificación IADC para brocas de cortadores fijos

Primer Caracter		Segundo Caracter		Tercer Caracter		Cuarto Caracter		
Material del cuerpo		Densidad de cortador		Tamaño del cortador		Perfil		
Matriz (Diamante natural)	D	PDC	1.	PDC	1	>24 mm	1	Perfil plano
Matriz (PDC)	M		2		2	14-24 mm		
Acero (PDC)	S		3		3	8-14 mm		
Matriz (TSP)	T		4		4	<8		
		Diamante	6	Diamante	1	Diamante Natural	2	Perfil corto parabólico
			7		2	TSP		
			8		3	Diamante natural + TSP		
		Entre menor sea la cantidad mas ligera será la broca			4	Impregnada	3	Perfil medio parabólico
							4	Perfil largo parabólico

Fuente: Desarrollo de un nuevo sistema de clasificación de barrenas de cortador fijo de la IADC. SPE 23940. Modificado por el autor.

- **Ejemplo clasificación broca PDC.** Se tiene una broca cuya clasificación IADC es M432. De este código se infiere lo siguiente.
 - Primer Caracter. Es una broca PDC de cuerpo matriz.
 - Segundo Caracter. Dado que el número cuatro (4) corresponde al máximo valor para la clasificación de la densidad en una broca tipo PDC, se infiere que se tiene mayor cantidad de cortadores por aleta.
 - Tercer Caracter. El tamaño de los cortadores de la broca en cuestión está en un rango de 8 a 14 milímetros.
 - Cuarto Caracter. El perfil corresponde a un perfil parabólico corto.

2.3.2 Brocas tricónicas. A continuación se explica la composición básica de una broca tricónica, así como su clasificación IADC.

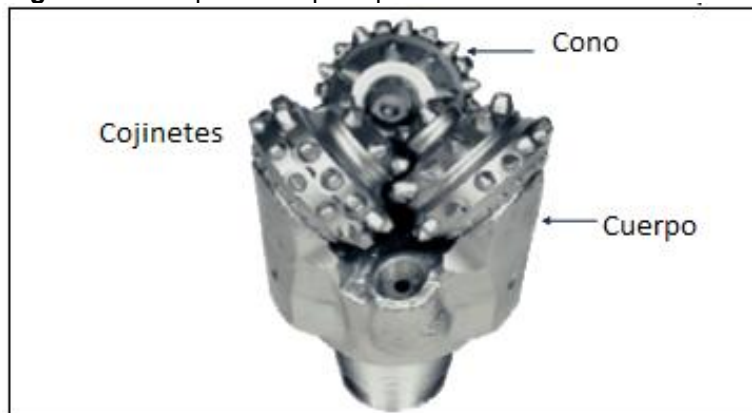
- **Conos.** Consisten en la estructura de corte de la broca. Estos se encuentran insertados en los conos. Pueden ser Insertos de Carburo de Tungsteno o Dientes de Acero.
 - **Dientes de Acero.** Son efectivos en formaciones blandas, medias y duras. Tal como lo indican González, Jara y Ramírez²⁶ las brocas de dientes de acero son las más económicas y consisten en piezas forjadas de aleación de acero con níquel, molibdeno y cromo. La forma y el tamaño de los dientes depende de la dureza de la formación, así pues entre más blanda sea la formación los dientes

²⁶GONZÁLEZ A, JARA M, RAMIREZ L. Diseño de programa de brocas requerido para perforar el Pozo direccional XD. Trabajo de grado. Ingeniero de Petróleos. Guayaquil. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. 2010.

serán más largos y puntudos y entre mayor dureza de la formación, los dientes serán más cortos y redondeados.

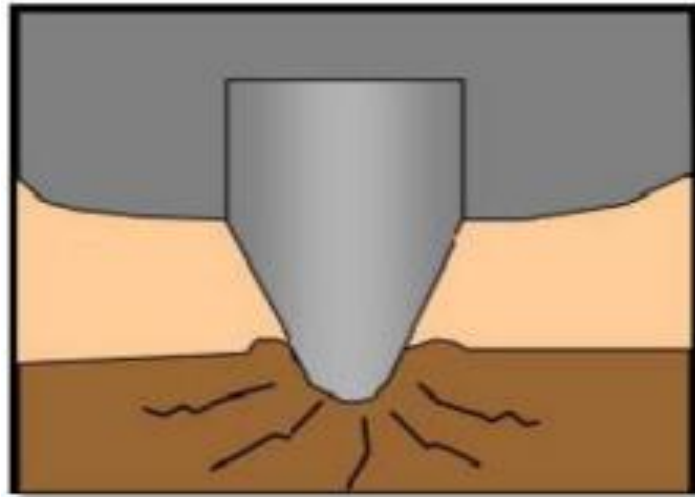
- **Insertos de Carburo de Tungsteno.** Los Insertos de Carburo de Tungsteno se introducen a presión en cavidades previamente hechas en el cono. Pueden ser usados en la perforación de formaciones blandas a muy duras. Son más resistentes que las brocas con dientes de acero.
- **Cojinetes.** Los cojinetes sostienen la estructura de corte y son los encargados de permitir el movimiento de estos alrededor del cuerpo la broca.
- **Cuerpo de broca.** Su función principal es dirigir el fluido de perforación a través de la broca para lograr una eficiente limpieza de fondo y en general de todo el BHA. Contiene las boquillas por donde sale el fluido, así como también cumple la función de asegurar los conos. En la parte superior del cuerpo de la broca se encuentra una conexión roscada la cual une la broca con la sarta de perforación. En la **Figura 11** . se observa una broca tricónica con sus principales componentes.

Figura 11. Componentes principales de Broca Tricónica



Fuente: BAKER HUGHES INC. "Drill Bits Foundation-Tricone bit".
p.4. 2008

Figura 12. Mecanismo de corte Broca Tricónica.



Fuente: DE LA TORRE GONZALES, Pablo Antonio.
"Selección de barrenas por correlación". 2008

2.3.2.1 Clasificación IADC para Brocas Tricónicas. Se trata de un sistema de clasificación de tres dígitos, usado para la clasificación de las brocas tricónicas según su composición. El primer dígito hace referencia a la estructura de corte y la formación a perforar, el segundo dígito está relacionado con la dureza de la formación, en un rango de blanda a dura y el tercer dígito identifica el sistema de rodamiento y lubricación de la broca. En la **Tabla 3** puede observarse de manera detallada dicha clasificación.

Además de clasificar el tipo de broca tricónica, el código IADC permite comparar los tipos de brocas ofrecidas por los diferentes fabricantes.

Tabla 3. Clasificación IADC para brocas tricónicas

Primer Dígito	Diseño estructura de corte según el tipo de formación	1	Dientes fresados para formación blanda
		2	Dientes fresados para formación media
		3	Dientes fresados para formación dura
		4	Dientes de inserto de carburo de tungsteno para formación muy blanda
		5	Dientes de inserto de carburo de tungsteno para formación blanda
		6	Dientes de inserto de carburo de tungsteno para formación media
		7	Dientes de inserto de carburo de tungsteno para formación dura
		8	Dientes de inserto de carburo de tungsteno para formación extra dura
Segundo Dígito	Grado de dureza de la formación en la cual se usará la broca	1	Suave
		2	Media
		3	Dura
		4	Muy Dura
Tercer Dígito	Sistema de rodamiento y lubricación de la broca	1	Con toberas para lodo y balero estándar
		2	Toberas para aire y/o lodo con dientes diseño en T y balero estándar
		3	Balero estándar con protección en el calibre
		4	Balero sellado autolubrificable
		5	Balero sellado y protección al calibre
		6	Chumacera sellada
		7	Para perforación direccional
		8	Otros

Fuente: GONZALEZ, Andrés. Diseño del programa de brocas requerido para perforar el pozo direccional XD. Tesis. Ingeniero de Petróleos. Ecuador. 2010. p 8.

- **Ejemplo clasificación broca tricónica.** Una broca con un código IADC 335 corresponde a broca tricónica con dientes de acero para formación dura. La dureza de la formación a perforar varía de media a dura. Los rodamientos están equipados con sello y se tiene protección al calibre.

2.3.2.2. Calificación IADC para brocas tricónicas. La calificación de las brocas está basada en el grado de pérdida de material relacionado con el daño de la broca en general, una vez haya sido corrida. Dicha clasificación permite identificar los parámetros operativos que pueden ser alterados para mejorar la eficiencia en la perforación, así como para prolongar la vida útil de la broca. De la misma manera, permite la adecuada selección del plan de brocas.

Para las brocas tricónicas, la IADC desarrolló una tabla con ocho casillas, las cuales incluyen características referentes al daño de la estructura de corte así como la razón por la cual la broca fue retirada de fondo. En el **Cuadro 1.** se observa un ejemplo de la forma de tabular dichos datos.

Cuadro 1. Cuadro estándar de la IADC para clasificar el desgaste de una broca.

ESTRUCTURA DE CORTE							
Filas Internas	Filas Externas	Características de desgaste	Ubicación del desgaste	Cojinete s/Sellos	Calibre	Otras características de desgaste	Razón de la salida de la broca
1	2	WT	4	A	I	NO	LOG

Fuente: NGUYEN, Tuan. Introduction of the New Kymera Hybrid Bit.

- **Columna 1 y 2.** Indican el daño de los dientes en las filas internas o externas respectivamente, con un dígito entre cero y ocho, en donde cero es la condición sin uso, y ocho es desgaste completo.
- **Columna 3.** Corresponde a un código de dos letras según el tipo de desgaste. Dichos códigos pueden observarse en el **Cuadro 2.**

Cuadro 2. Características del desgaste de la broca

CARACTERÍSTICA DE DESGASTE							
BC	Cono roto*	LT	Dientes perdidos	CT	Dientes agrietados	SD	Daño del faldón
BT	Diente roto	OC	Desgaste excéntrico	ER	Erosión	SS	Autoafilamiento
BU	Broca embolada	PB	Pinched Bit	FC	Desgaste plano	TR	Tracking
CC	Cono agrietado*	PN	Boquilla tapada	LC	Cono perdido*	WO	Broca lavada
CD	Cono arrastrado*	RG	Calibre redondeado	JD	Daño por chatarra	WT	Dientes gastados
CI	Interferencia de conos	RR	Puede ser corrida nuevamente	HC	Agrietamiento térmico	*	Se debe escribir el número de cono en la columna 4
CR	Nucleada	RO	Anillamiento	LN	Boquilla perdida	NO	Sin otro desgaste

Fuente: NGUYEN, Tuan. Introduction of the New Kymera Hybrid Bit. Ingeniero de petróleos con especialización en perforación. Stavanger. Universidad de Stavanger. Facultad de Ciencia y Tecnología. 2012.

- **Columna 4.** Hace referencia a la zona específica del desgaste reportado en la columna 3. Existe una letra específica para cada ubicación. Cuando se califica con la letra C el desgaste se ubica en el cono de la broca de cortadores fijos. (Ver **Cuadro 3**)

Cuadro 3. Ubicación del desgaste.

UBICACIÓN DEL DESGASTE			
N	Hilera de la nariz	1	Cono 1
M	Hilera media	2	Cono 2
G	Hilera del calibre	3	Cono 3
A	Todas las hileras		

Fuente: NGUYEN, Tuan. Introduction of the New Kymera Hybrid Bit. Ingeniero de petróleos con especialización en perforación. Stavanger. Universidad de Stavanger. Facultad de Ciencia y Tecnología. 2012.

Se debe tener en cuenta que el cono número uno, corresponde a aquel cuyo diente o inserto se encuentre más cercano al centro de la broca. A partir de este se enumera el cono dos y tres según el sentido de las manecillas del reloj.

- **Columna 5.** Indica la condición de los cojinetes de la broca. Para los cojinetes no sellados se usa una escala de cero (0) a ocho (8) siendo cero el cojinete nuevo y 8 completamente desgastado. Por su parte para los cojinetes sellados se usa la letra E cuando el sello es efectivo, F cuando el sello falla y N cuando no es apta su calificación. Cuando se califica una broca PDC debido a que esta no posee rodamientos, se marca esta casilla con una X.
- **Columna 6.** Hace referencia al calibre de la broca. Para indicar el calibre de la broca se usan dos letras, “I” para indicar que la broca se encuentra en calibre (Ingage) y “O” que hace referencia a reducción significativa del calibre de la broca (Outgage). Dicha disminución de calibre se expresa en términos de 1/16”, de esta manera un calibre de 1 indica que la broca tiene 1/16” menos de diámetro, y un calibre de 2 indica que tiene 2/16” menos de diámetro, es decir 1/8”.
- **Columna 7.** Se usa para reportar cualquier otra característica de desgaste y está relacionada con el **Cuadro 2**.
- **Columna 8.** Indica la razón por la cual se retira la broca. Los códigos según la razón se encuentran en el **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Razones por las cuales se termina la corrida de la broca.

RAZÓN PARA TERMINAR LA CORRIDA DE LA BROCA			
BHA	Cambio de ensamblaje de fondo	DP	Perforar tapón
DMF	Falla de motor de fondo	FM	Cambio de formación
DSF	Falla de la sarta de perforación	HP	Problemas del hueco
DST	Prueba de la sarta de perforación	HR	Horas de perforación
DTF	Falla de herramienta de fondo	PP	Presión de la bomba
LOG	Corrida de registros	PR	Rata de penetración
LIH	Pérdida en el hueco	TD	Profundidad total/Profundidad de casing
RIG	Reparación del taladro	TQ	Torque
CM	Condición de lodo	TW	Desconexión de la sarta
CP	Punto de core	WC	Condición del clima
WO	Lavado de la sarta		

Fuente: NGUYEN, Tuan. Introduction of the New Kymera Hybrid Bit. Ingeniero de petróleos con especialización en perforación. Stavanger. Universidad de Stavanger. Facultad de Ciencia y Tecnología. 2012.

2.4 BROCAS HÍBRIDAS

Las brocas híbridas corresponden a una tecnología reciente, cuyo desarrollo comienza en 2006 en Estados Unidos y es corrida en Colombia en el año 2012, la cual consiste en la unión de distintos tipos de brocas convencionales con el fin de mejorar el desempeño en la perforación de pozos. En este caso, se estudia el comportamiento de una broca que integra el mecanismo de corte de una broca PDC y el mecanismo de corte de una broca tricónica, la estructura de la misma está representada en la **Figura 13**.

Esta broca combina la perforación rápida y agresiva de la broca PDC y el bajo torque de la broca tricónica. La estructura de corte de la PDC es la responsable de remover roca del fondo, por su parte los conos únicamente cortan la sección ocupada por el hombro y la nariz de la broca, es decir la parte lateral del pozo. La broca de menor tamaño está compuesta por dos conos y dos aletas y es diseñada para la perforación de secciones de 8 ½ pulgadas, mientras que la de mayor tamaño está compuesta por tres conos y tres aletas y es diseñada para la perforación de secciones de 12 ¼ pulgadas.

Figura 13. Broca híbrida



Fuente: DRILLING CONTRACTOR.
"Drilling & Completion Tech Digest".
2011

Entre sus principales beneficios se encuentran un mejor control direccional, disminuyendo el torque total entre tres y cuatro veces, así como las fluctuaciones del mismo y la reducción de vibraciones. También se logra una perforación más rápida y mayor durabilidad de la broca en formaciones difíciles, así como en zonas de transición litológica y un incremento de la ROP en formaciones duras, usualmente perforadas por las brocas de conos.

Tal como lo indica BAKER HUGHES²⁷ el sistema de perforación híbrido está diseñado para resolver retos relacionados con limitada velocidad de penetración (ROP), formaciones intercaladas en las cuales las fluctuaciones de torque pueden causar fallas prematuras y aplicaciones con motor y/o direccionales.

La ~~¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.~~ representa el rango de formaciones que la broca híbrida está en capacidad de perforar, de esta manera se observa que puede ser usada eficientemente en formaciones cuyo porcentaje de cuarzo esté alrededor de un 50% y cuyo esfuerzo de roca alrededor de 20 KPSI. Asimismo se observa que la broca híbrida no está en condiciones de operar en formaciones en las cuales es usada la broca impregnada.

²⁷NGUYEN, Don Tuan. Drill Bits Technology – Introduction of The New Kymera Hybrid Drill Bit. Stavanger, 2012. Tesis de maestría (Ingeniero de petróleo con especialización en perforación). Universidad de Stavanger. Facultad de ciencias y tecnología. Departamento de ingeniería de petróleo.

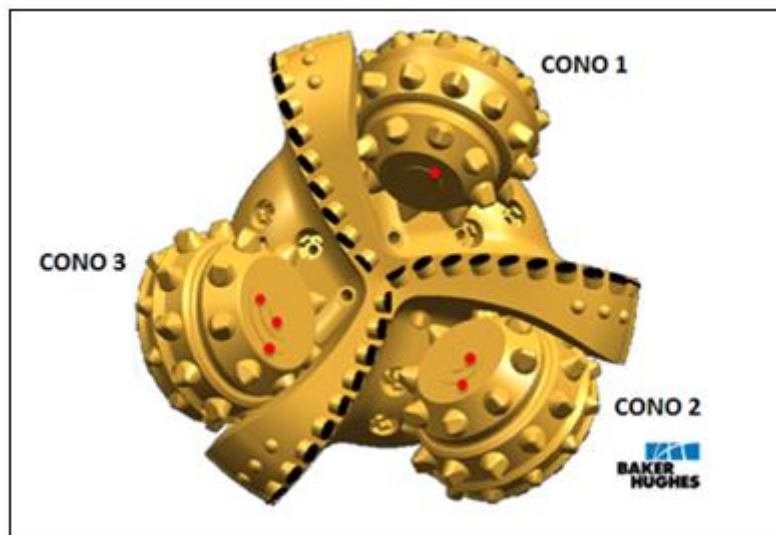
Figura 14. Aplicación broca híbrida



Fuente: BAKER HUGHES INC. Student Guide. Kymera Tech. 2011

2.4.1 Calificación de brocas híbridas. El sistema de clasificación resulta similar al de la broca PDC y la broca tricónica de manera independiente, teniendo en cuenta nuevamente la numeración de los conos y las aletas, como se muestra en la **Figura 15**.

Figura 15. Numeración de conos en broca híbrida



Fuente: BAKER HUGHES INC. Student Guide. Kymera Tech. 2011

De esta manera y tal como lo indica BAKER HUGHES²⁸ se debe calificar la broca tres veces, una calificación para PDC, una calificación para tricónica y una calificación general. La calificación general, se hace siguiendo los pasos enunciados a continuación.

- Para el interior y el exterior se debe sacar un promedio entre la calificación para PDC y la calificación para la tricónica, según la consideración del operador.
- En la casilla de característica de desgaste se debe colocar la característica de mayor relevancia entre PDC y tricónica.
- En ubicación se debe colocar el lugar en donde se ubicó la característica del numeral anterior.
- En efectividad de los sellos, colocar el estado del sello de los conos.
- El calibre se califica normalmente.
- En la segunda característica de desgaste se califica la estructura de corte que no se calificó en la primera.
- En razón de retiro de broca, se califica normalmente.

2.4.1.1 Ejemplo calificación de una broca híbrida. A continuación se presenta la

Tabla 4 como ejemplo del paso a paso anterior referente a la calificación de una broca híbrida una vez retirada de fondo. Así pues, se observa inicialmente la calificación de la parte PDC de la broca, seguida de la calificación de la parte de conos y finalmente una calificación general de salida para la broca híbrida.

Tabla 4. Ejemplo de calificación de broca híbrida.

Calificación de salida híbrida (PDC)							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
2	2	BT	N	X	1	NO	RIG
Calificación de salida híbrida (TRICÓNICA)							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
1	1	WT	N	E	1	NO	RIG
Calificación de salida general							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
2	2	BT	N	E	1	NO	RIG

²⁸BAKER HUGHES. Reporte final corrida de broca, Calificación broca Híbrida. 2014

2.5 ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA

La Energía Mecánica Específica (MSE por sus siglas en inglés), resulta importante en la evaluación de la eficiencia mecánica de la broca, razón por la cual se describe este concepto de manera general.

Según Teale²⁹ la energía mecánica específica está definida como la cantidad de energía requerida para remover una unidad de volumen de roca. Basado en la definición básica de energía específica indicada en la **Ecuación 1**, Teale³⁰ derivó la ecuación general de la energía mecánica específica, indicada en la **Ecuación 2**.

Ecuación 1. Energía Específica

$$SE = \frac{\text{Input Energy}}{\text{Output ROP}}$$

Fuente: MOHAN, Kshitij "Tracking Drilling Efficiency Using Hydro-Mechanical Specific Energy". SPE 119421

Ecuación 2. Energía Mecánica Específica

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{120\pi NT}{A_b ROP}$$

Fuente: PESSIER, R.C. "Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction". SPE 24584.

Donde:

SE: Energía específica.

MSE: Energía mecánica específica, psi.

WOB= Peso sobre la broca, lbf.

Ab= Área de la broca, in².

N= Velocidad de rotación, rpm.

T= Torque, lbf-ft.

ROP= Rata de penetración, ft/hr.

²⁹. TEALE, R. The concept of specific energy in rock drilling. Citado por PESSIER, R.C. "Quantifying Common Drilling Problems with Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction". SPE 24584. 1992. p.1

³⁰. *Ibid.*

3. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN DE LOS POZOS DE ESTUDIO CON BROCA PDC Y BROCA HÍBRIDA

En este capítulo se realiza la descripción y análisis de los resultados de la perforación en los pozos L1 en la Formación Mirador y L2 en la Formación Los Cuervos, con el uso de broca PDC y broca híbrida. El estudio se divide en tres intervalos para el Pozo L1, de los cuales dos fueron perforados con broca PDC y uno con broca híbrida. En cuanto al Pozo L2, este se divide en dos intervalos de estudio, de los cuales uno se perforó con broca PDC y otro con broca híbrida. En la **Tabla 5** se observa las especificaciones de cada pozo de estudio, tal como se observa en dicha tabla para efectos del proyecto se hablara de intervalos A, B, C, D y E según sea el caso. La sección de estudio correspondiente para los dos pozos es la sección 8 ½ pulgadas.

En la **Tabla 6** se observan las condiciones de operación así como las especificaciones de las brocas usadas en los intervalos de estudio del Pozo L1. Las calificaciones de salida para dichas brocas se presentan en la **Tabla 7**, **Tabla 8** y **Tabla 9**, para los intervalos A, B y C respectivamente.

En cuanto al Pozo L2 se presentan las condiciones de operación y las especificaciones de las brocas usadas en los intervalos D y E en la **Tabla 10** y las calificaciones de salida para dichas brocas se encuentran en la **Tabla 11** y **Tabla 12**.

Tabla 5. Especificaciones para cada Pozo de estudio

POZO L1	FM. MIRADOR	Intervalo A	18094'-18179'	BROCA HÍBRIDA
		Intervalo B	18179'-18264'	BROCA PDC
		Intervalo C	18264'-18437'	BROCA PDC
POZO L2	FM. LOS CUERVOS	Intervalo D	11520'-12445'	BROCA HÍBRIDA
		Intervalo E	12445'-13005'	BROCA PDC

Así mismo, se presentan en el **Cuadro 5** los parámetros de operación respecto a la profundidad (MD) para los intervalos de interés de los Pozos L1 y en el **Cuadro 6**, **Cuadro 7** y **Cuadro 8** la relación WOB-ROP y RPM-ROP para los intervalos A, B y C respectivamente.

Para el Pozo L2 en el **Cuadro 9** se presentan los parámetros de operación respecto a la profundidad y en el **Cuadro 10** y **Cuadro 11** la relación WOB-ROP y RPM-ROP para los intervalos D y E respectivamente.

Las columnas litológicas generalizadas correspondientes a cada intervalo de estudio tanto en el Pozo L1 como en el Pozo L2 se encuentran en el **Cuadro 12**.

Tabla 6. Especificaciones de las brocas de estudio y condiciones de operación en el Pozo L1.

Intervalo de estudio	Broca	Diámetro	Boquillas	Profundidad (pies)		Pies perforados	ROP (ft/h)	Tiempo Efectivo (h)	Formación Perforada
				Inicial	Final				
A	HÍBRIDA	8,5"	2x14/32" - 2x16/32"	18094,05	18179	85	2,5	33,5	Mirador
B	PDC	8,5"	5x13/32" - 3x10/32"	18179,05	18264	85	2,2	39,5	Mirador
C	PDC	8,5"	4x12/32" - 4x14/32"	18264,55	18437	172,5	2,8	60,7	Mirador

Tabla 7. Calificación de la broca híbrida usada para perforar el intervalo A (18094-18179 pies) en el Pozo L1.

Calificación de salida general							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
5	7	WT	G	E	I	BT	PR
Calificación de salida híbrida (PDC)							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
5	3	CR	C	X	I	BT	PR
Calificación de salida híbrida (TRICÓNICA)							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
5	7	WT	G	E	I	NO	PR

Fuente: BAKER HUGHES, Desempeño de la broca híbrida 8 ½". Intervalo de 18094-18179 pies en el Pozo L1. Bogotá. Modificado por el autor.

Tabla 8. Calificación de la broca PDC usada para la perforación del intervalo B (18179-18264 pies) en el Pozo L1

Calificación de salida							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
6	8	RO	G	X	I	BT	PP

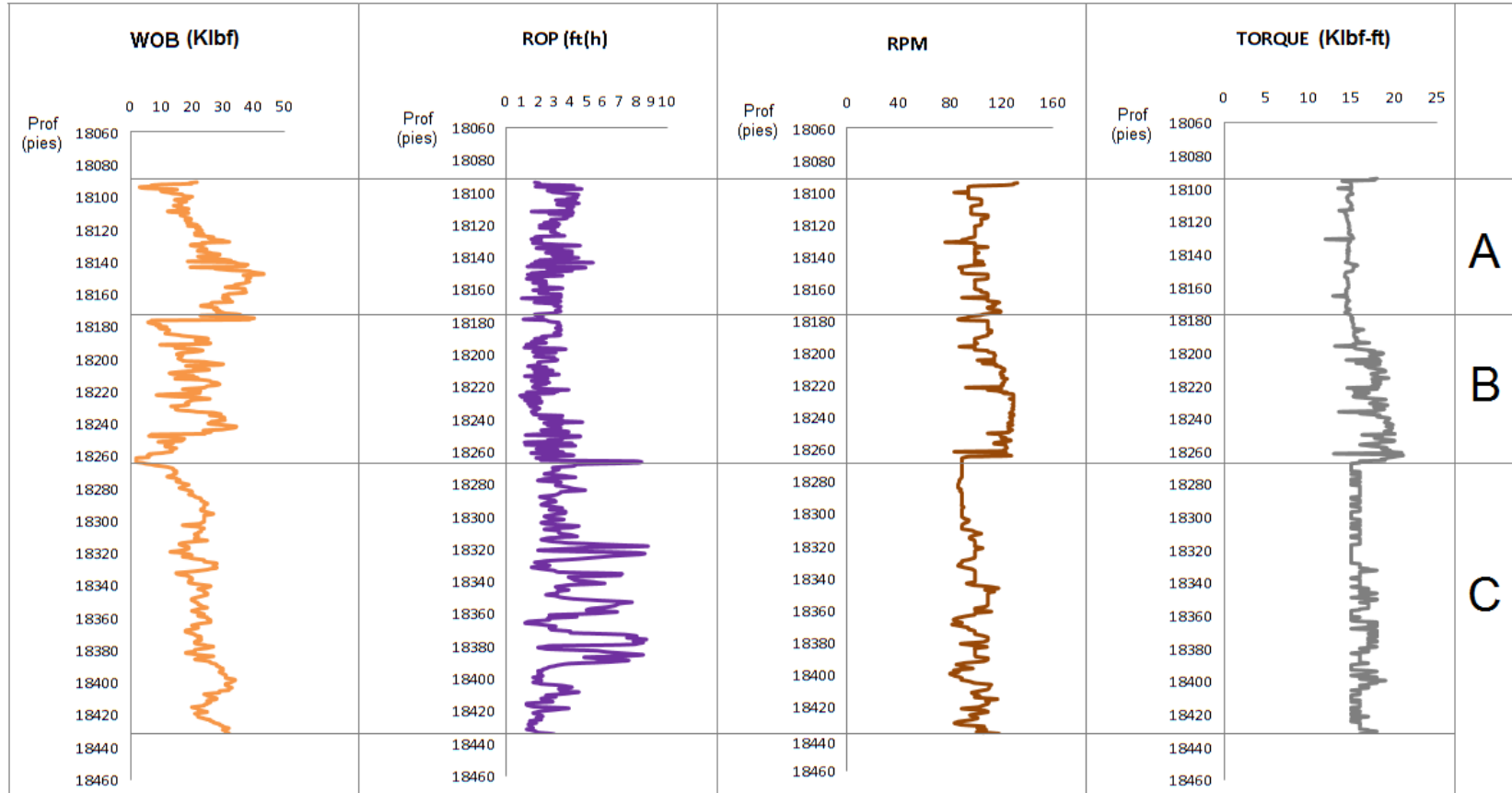
Fuente: BAKER HUGHES, Desempeño de la broca PDC 8 ½". Intervalo 18179-18264 pies en el Pozo L1. Bogotá. Modificado por el autor.

Tabla 9. Calificación de la broca PDC usada para la perforación del intervalo C (18264–18438 pies) en el Pozo L1

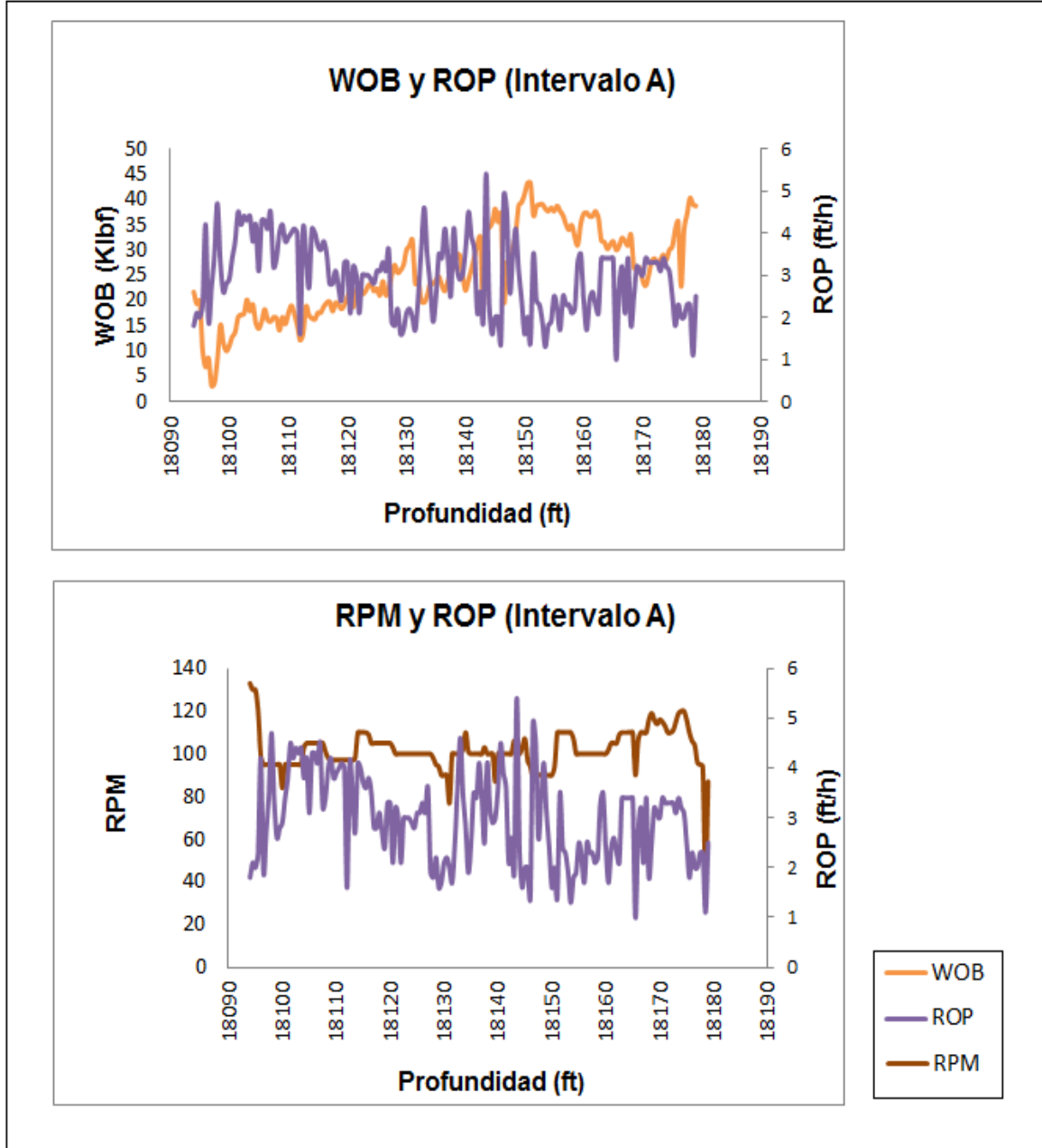
Calificación de salida							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
4	8	RO	A	X	I	LT	PP

Fuente: BAKER HUGHES, Desempeño de la broca PDC 8 ½". Intervalo 18264–18438 pies en el Pozo L1. Bogotá. Modificado por el autor.

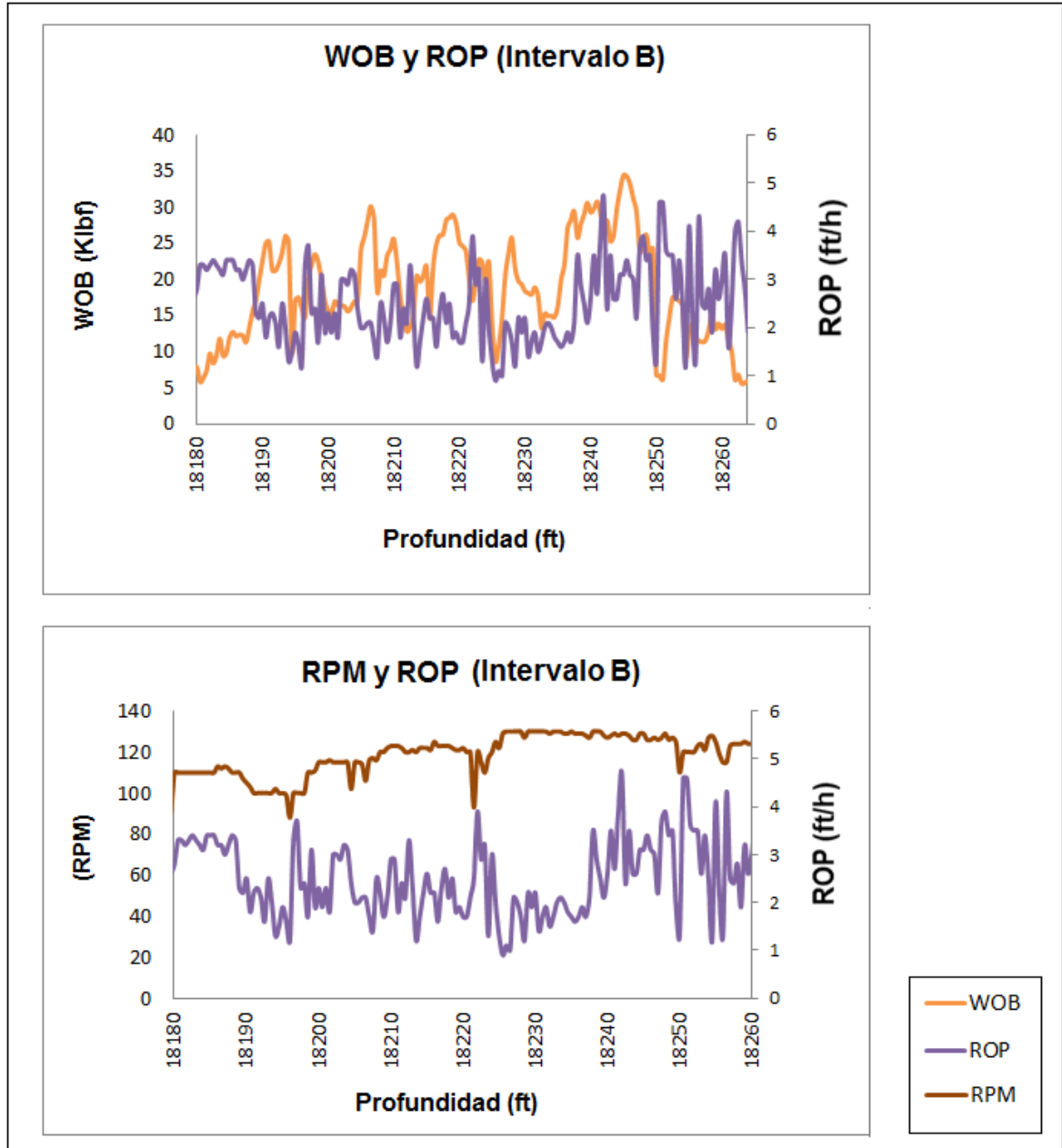
Cuadro 5. Parámetros de operación en los intervalos de estudio en el Pozo L1.



Cuadro 6. Gráficas WOB-ROP y RPM-ROP vs Profundidad en el intervalo A en el Pozo L1



Cuadro 7. Gráficas WOB-ROP y RPM-ROP vs Profundidad en el intervalo B en el Pozo L1



Cuadro 8. Gráficas WOB-ROP y RPM-ROP vs Profundidad en el intervalo C en el Pozo L1

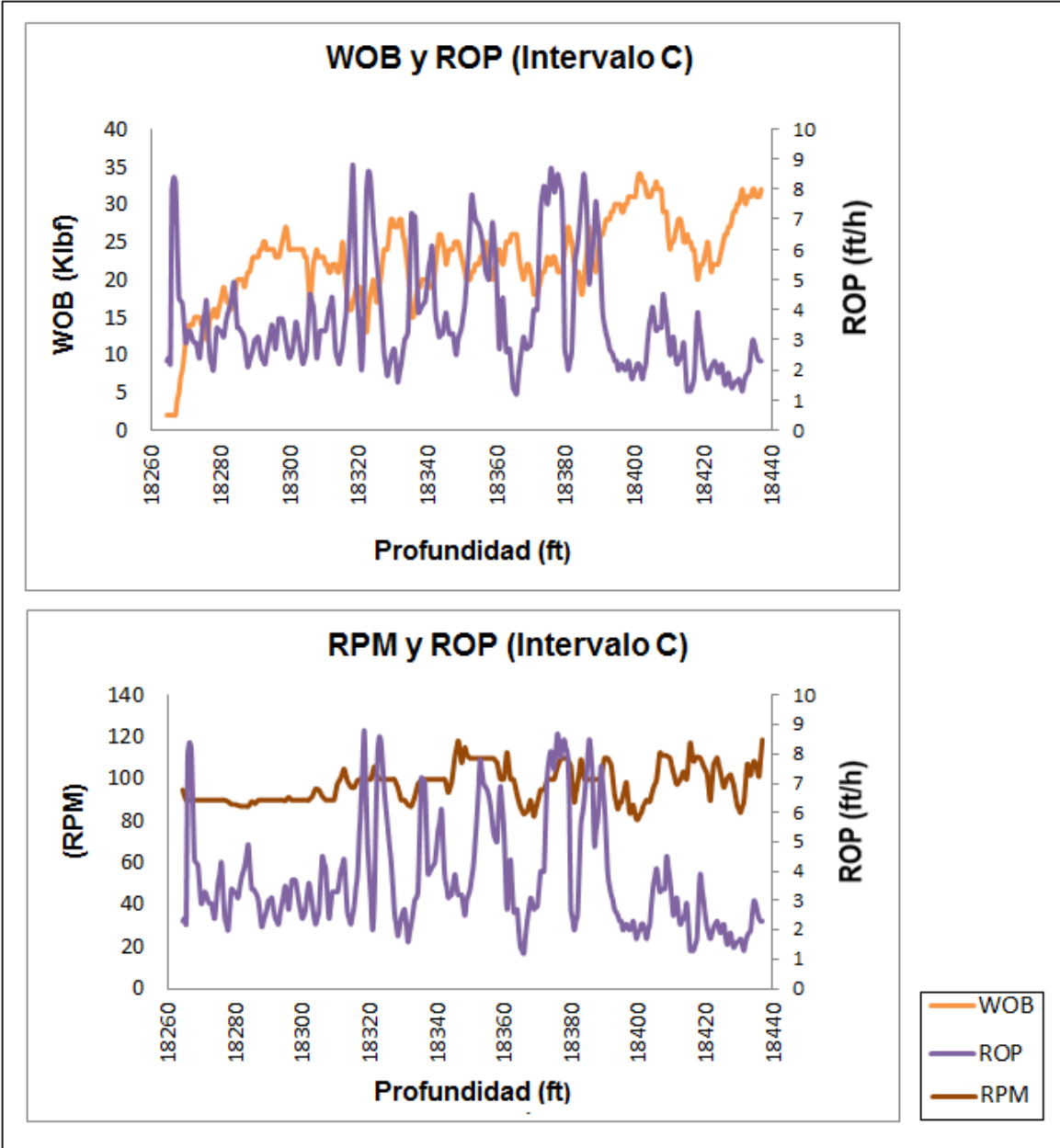


Tabla 10. Especificaciones de las brocas de estudio y condiciones de operación en el Pozo L2.

Intervalo de estudio	Broca	Diámetro	Boquillas	Profundidad (pies)		Pies perforados	ROP (ft/h)	Tiempo Efectivo (h)	Formación Perforada
				Inicial	Final				
D	HÍBRIDA	8,5"	2x12 - 2x14	11520	12445	925	8,8	104,8	Los Cuervos
E	PDC	8,5"	2x13 - 2x10	12445	13005	560	10,3	54,6	Los Cuervos

Tabla 11. Calificación de la broca híbrida usada para la perforación del intervalo D (11520 a 12445 pies) en el Pozo L2

Calificación de salida general							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
2	1	LT	S	E	1	WT	HR
Calificación de salida híbrida (PDC)							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
2	1	LT	S	X	1	WT	HR
Calificación de salida híbrida (TRICÓNICA)							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
2	1	WT	A	E	1	NO	HR

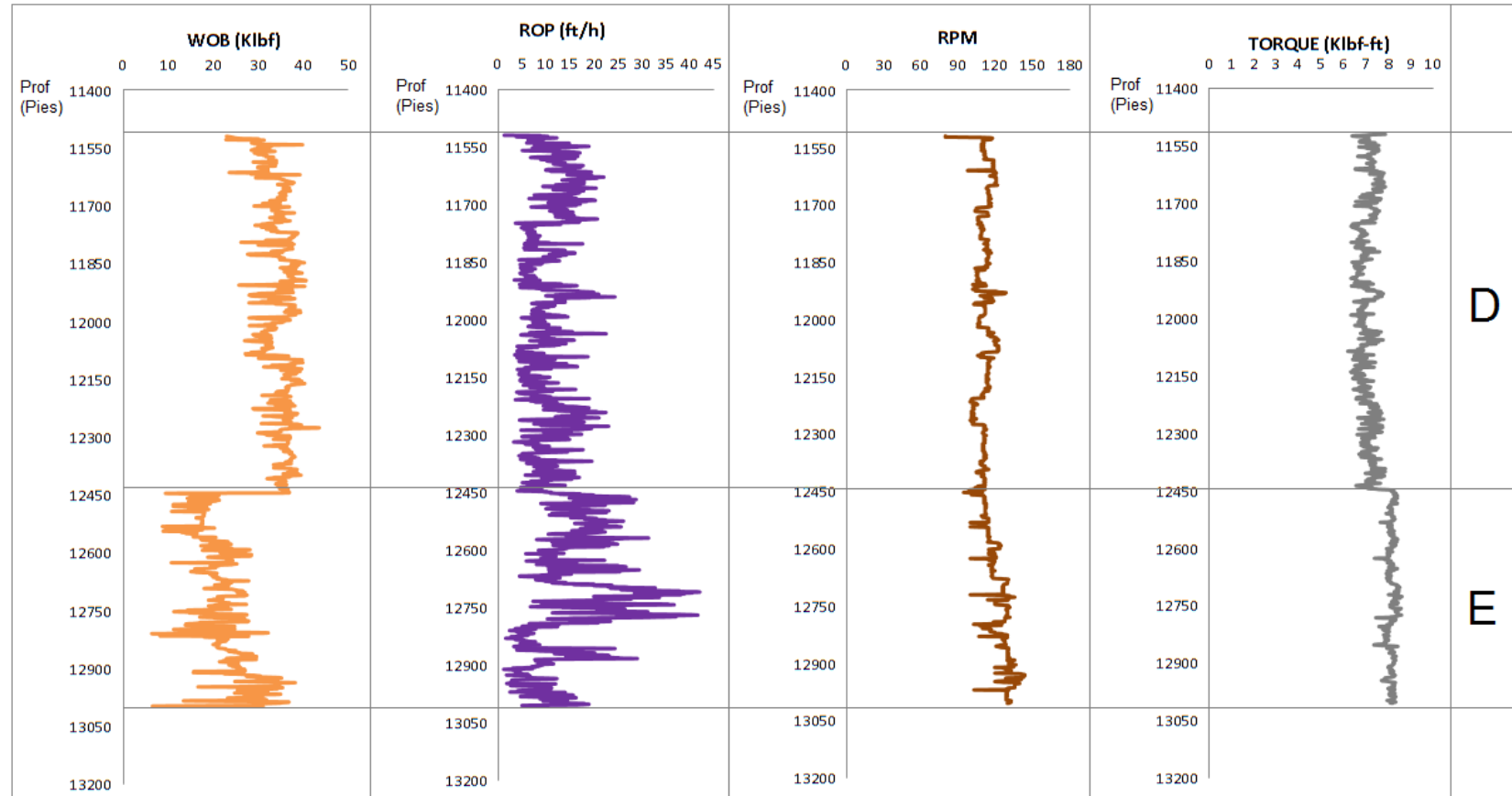
Fuente: BAKER HUGHES, Desempeño de la broca Híbrida 8 ½". Intervalo 11520 a 12445 pies en el Pozo L2. Bogotá. Modificado por el autor.

Tabla 12. Calificación de la broca PDC usada para la perforación del intervalo E (12445-13005 pies) en el Pozo L2.

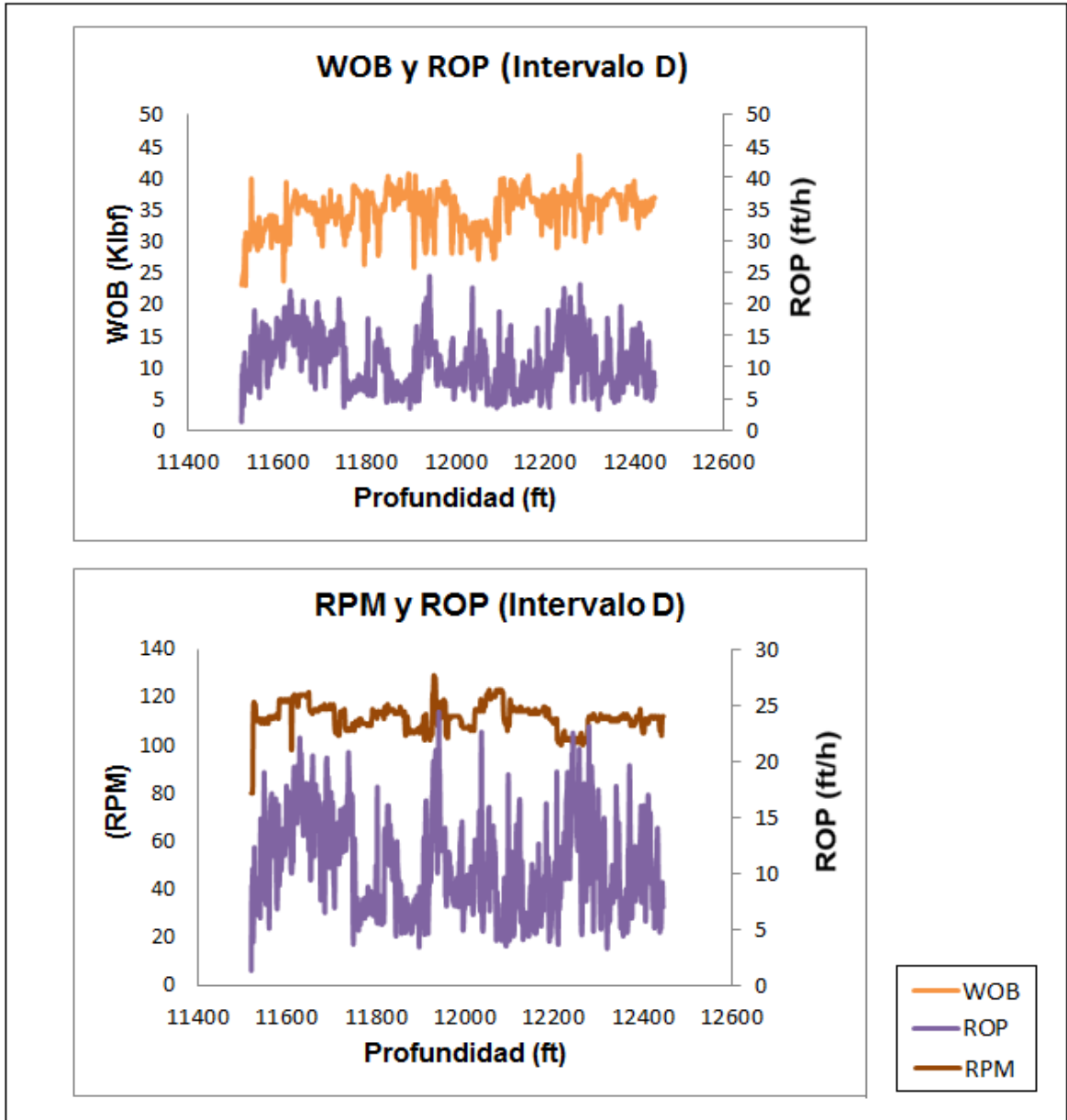
Calificación de salida							
Interior	Exterior	Desgaste	Localización	Cojinetes-sellos	Calibre	Otra característica	Motivo de retiro
0	1	WT	S	X	I	NO	BHA

Fuente: BAKER HUGHES. Desempeño de la broca PDC 8 ½". Intervalo 12445-13005 pies en el Pozo L2. Bogotá. Modificado por el autor.

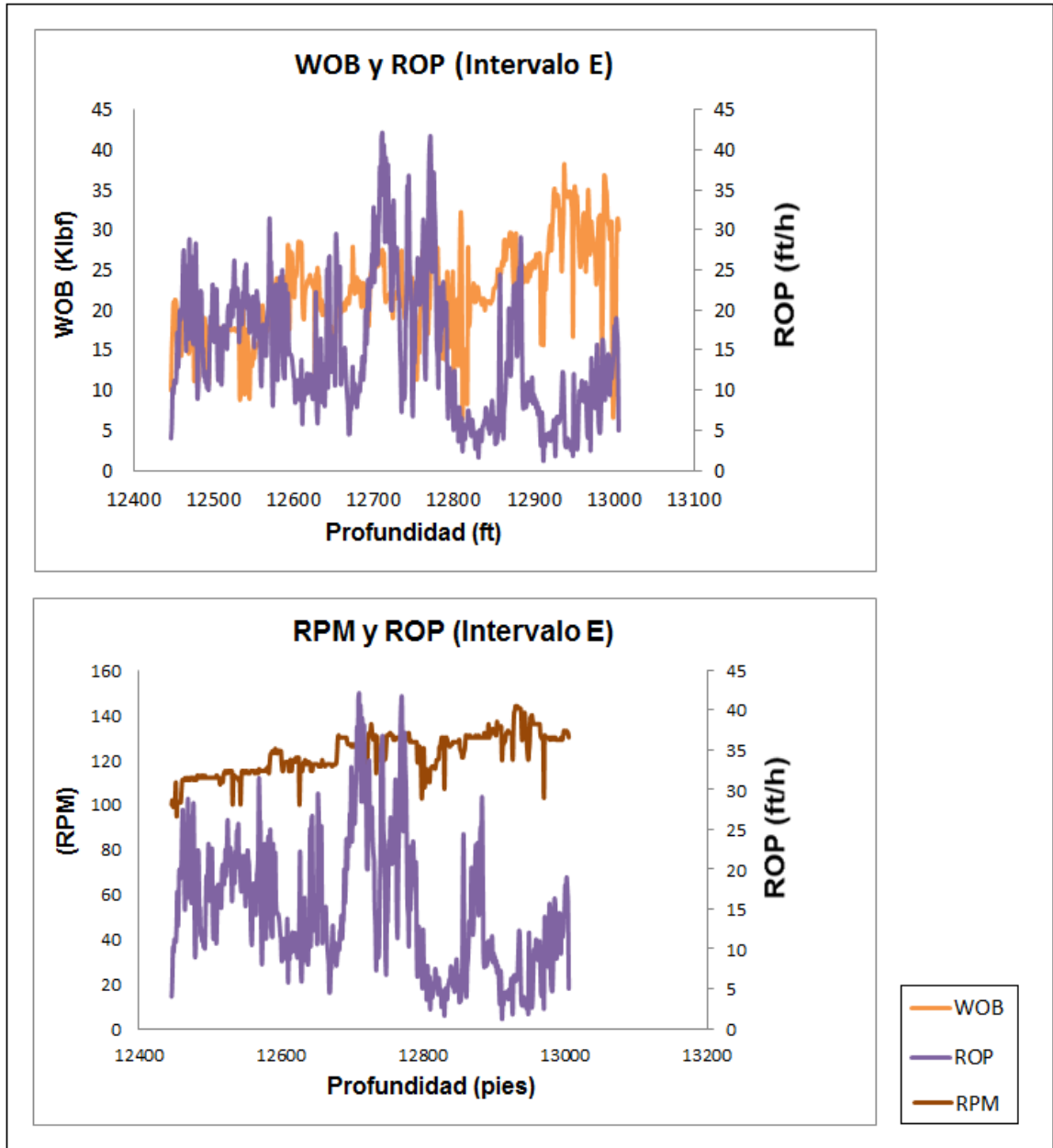
Cuadro 9. Parámetros de operación en los intervalos de estudio en el Pozo L2.



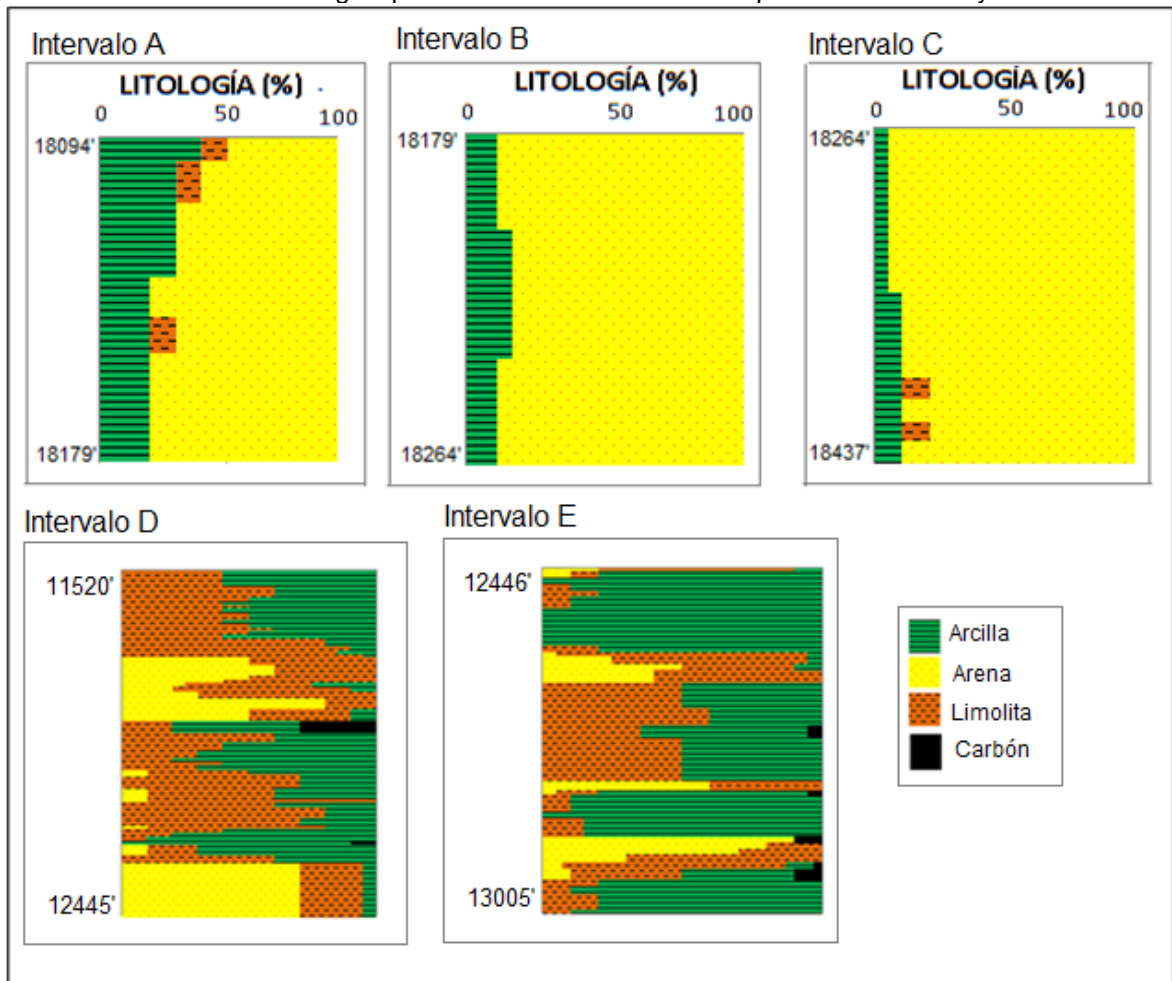
Cuadro 10. Gráficas WOB-ROP y RPM-ROP vs Profundidad en el intervalo D en el Pozo L2



Cuadro 11. Gráficas WOB-ROP y RPM-ROP vs Profundidad en el intervalo D en el Pozo L2



Cuadro 12. Secuencia litológica para cada intervalo de estudio para los Pozos L1 y L2.



3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN EL POZO FL1 PARA EL INTERVALO A (18094 A 18179 PIES) CON BROCA HÍBRIDA

A continuación se presenta los aspectos relacionados con la perforación de la Formación Mirador en el intervalo de 18094 a 18179 ft, en la sección 8 ½ pulgadas del pozo L1 para su posterior análisis. Dicha operación se realizó con un fluido base aceite, con densidad de 9,5 ppg

3.1.1 Broca. El intervalo a estudiar se perforó con una broca híbrida de cuatro aletas y dos conos. Cuatro boquillas (2x14" y 2x16"). El tamaño de los cortadores es de 15 milímetros. En la **Tabla 6** (pág. 60) se observa las demás especificaciones de la broca. En el **ANEXO C** se tiene la hoja técnica de esta broca.

3.1.2 Parámetros de perforación. A continuación se presentan los parámetros bajo los cuales se operó la broca, siendo estos indicadores importantes al momento de la evaluación de la eficiencia en la perforación.

- **Peso sobre la broca (WOB):** El peso máximo sobre la broca de estudio, según sus especificaciones técnicas es de 66 Klbf. Se trabajó entre un rango de 20 a 45 Klbf.

En el **Cuadro 5** (pág. 61) se observa los parámetros de operación en los intervalos A, B y C. Para el intervalo en cuestión (A) se observa que los primeros 20 pies se trabajaron con pesos sobre la broca inferiores a 20 Klbf, dicho intervalo está compuesto por arena, arcilla y presencia ocasional de limolita. A partir de una profundidad aproximada de 18120 pies se observa un incremento en el WOB hasta alcanzar un valor promedio de 40 Klbf a lo largo de toda la corrida. En cuanto a la tasa de perforación, se manejaron valores de ROP entre 2 ft/h y 5 ft/h, esto debido a la complejidad de la Formación Mirador causada por su dureza.

- **Revoluciones por minuto (RPM):** El máximo valor de RPM en la perforación del intervalo estudiado fue 120 RPM. Se manejó un promedio de 100 RPM las cuales se reducen con el fin de controlar torque errático, esto con el fin de brindar mayor estabilidad a la broca, lo cual se ve reflejado en una reducción en el peso sobre la broca pues la fricción con el hueco disminuye.

En el **Cuadro 6** en la gráfica correspondiente al intervalo en cuestión se observa la relación entre la ROP y las RPM a lo largo de su perforación. En el intervalo de 18150 a 18180 pies puede observarse el comportamiento planteado anteriormente en cuanto al aumento de las RPM, manejando un valor entre 100 y 120, y WOB entre 30 y 25 Klbf así como en la tasa de perforación entre 2 y 3,5 ft/h.

- **Torque:** En el caso del intervalo de estudio para el presente pozo se tiene un torque entre 11 y 17 Klbf-ft manejando valores promedio de 14 Klbf-ft a lo largo de la corrida, sin presencia de fluctuaciones importantes.
- **Tasa de flujo (GPM):** Para el intervalo en cuestión, la tasa de flujo se mantuvo un rango parejo entre 450 y 500 gpm. Cabe resaltar que en la Formación Mirador, este galonaje es suficiente para limpieza; debido a que se maneja baja ROP por lo cual no se genera gran cantidad de recortes.

El **ANEXO A** muestra la variación de los parámetros operacionales en intervalo de estudio con la variación de la profundidad.

3.1.3 Calificación de la broca. (5/7/WT/G/E/I/BT/PR) Una vez retirada de fondo, la broca es evaluada según sus condiciones operacionales, calificándose de esta manera según el código IADC. En la **Tabla 7** (pág 60) se observa dicha calificación, dado que la broca evaluada es una broca híbrida, se tiene la calificación para la parte PDC y para la parte tricónica de manera independiente. En cuanto a la estructura PDC se tuvo desgaste significativo (mayor en la parte interna que externa) cuya principal característica fue el corazonado o anillamiento interno, también se observó cortadores rotos. Sin embargo el mayor desgaste se tuvo en los conos, los cuales presentaron dientes desgastados principalmente en la hilera del calibre. La broca sale en calibre. Fue retirada debido a disminución de la ROP.

3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PERFORACIÓN EN EL POZO L1 PARA EL INTERVALO B (18179 A 18264 PIES) CON BROCA PDC

A continuación se presentan los parámetros de la perforación de la Formación Mirador en el intervalo de 18179 a 18264 pies. Se trabajó en la sección 8 ½ " del pozo L1. Se usó un fluido base aceite con densidad de 9,8 ppg. El intervalo perforado corresponde a una composición de arcilla y arena.

3.2.1 Broca. Para la perforación de este intervalo (18179 a 18264 pies) se usó una broca tipo PDC con ocho aletas, cinco (5) boquillas de 12 pulgadas y tres (3) boquillas de 10 pulgadas. Tiene una longitud de 1,1 pies y el calibre es de 2 pulgadas. Los cortadores tienen un diámetro de 13 milímetros. En la **Tabla 6** (pág 60) se muestran las especificaciones de dicha broca. El **ANEXO D** muestra la hoja técnica de la broca.

3.2.2 Parámetros de perforación. A continuación se describen los parámetros operativos en la perforación del intervalo en cuestión, para su posterior análisis.

- **Peso sobre la broca (WOB).** A lo largo de la corrida se manejó un rango de peso sobre la broca entre 10 y 30 Klbf. En el **Cuadro 5** (pág. 61) se observan los parámetros de operación en el intervalo en cuestión (B) (18179-18264 pies). Se observa que en los primeros 6 pies perforados (18179 pies a 18185 pies) se manejó un WOB entre 5 Klbf y 10 Klbf con un ROP entre 2,5 ft/h y 3

ft/h aproximadamente. A partir de los 18190 pies, se incrementa el WOB manejando un rango de valores entre 15 y 30 Klbf y una ROP entre 2 y 5 ft/h.

- **Revoluciones por minuto (RPM):** Se manejan valores entre 100 y 130 RPM aproximadamente a lo largo de la corrida. En el **Cuadro 7** (pág 63) se observa la relación entre las RPM y la ROP para este intervalo (18179-18264 pies). En el intervalo de 18180 a 18210 pies aproximadamente se manejan RPM entre 100 y 120, a partir de esa profundidad aumentan hasta un valor promedio de 130 RPM optimizando las fluctuaciones de torque. Se observa también, que los picos más bajos de RPM (entre 80 y 100 RPM) corresponden con los picos más altos de ROP (entre 4 y 5 ft/h) y a su vez a valores bajos (entre 8 y 15 Klbf) de WOB. Así pues se podría inferir que en formaciones con mayor contenido de arena, se obtiene una tasa de perforación más eficiente operando con peso sobre la broca y RPM inferiores.

A una profundidad aproximada de 18230 pies se observan los valores más bajos en la rata de perforación, los cuales corresponden a los valores más altos en las RPM. Este comportamiento, puede ser debido a un incremento en la MSE presentado a esta profundidad.

- **Torque.** Los primeros 30 pies (18180-18210) se manejaron los valores de torque más bajos de la corrida (alrededor de 15 Klbf-ft) los cuales aumentaron a partir de esta profundidad a un valor promedio de 18 Klbf-ft aproximadamente, observándose fluctuaciones de torque significativas si se comparan con el intervalo anterior (A)
- **Tasa de flujo (GPM).** La tasa de flujo manejada a lo largo del intervalo en cuestión se encontró en un rango entre 390 y 450 GPM.

En el **ANEXO A** se puede observar la variación de los parámetros operacionales en intervalo de estudio con la variación de la profundidad.

3.2.3 Calificación de la broca. (6/8/RO/G/X/I/BT/PP) La broca presenta daño alto en los cortadores internos y daño máximo en los externos. El principal desgaste presentado es por anillamiento. La broca sale en calibre. Así mismo se presentan cortadores rotos. Fue retirada debido a problemas de presión del standpipe, los cuales pueden ser por déficit o exceso de presión. Dada la condición de salida de la broca se puede inferir que probablemente se haya producido aumento cada vez que llegaba a fondo pues esta no se encontraba en condiciones de seguir perforando. En la **Tabla 8** (pág 60) se muestra la correspondiente calificación IADC para la broca corrida en el intervalo en cuestión.

3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA PERFORACIÓN EN EL POZO L1 PARA EL INTERVALO C (18264 A 18437 PIES) CON BROCA PDC

A continuación se presentan los parámetros de la perforación de la Formación Mirador en el intervalo de 18264 a 18437 pies. Se trabajó en la sección 8 ½ " del pozo L1. Se usó un fluido base aceite con densidad de 9,8 ppg. El intervalo perforado corresponde a una composición de arena, arcilla y ocasionalmente presencia de limolita.

3.3.1 Broca. Para la perforación de este intervalo se usó una broca PDC de ocho aletas, ocho boquillas y tamaño de cortadores de 15 milímetros. La hoja técnica de la broca se encuentra en el **ANEXO E**. En la **Tabla 6** (pág 60) se observan las demás especificaciones de la broca.

3.3.2 Parámetros de perforación. A continuación se describen los parámetros manejados en la perforación del intervalo en cuestión.

- **Peso sobre la broca (WOB).** En el intervalo de profundidad de 18270 a 18380 aproximadamente, se manejan valores de WOB comprendidos entre 15 y 30 Klbf, dicho intervalo corresponde a una litología compuesta casi en su totalidad por arena, bajo contenido de arcilla y presencia ocasional de limolita. Entre 18380 y 18410 pies se observa presencia de capas de limolita, arcilla y el contenido de arena disminuye, observándose un incremento en peso sobre la broca a valores entre 20 y 35 Klbf aproximadamente, que a su vez se ve reflejado en una reducción en la rata de perforación. Entre 18410 y 18420 pies se incrementa nuevamente el contenido de arena e igualmente se reduce el WOB a valores entre 20 y 25 Klbf. Finalmente los últimos 20 pies corresponden a una litología compuesta por arena en mayor proporción, y arcilla y limolita observando un nuevo incremento en el WOB. En cuanto al comportamiento de

la ROP se obtienen los valores más altos (6 a 9 ft/h) en el intervalo en el cual se manejaron pesos entre 20 y 30 Klbf (18320-18389 pies).

- **Revoluciones por minuto (RPM):** Entre 18264 y 18310 se manejó un promedio de 90 RPM. A partir de dicha profundidad de manejan valores que oscilan entre 80 y 120 RPM.
- **Torque.** Se observa un torque dentro del rango 15-17 Klbf-ft, con presencia ocasional de fluctuaciones.
- **Tasa de flujo (GPM).** Se mantuvo un valor constante de 450 gpm.

En el **ANEXO A** se puede observar la variación de los parámetros operacionales en intervalo de estudio con la variación de la profundidad.

3.3.3 Calificación de la broca. En la **Tabla 9** (pág 60) se observa la calificación asignada a la broca una vez finalizada su corrida (4/8/RO/A/X/I/LT/PP). Se presentó anillamiento en todas las hileras de la broca como principal característica de desgaste, así mismo se presentó pérdida de cortadores. La broca es retirada de fondo por problemas con la presión de bombeo.

3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN EL POZO L2 PARA EL INTERVALO D (11520 A 12445 PIES) CON BROCA HÍBRIDA.

Se presentan los parámetros de la perforación con broca híbrida en la Formación Los Cuervos en el intervalo de 11520 A 12445 pies. Se trabajó en la sección 8 ½ ” del pozo L2. Se usó un fluido base aceite con densidad de 9,2 ppg la cual se mantuvo a lo largo de la corrida. El intervalo perforado corresponde a una intercalación de arcillolitas, limolitas y arenicas. En el **ANEXO F** se observa la hoja técnica de la broca.

3.4.1 Broca. Se usa una broca híbrida de dos aletas y dos conos. El tamaño de los cortadores es de 16 milímetros. Posee cuatro boquillas, 2x12” y 2x14”. En la **Tabla 10** (pág 64) se observan sus especificaciones.

3.4.2 Parámetros de perforación. A continuación se describen los parámetros manejados en la perforación del intervalo en cuestión.

- **Peso sobre la broca (WOB):** En el **Cuadro 9** (pág 66) se observan los parámetros de operación en la perforación del intervalo de estudio (11520-12445 pies). Se trabaja con un peso sobre la broca entre 30 Klbf y 40 Klbf, a lo largo de

todo el intervalo. En el intervalo de 12000 a 12100 pies se presenta una caída en el peso manejando valores alrededor de 33 Klb, posiblemente este peso sea debido a la litología atravesada la cual consiste casi en su totalidad en arcilla y limolita. La ROP varía entre 5 ft/h y 20 ft/h, y sus variaciones pueden ser ocasionadas por las variaciones en la composición de la litología.

- **Revoluciones por minuto (RPM):** La perforación del intervalo en cuestión comienza con 80 RPM las cuales aumentan en los primeros pies hasta alcanzar valores entre 100 y 120 RPM a lo largo de toda la corrida. En el **Cuadro 9** (pág 66) (intervalo 11520-12445 pies) se observa dicho comportamiento.
- **Torque.** No se registran fluctuaciones en el torque importantes. Los valores oscilan entre 6 y 8 Klb-ft. Esto debido a la naturaleza de la broca, la cual brinda mayor estabilidad en la operación.

En el **ANEXO B** se puede observar la variación de los parámetros operacionales en intervalo de estudio con la variación de la profundidad.

3.4.3 Calificación de la broca. (2/1/LT/S/E/1/WT/HR) Una vez retirada de fondo, la broca es evaluada según sus condiciones físicas, y calificada según el código IADC. En la **Tabla 11** (pág 65) se observa dicha calificación después de la corrida. La broca fue retirada al completar las horas de uso, en este caso alcanzando el límite de revoluciones.

En cuanto a la parte PDC se tiene como característica de desgaste principal se tiene un cortador perdido (LT) en el hombro (S) y como característica secundaria desgaste de los cortadores. Por otro lado en la parte tricónica se observa desgaste mínimo en los dientes en todas las hileras (A). Los sellos son efectivos. Se tuvo una pérdida de calibre mínima correspondiente a 1/32”.

3.5 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN EL POZO L2 PARA EL INTERVALO E (12445 A 13005 PIES) CON BROCA PDC

Se presentan los parámetros de la perforación con broca PDC en la Formación Los Cuervos en el intervalo de 12445 a 13005 pies. Se trabajó en la sección 8 ½ ” del pozo L2. Se usó un fluido base aceite con densidad de 9,2 ppg,

3.5.1 Broca. Se usa una broca PDC de ocho aletas y ocho boquillas (5 de 13 pulgadas y 3 de 10 pulgadas). El tamaño de los cortadores es de 16 milímetros. En el **ANEXO G** se encuentra la hoja técnica de dicha broca. En la **Tabla 10** (pág 65) se observan sus especificaciones

3.5.2 Parámetros de perforación. A continuación se describen los parámetros manejados en la perforación del intervalo en cuestión.

- **Peso sobre la broca (WOB):** En el **Cuadro 9** (pág 66) se observa los parámetros de operación en la perforación del intervalo de estudio (12445 - 13005 pies). Se observa un rango promedio entre 10 y 35 Klbf de peso sobre la broca. Entre 12950 y 13000 pies se presentan los mayores valores para el WOB, este intervalo corresponde a una litología compuesta por lodolita y limolita con presencia ocasional de carbón. Respecto a la ROP se obtienen valores promedio entre 5 y 40 ft/h. Los valores más bajos se tuvieron perforando el intervalo de 12800 a 12855 aproximadamente (entre 2 y 10 ft/h), este intervalo corresponde principalmente a arcilla con presencia ocasional de anhidrita, la cual aporta dureza significativa, y dificulta la perforación. Así como en el intervalo 12900 a 12960 aproximadamente cuya composición está dada por arcilla y arena principalmente.
- **Revoluciones por minuto (RPM):** Se manejó un rango entre 100 y 140 RPM aproximadamente. Analizando las características de la formación, se observa que los topes mínimos corresponden a secciones arenosas con el fin de evitar el desgaste prematuro de la broca mientras que valores más altos corresponden a formaciones más arcillosas.

En el **ANEXO B** se puede observar la variación de los parámetros operacionales en intervalo de estudio con la variación de la profundidad.

3.5.3 Calificación de la broca. (0/1/WT/S/X/I/NO/BHA) Una vez retirada de fondo, la broca es evaluada según sus condiciones físicas y calificada según el código IADC. En la **Tabla 12** (pág. 65) se observa dicha calificación.

No se obtuvo desgaste interno de los cortadores y el desgaste externo fue mínimo. Como característica de desgaste se tienen cortadores desgastados en el hombro de la broca. La broca salió en calibre y fue retirada de fondo debido a cambio en el BHA.

En la **Tabla 13** se encuentran de manera generalizada los parámetros anteriormente expuestos para cada intervalo de estudio.

Tabla 13. Parámetros de operación en los intervalos de estudio

INTERVALO	WOB	ROP	RPM	TORQUE
A	20 - 45 Klbf	2 - 5 ft/h	Entre 100 y 120 con un promedio de 100 RPM	Entre 11 y 17 Klbf-ft, con un promedio de 14 Klbf-ft
B	5 - 30 Klbf	2 - 5 ft/h	80 - 130 RPM	15 - 18 Klbf-ft
C	15 - 35 Klbf	2 - 9 ft/h	80 - 120 RPM	15 - 17 Klbf-ft
D	30 - 40 Klbf	5 - 20 ft/h	100 - 120 RPM	6 - 8 Klbf-ft
E	15 - 35 Klbf	5 - 30 ft/h	100-140 RPM	7 - 8 Klbf-ft

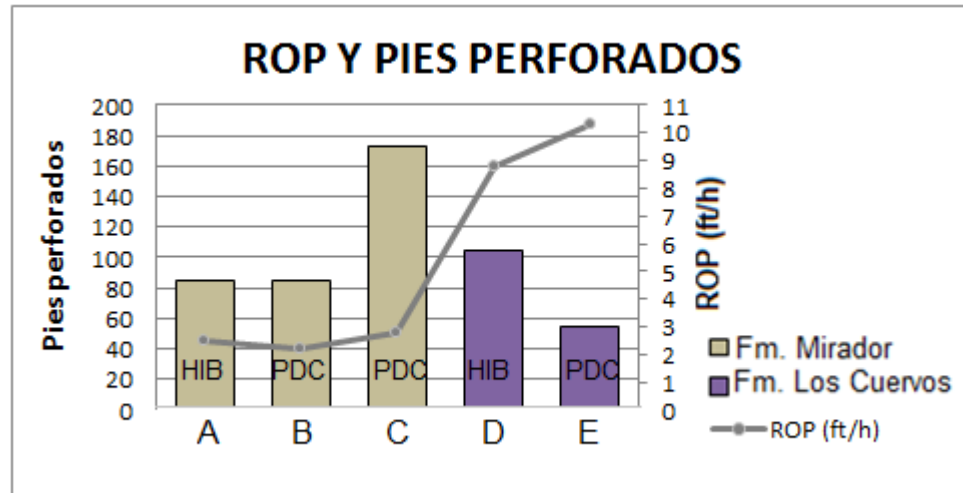
3.6 COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN EN LOS POZOS PERFORADOS CON BROCA PDC Y BROCA HÍBRIDA

A continuación se grafica el comportamiento de cada uno de los parámetros previamente estudiados. Las gráficas se hacen con base en la Formación perforada. Para efectos prácticos se llamará intervalo A al intervalo 18094-18179 pies, intervalo B a 18179-18264 pies e intervalo 18264-18436 pies en la Formación Mirador, y en la Formación Los Cuervos intervalo D a 11520-12445 pies e intervalo E a 12445-13005 pies.

3.6.1 Comparación de la ROP efectiva entre las brocas corridas en los intervalos de estudio. Se presenta la Gráfica 2 comparando la tasa de perforación efectiva relacionada a su vez con los pies perforados en el Pozo L1 con broca híbrida en el intervalo A y broca PDC en los intervalos B y C en la Formación Mirador y en el Pozo L2 con broca híbrida en el intervalo D y con broca PDC en el intervalo E en la Formación Los Cuervos. Se observa que en la Formación Mirador la broca híbrida (A) tuvo un desempeño medio en cuanto a la tasa de penetración. En la Formación Los Cuervos la broca híbrida (D) tuvo una ROP efectiva ligeramente menor que la broca PDC (E). Asimismo se observó que en la Formación Mirador se tuvo mayor eficiencia en cuanto a pies perforados y tasa de perforación con la broca PDC usada en el intervalo C (18264 a 18436 pies). Por otro lado en la Formación Los Cuervos, aunque se tiene una ROP efectiva menor con la broca híbrida, se observa que el desempeño en cuanto a profundidad perforada fue mejor con dicha broca. En cuanto a este aspecto se debe tener en cuenta que la broca PDC del intervalo E fue retirada de fondo debido a cambio del BHA, y no por motivos relacionados con su desgaste.

También se observa que las ROP fueron ligeramente menores en la Formación Mirador, esto debido a la dureza de dicha Formación, por lo cual debe controlarse este parámetro con el fin de evitar desgaste prematuro de la broca.

Gráfica 2. ROP y profundidad perforada para cada intervalo de estudio.

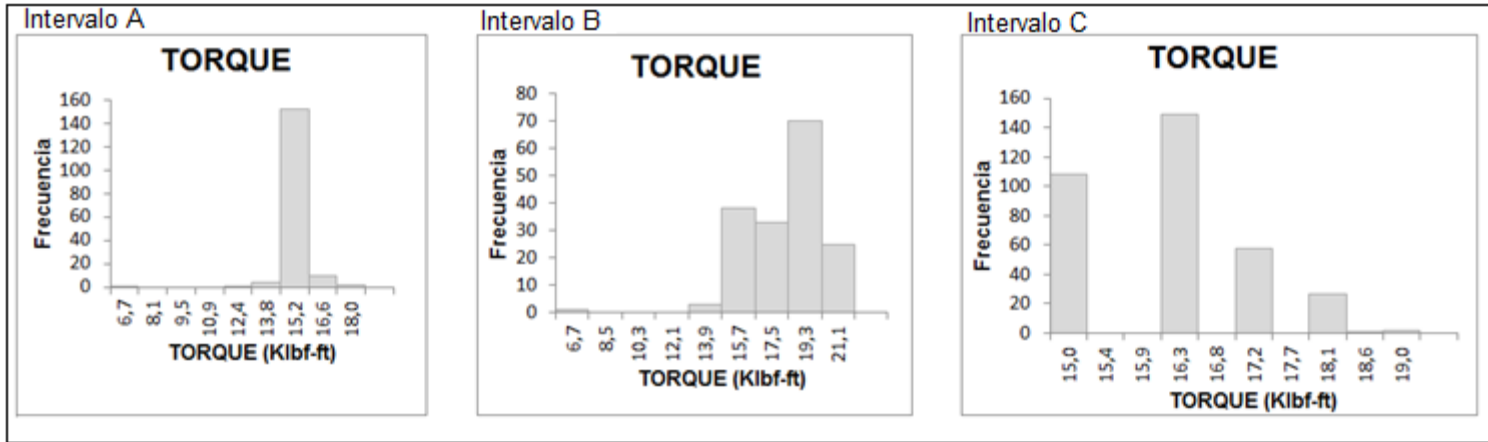


3.6.2 Comparación del torque promedio presentado con el uso de las brocas corridas en los intervalos de estudio. En el **Cuadro 13** se observan los histogramas de frecuencia del torque en los intervalos A, B, C correspondientes al Pozo L1. Teniendo en cuenta la desviación estándar el escenario más favorable se tiene en el intervalo A con el uso de la broca híbrida con un valor de 0,84 pues se presenta menor dispersión en los valores de torque manejando un promedio de 15,2 Klbf-ft y el menos favorable con un valor de 1,88 para el intervalo B con el uso de broca PDC en el cual los valores oscilaron entre 15 y 18 Klbf-ft.

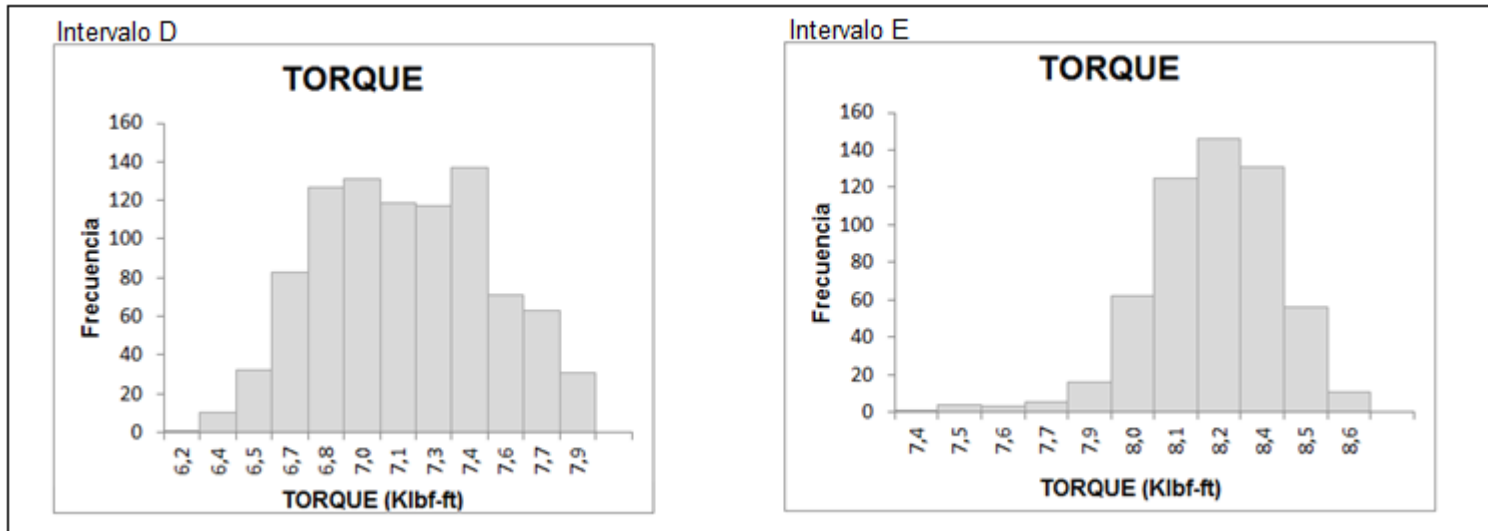
En el **Cuadro 14** se presentan los histogramas de frecuencia relacionados con el torque manejado en la perforación de los intervalos D y E correspondientes al Pozo L2. En el intervalo D se presenta una desviación estándar mayor que en el intervalo E, posiblemente ocasionado por diferente disposición del BHA o motivos ajenos al desempeño de la broca.

Se observa que en la Formación Mirador se manejaron valores de torque superiores (Entre 15 y 18 Klbf-ft) que en la Formación Los Cuervos (6 a 9 Klbf-ft), esto ocasionado nuevamente por la dureza y compresibilidad de la arenisca de la Formación Mirador.

Cuadro 13. Histogramas de Frecuencia para el torque en los intervalos de estudio en el Pozo L1



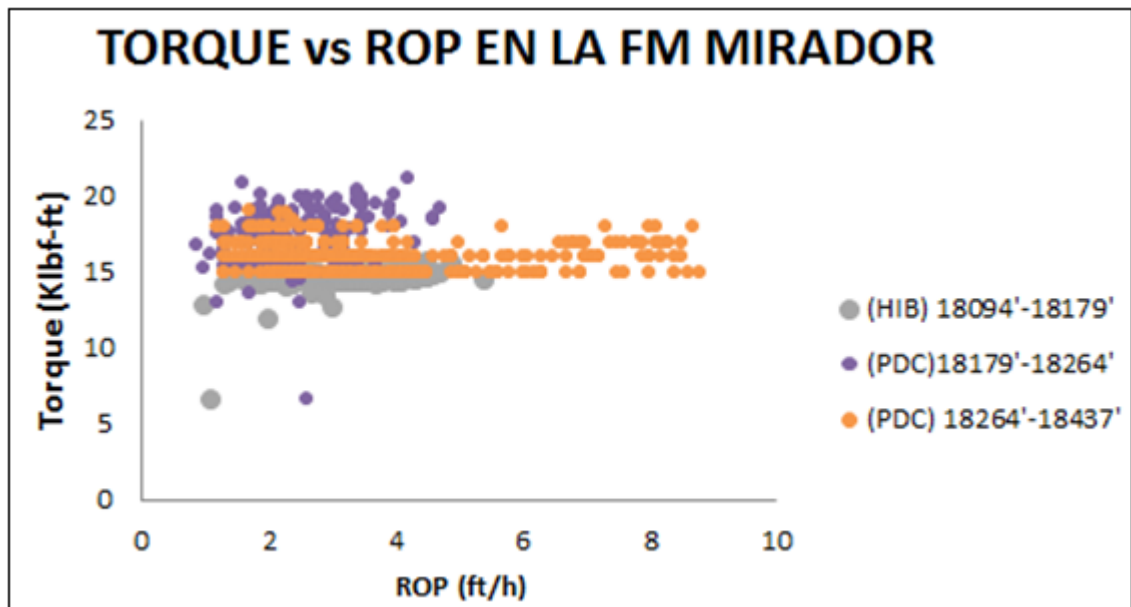
Cuadro 14. Histogramas de Frecuencia para el torque en los intervalos de estudio en el Pozo L2



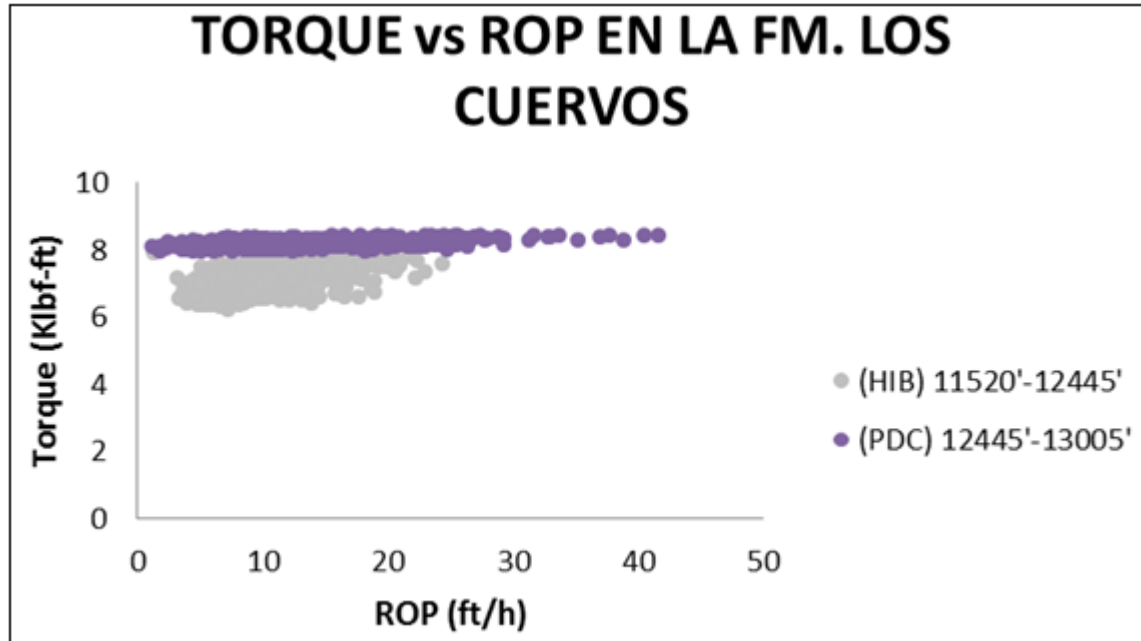
3.6.3 Relación entre la tasa de perforación y torque. En la **Gráfica 3** se observa la relación entre la ROP y el torque obtenido en la perforación de los intervalos de estudio para el Pozo L1 en la Formación Mirador. En el intervalo A perforado con la broca híbrida se tiene el menor valor de torque (alrededor de 15 Klbf-ft aproximadamente) manejando una ROP aproximada entre 2 ft/h y 6 ft/h. En el intervalo B se observa reducción en la eficiencia debido a que se trabajan torques más altos (alrededor de 20 Klbf aproximadamente) y la tasa de perforación se mantuvo igualmente entre 2 ft/h y 5 ft/h. Finalmente se tiene el intervalo C el cual muestra la mayor eficiencia en cuanto a la relación torque-ROP, pues se manejaron valores de torque entre 15 y 20 Klbf-ft obteniendo ROP cercanas a 10 ft/h.

En la **Gráfica 4** se tiene igualmente la relación entre la ROP y el torque obtenido en la perforación de los intervalos de estudio en la Formación Los Cuervos. Se observa una tendencia menor en los valores de torque (entre 6 Klbf-ft y 8 Klbf-ft) en el intervalo D perforado con broca híbrida siendo esto un posible indicador de eficiencia en la perforación pues se reduce la fricción broca-formación, sin embargo se manejan ROP menores (hasta 25 ft/h aproximadamente) que las obtenidas con un valores de torque de aproximadamente 8 Klbf-ft en el intervalo E perforado con broca PDC pero obteniendo valores de torque de aproximadamente 6 Klbf-ft.

Gráfica 3. Relación entre el ROP y Torque para los intervalos de estudio en la Formación Mirador



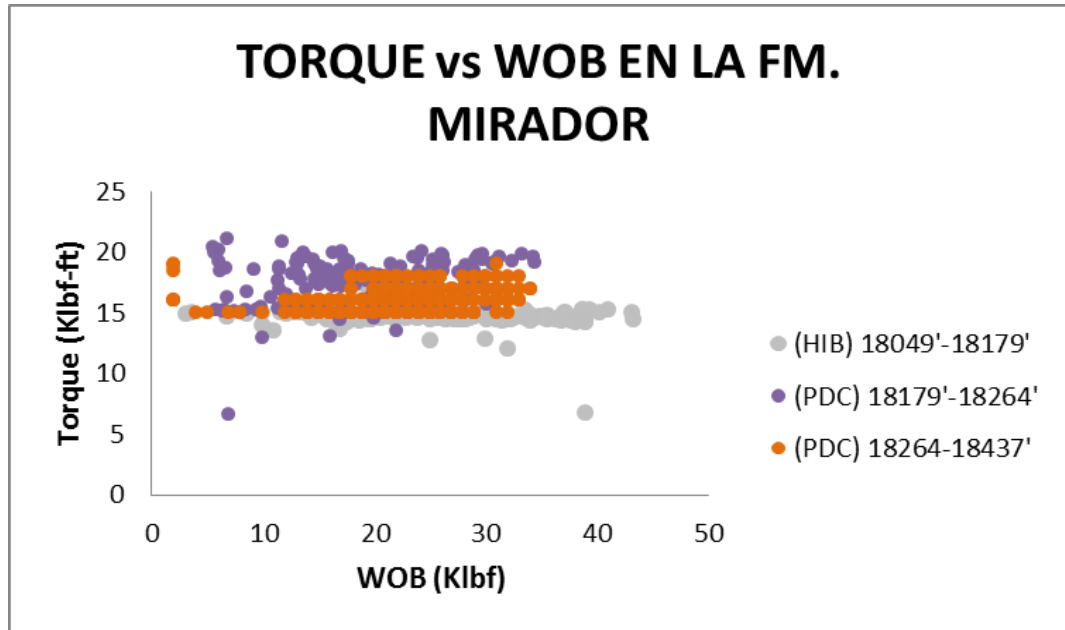
Gráfica 4. Relación entre la ROP y Torque para los intervalos de estudio en la Formación Los Cuervos



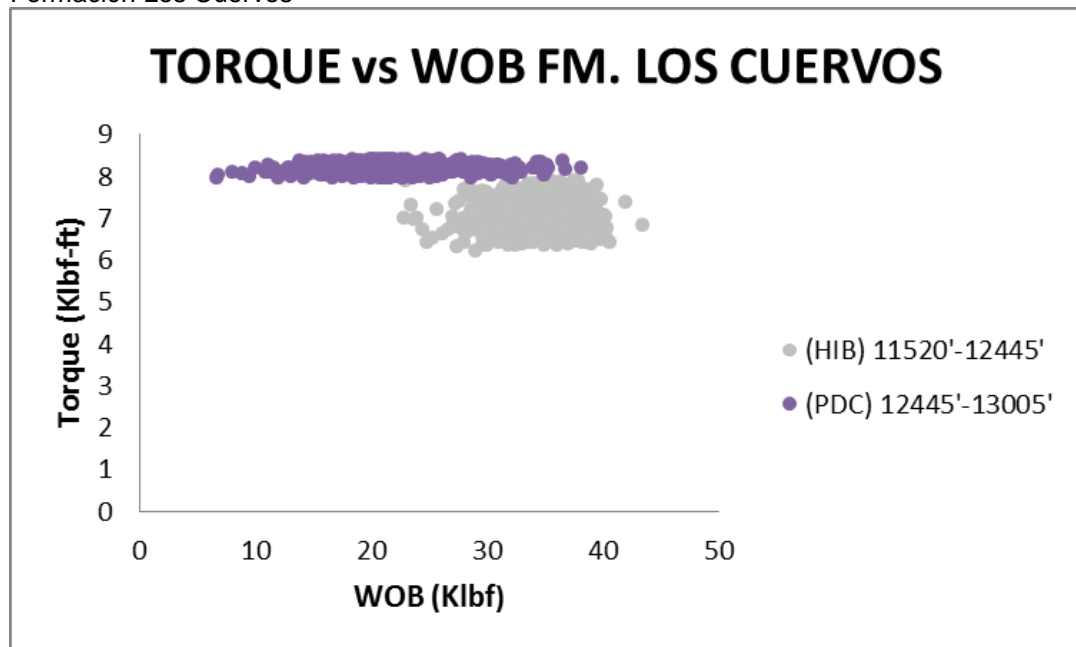
3.6.4 Relación entre el peso sobre la broca y el torque. En la **Gráfica 5** se observa la relación entre el peso aplicado sobre la broca y el torque obtenido en la perforación de los intervalos de estudio en la Formación Mirador. Con el uso de la broca híbrida en el intervalo de A se aplicaron WOB superiores a los de los otros dos intervalos alcanzando un valor de 40 Klbf aproximadamente, sin embargo es también el intervalo que menor torque registró. En cuanto a los intervalos perforados con broca PDC, se manejan WOB inferiores a 40 Klbf manejando valores de torque entre 15 y 20 Klbf-ft,

En la **Gráfica 6** se muestra la relación entre el peso sobre la broca y el torque para los intervalos de estudio del Pozo FL2 en la Formación Los Cuervos. Para el intervalo de D usando la broca híbrida, se evidencia un valor de peso aplicado sobre la broca entre 30 y 40 Klbf aproximadamente a lo largo de toda la corrida, obteniendo valores de torque entre 6 y 8 Klbf-ft los cuales resultan inferiores a los obtenidos en el intervalo E con WOB comprendidos entre 10 y 40 Klbf a lo largo de toda la corrida.

Gráfica 5. Relación entre el WOB y el Torque en los intervalos de estudio en la Formación Mirador



Gráfica 6. Relación entre el WOB y el Torque en los intervalos de estudio en la Formación Los Cuervos



4. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS BROCAS SEGÚN SU EFICIENCIA MECÁNICA

En este capítulo se lleva a cabo el análisis de la energía mecánica específica de las brocas usadas en la sección 8 ½” en los Pozos L1 en la Formación Mirador y L2 en la Formación Los Cuervos y de esta manera determinar la broca cuyo desempeño conlleve a la mayor eficiencia mecánica.

Los parámetros de perforación aplicados en cada pozo y usados para el cálculo de energía mecánica específica (Capítulo 2) se estudiaron previamente en el capítulo anterior (Capítulo 3). El análisis de la eficiencia mecánica se desarrolla con base en la energía mecánica específica, conociendo la relación inversa que existe entre estos dos factores, tal como se observa en la **Ecuación 3.** , así como del análisis del comportamiento de los parámetros de perforación obtenidos.

Ecuación 3. Eficiencia mecánica sin confinamiento.

$$Eficiencia\ mecánica = \frac{MSE\ mínima}{MSE\ actual} * 100$$

Fuente: R.C PESSIER. Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. 1992

La Energía Mecánica Específica Mínima se alcanza cuando la Energía Mecánica Específica se aproxima a la resistencia compresiva de la roca sin confinamiento (UCS). Sin embargo para aplicación de campo la ecuación no puede ser aplicada de esa manera, pues la roca perforada se encuentra bajo un esfuerzo compresivo. Así pues, Pessier³¹ propuso la **Ecuación 4** en donde se tiene en cuenta la resistencia de la roca bajo confinamiento.

Ecuación 4. Eficiencia mecánica con confinamiento

$$EFFM = \frac{CCS}{MSE} * 100$$

Fuente: R.C PESSIER. Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. 1992

Donde:

³¹R.C PESSIER. Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. 1992

EFFM: Eficiencia mecánica (porcentaje)

CCS: Resistencia a la compresión de la roca bajo confinamiento (psi)

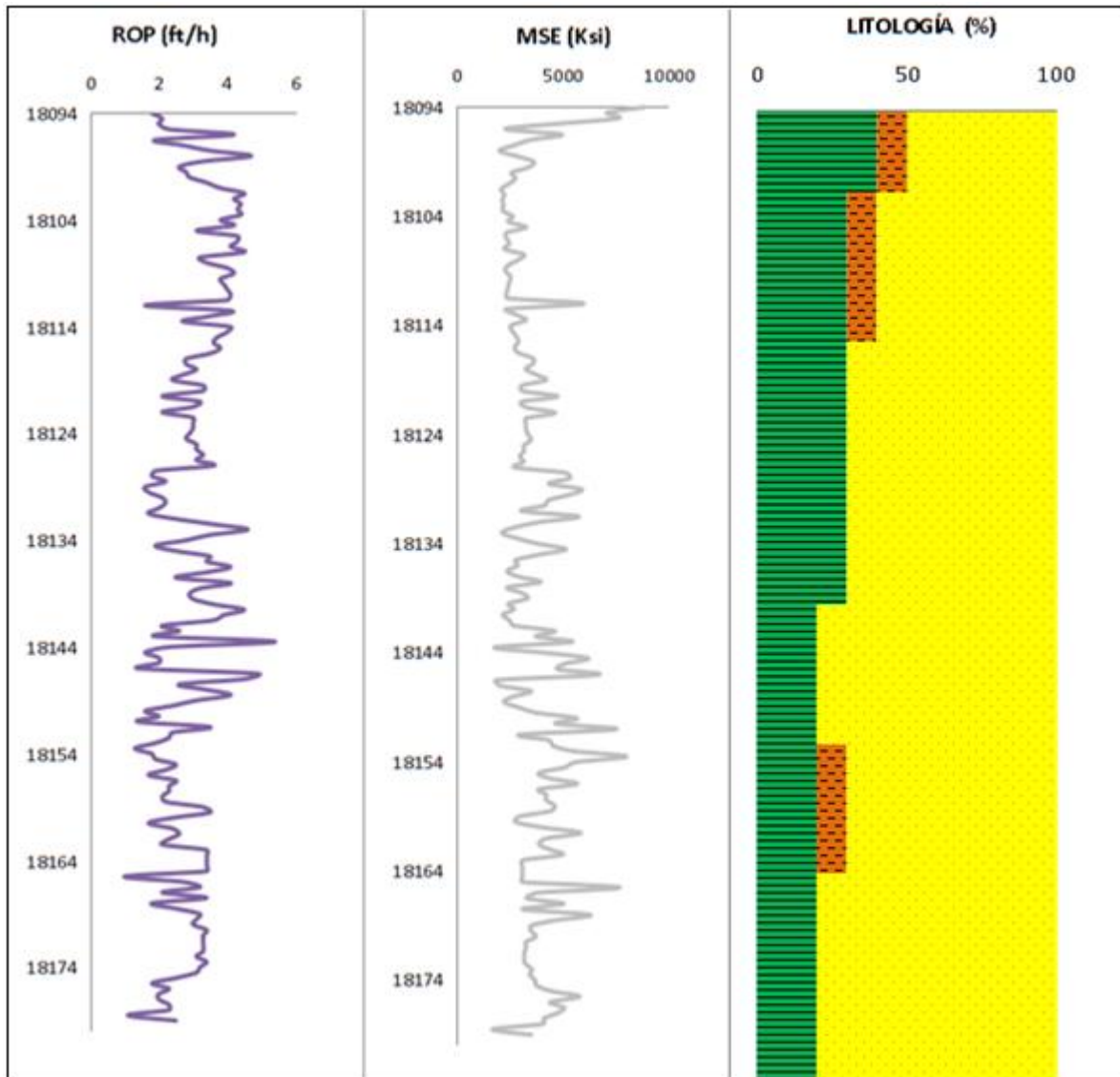
MSE: Energía Mecánica Específica (psi)

4.1 EVALUACIÓN DE LA BROCA HÍBRIDA USADA EN EL POZO L1 EN LA FORMACIÓN MIRADOR EN EL INTERVALO A

Se analiza la eficiencia mecánica en función de la energía mecánica específica de la broca PDC usada en el intervalo A en la Formación Mirador. Dicho intervalo corresponde a una sección de intercalación de arena, arcilla y limolita en baja cantidad.

En la **Gráfica 7** se muestra el comportamiento de la ROP y la MSE con respecto a la profundidad perforada. Debido a que la litología atravesada no presenta gran variación no se observan cambios significativos en la MSE referentes a las propiedades de las rocas. A lo largo de la corrida se presentan valores entre 3000 y 6000 Ksi y ROP no superiores a 5 ft/h. En el intervalo de 18154 a 18160 pies se observa una reducción en la proporción de arena y un incremento en la MSE.

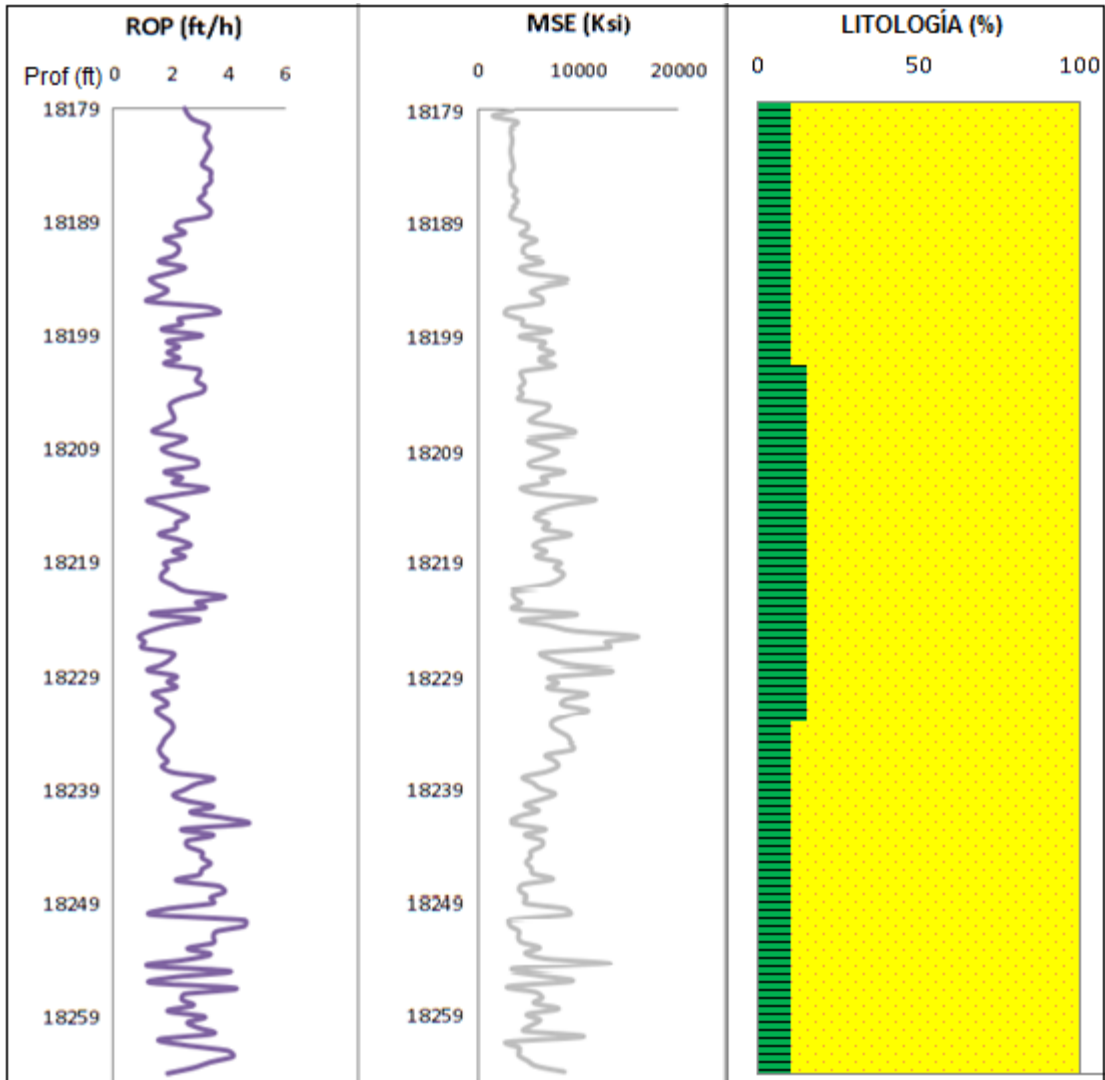
Gráfica 7. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L1 en el intervalo A (18094 ft a 18179 ft) en la Formación Mirador



4.2 EVALUACIÓN DE LA BROCA PDC USADA EN EL POZO FL1 EN LA FORMACIÓN MIRADOR EN EL INTERVALO B

Se analiza la eficiencia mecánica en función de la energía mecánica específica de la broca PDC usada en el intervalo B en la Formación Mirador. Dicho intervalo corresponde a una sección con composición casi en su totalidad de arena con baja cantidad de arcilla, tal como se observa en la **Gráfica 8**. Se observan valores promedio alrededor de 10000 ksi y ROP entre 2 y 4 ft/h. En el intervalo de 18200 a 18230 pies se tiene una ligera reducción en la proporción de arcilla así como presencia de arena con mayor dureza, conllevando a un incremento leve en la MSE.

Gráfica 8. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L1 en el intervalo B (18179 a 18264 pies) en la Formación Mirador.

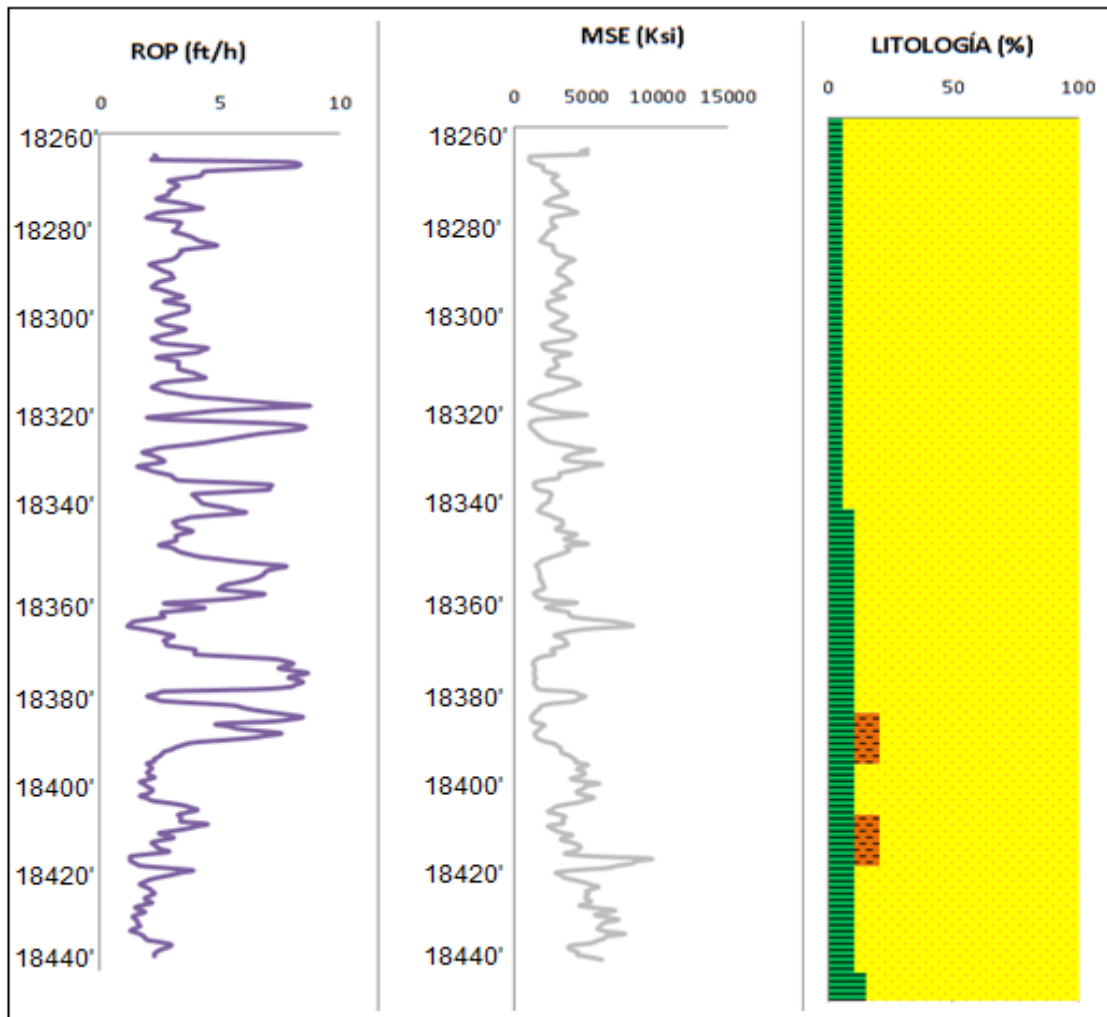


4.3 EVALUACIÓN DE LA BROCA PDC USADA EN EL POZO L1 EN EL INTERVALO C

Se analiza la eficiencia mecánica en función de la energía mecánica específica de la broca PDC usada en el intervalo C en la Formación Mirador. El intervalo de estudio corresponde a una litología compuesta principalmente por arena y arcilla en menor cantidad. Se observan trazas de limolita.

En la **Gráfica 9** se observa que a partir de una profundidad aproximada de 18350 se produce una ligera reducción en la cantidad de arena perforada, y por consiguiente un ligero incremento en la MSE.

Gráfica 9. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L1 en el intervalo C (18264 a 18437 pies) en la Formación Mirador



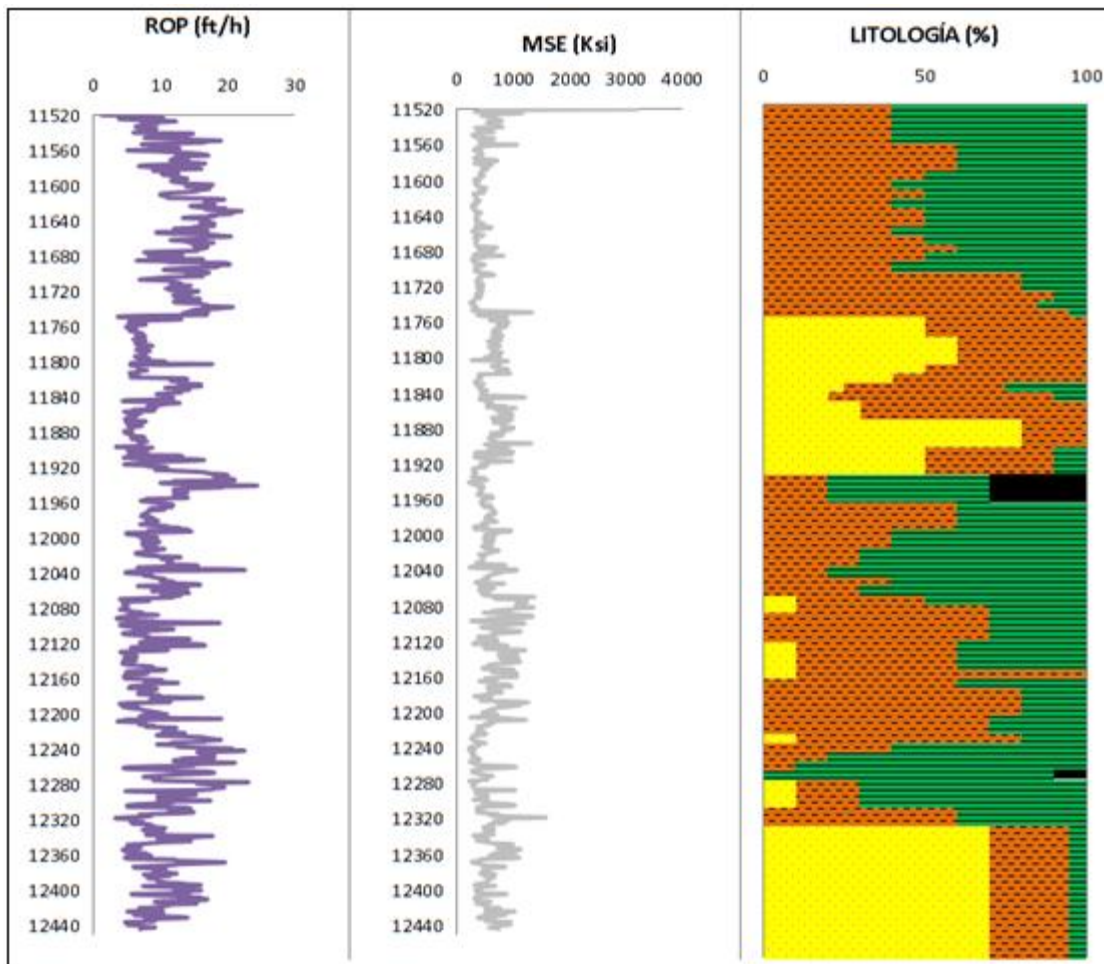
4.4 EVALUACIÓN DE LA BROCA HÍBRIDA USADA EN EL POZO L2 EN EL INTERVALO D

Se analiza la eficiencia mecánica en función de la energía mecánica específica de la broca híbrida usada en el intervalo D, en la Formación Los Cuervos. Dicho

intervalo corresponde a una sección con intercalación de arcilla, arena y limolita casi en igual proporción así como presencia ocasional de trazas de carbón.

Se observa en la **Gráfica 10** la variación de la ROP y la MSE respecto a la profundidad. Se obtuvieron pocas fluctuaciones en MSE manejando un valor promedio de 1000 ksi, y un valor promedio de ROP de 15 ft/h a lo largo de toda la corrida. Los picos que se observan en la gráfica de MSE corresponden a zonas con presencia de arena, que a su vez producen reducción en la tasa de perforación y están dados en los intervalos de 11750 pies a 11900 pies aproximadamente y 12306 pies y 12362 pies.

Gráfica 10. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L2 en el intervalo D (11520 pies a 12445 pies) en la Formación Los Cuervos

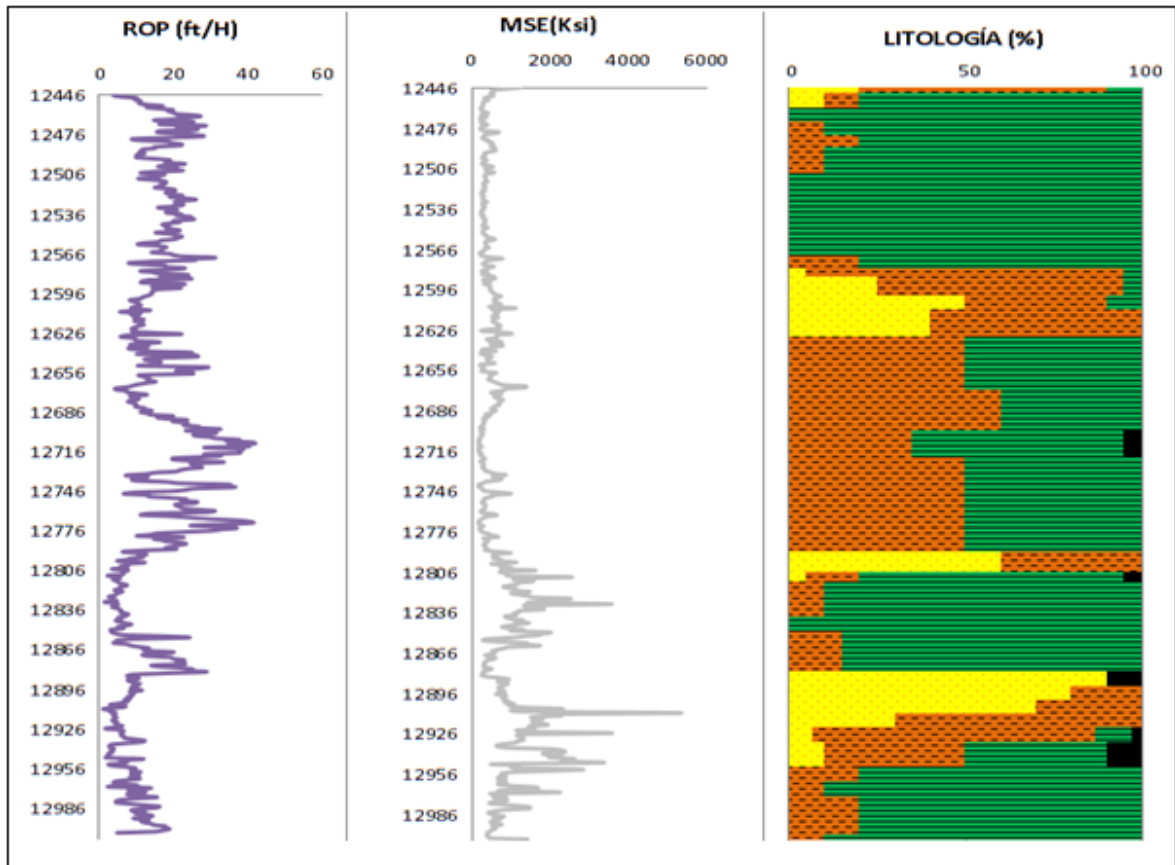


4.5 EVALUACIÓN DE LA BROCA PDC USADA EN EL POZO L2 EN EN EL INTERVALO E

Se analiza la eficiencia mecánica en función de la energía mecánica específica de la broca PDC usada en el intervalo E, en la Formación Los Cuervos. El intervalo perforado corresponde a una intercalación de capas de arcillolla y limolita, con capas de arena.

En la **Gráfica 11** se presenta la variación de la ROP y la MSE con respecto a la profundidad perforada. Se observa gran variación en la energía mecánica específica, causada por la gran variación de litología. En los intervalos de 12800 a 12830 pies y de 12896 a 12920 pies se observa un incremento significativo en la energía mecánica a valores alrededor de 4000 y 5000 ksi respectivamente, dichos intervalos corresponden a inicio de litologías cuya composición es alta en arena, además de presentarse un incremento en el peso sobre la broca, siendo este un indicio de baja eficiencia en la broca, esta reducción en la eficiencia se ve reflejada a su vez en los menores valores en las ROP a lo largo de la corrida (entre 2 y 6 ft/h aproximadamente). Este comportamiento también se ve reflejado en el intervalo comprendido entre 12570 y 12630 pies aproximadamente, perforado con la broca híbrida, sin embargo las fluctuaciones de MSE son significativamente menores que en los intervalos previamente mencionados, siendo este un indicador de mejor estabilidad en la perforación con el uso de la broca híbrida. En dichas intercalaciones arenosas se hace necesario reducir las RPM con el fin de evitar el desgaste prematuro de la broca, debido a la dureza y abrasividad de la litología perforada.

Gráfica 11. ROP y MSE Vs. Profundidad en el Pozo L2 en el intervalo E (12446 pies a 12986 pies) en la Formación Los Cuervos.



4.6 COMPARACIÓN ENERGÍA MECÁNICA ESPECÍFICA PARA LOS INTERVALOS DE ESTUDIO

A continuación se presentan las curvas de ROP vs MSE para los intervalos de estudio clasificados según la Formación perforada. Esto con el fin de evaluar el comportamiento de la broca en cuanto a la energía mecánica específica empleada y por consiguiente su eficiencia.

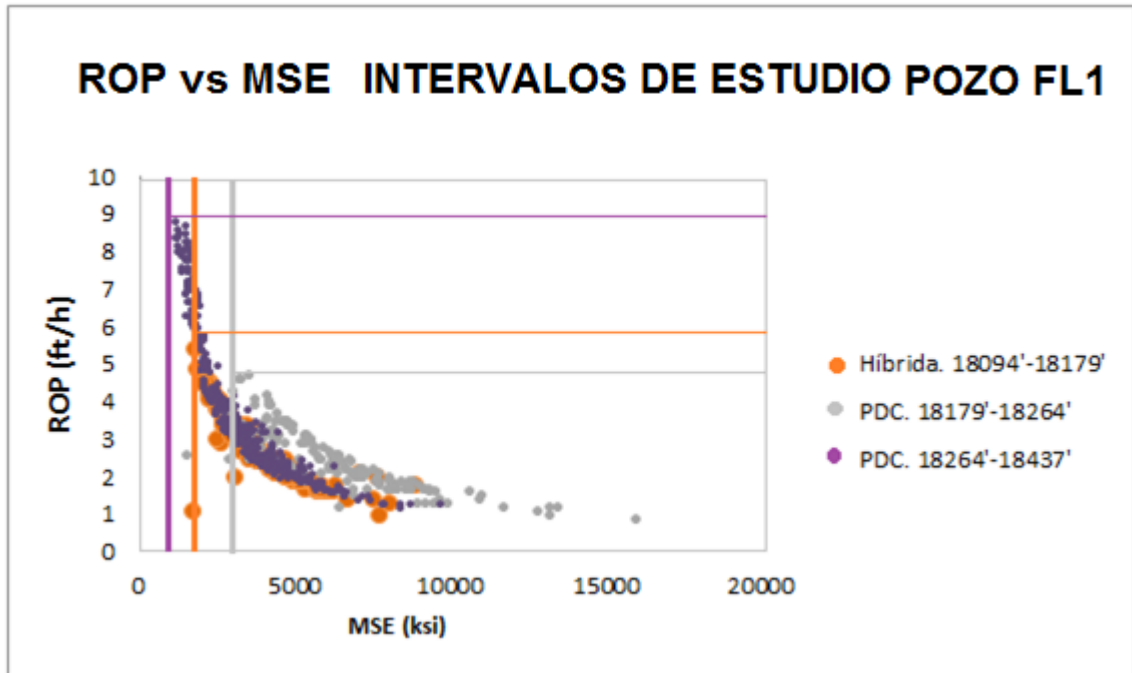
4.6.1 Relación entre la MSE y el ROP en los intervalos de estudio en los Pozos L1 y L2. Se presentan las gráficas ROP vs MSE correspondientes al desempeño de los intervalos de estudio en los Pozos L1 y L2 perforados con broca PDC y broca híbrida en la Formación Mirador y Formación Los Cuervos. Tal como se observa en dichas gráficas del comportamiento de la ROP y la MSE en relación con la secuencia litológica, se observa que en secciones de arena la ROP oscila entre 1 y 10 ft/h, mientras que en secciones con mayor presencia de arcilla y limolita se observan ROP entre 10 y 20 ft/h.

En la **Gráfica 12** se presenta la relación entre la MSE y la ROP en los intervalos A, B y C del Pozo L1 en la Formación Mirador. Inicialmente se observa que en el intervalo inferior a 3000 ksi de energía, se tiene mayor eficiencia en cuanto a la tasa de perforación con la broca PDC en la sección C, cuya curva se encuentra desplazada a la izquierda, indicando una mayor tasa de perforación con una menor cantidad de energía.

Asimismo, a partir de dicha gráfica puede obtenerse información acerca del motivo de retiro o pérdida de eficiencia de las brocas esto debido a que los tres intervalos en cuestión son consecutivos. De esta manera, una vez retirada de fondo la broca híbrida (A) y se comienza a perforar el segundo intervalo con una de las brocas PDC (B), la curva correspondiente a dicho intervalo (Curva gris) se observa casi en la mitad de la curva de la broca híbrida (Curva naranja), esto indica que la pérdida de eficiencia se estaba dando debido al desgaste y compresibilidad de la formación. Al analizar el comportamiento de la curva relacionada con el tercer intervalo de interés C (curva morada), se observa que esta se encuentra desplazada a la izquierda y con valores de ROP superiores, respecto a curva de la broca inmediatamente anterior B, esto indica que la pérdida de eficiencia de la broca PDC usada en el intervalo B se ocasionó principalmente por el desgaste de la misma.

De esta manera, según el comportamiento de las tres curvas en la **Gráfica 12** se observa que la broca cuyo mejor desempeño en cuanto a la energía mecánica específica y las ROP obtenidas es la broca PDC usada en el intervalo de B.

Gráfica 12. ROP vs MSE intervalos de estudio en el Pozo FL1 en la Formación Mirador

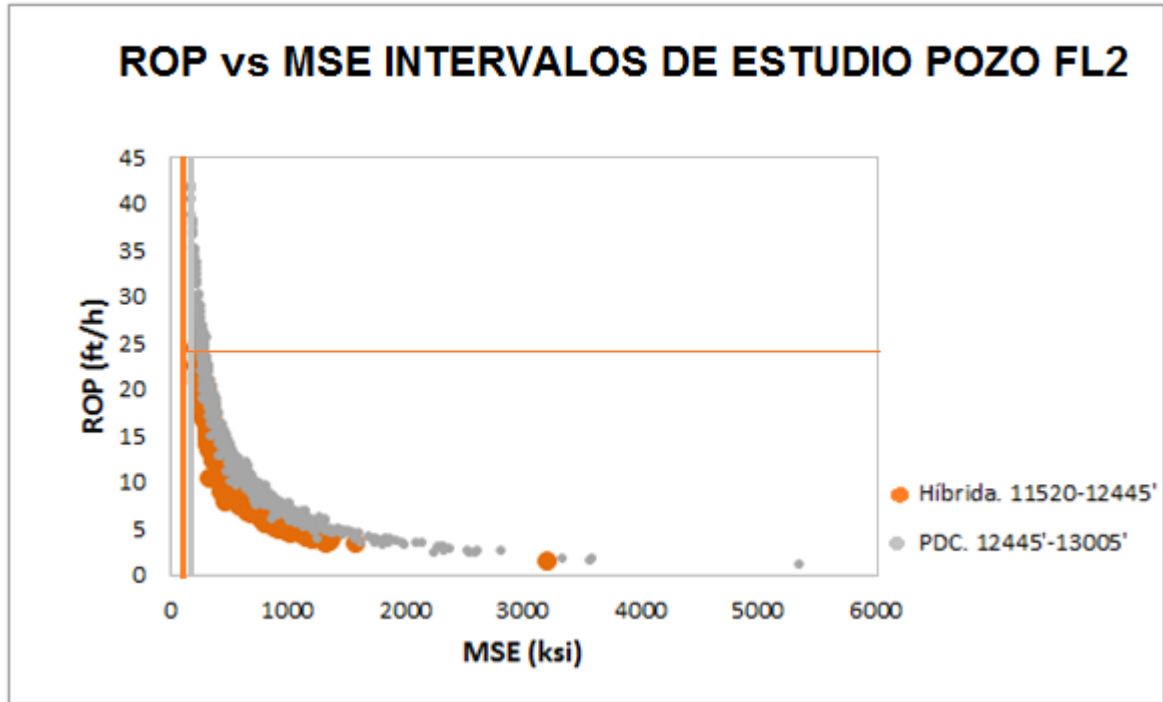


En la **Gráfica 13** se presenta la relación entre la MSE y la ROP referente al desempeño del intervalo de 11520 a 12445 pies (D) con broca híbrida y del intervalo de 12445 a 13005 pies (E) con broca PDC en el Pozo FL2 en la Formación Los Cuervos. Se observa que la curva correspondiente a la broca híbrida se encuentra ligeramente corrida a la izquierda de la curva de la broca PDC. Esto puede ser un indicador de mejor eficiencia de perforación pues se alcanza mejores ROP con una menor MSE.

En cuanto a los puntos correspondientes a la curva del intervalo 2 (12445 a 13005 pies) del Pozo FL2 que se encuentran entre 0 y 300 ksi aproximadamente, son un indicador de que la MSE en el intervalo anterior se incrementó debido al desgaste de la broca.

En dicha gráfica se observa un comportamiento similar entre la broca PDC y la broca híbrida en cuanto a la energía consumida por la broca para perforar la formación y las ROP observadas

Gráfica 13. ROP vs MSE intervalos de estudio del Pozo FL2 en la Formación Los Cuervos



5. ANÁLISIS FINANCIERO

Debido a la complejidad litológica propia del Piedemonte Llanero, área en la cual se encuentra ubicado el Campo Floreña, las operaciones de perforación se ven limitadas por los tiempos de operación, es por esto que la compañía de servicios Baker Hughes, implementó una nueva tecnología de broca híbrida, la cual integra el mecanismo de corte de una broca tricónica y el mecanismo de corte de una broca PDC, brindando mayor estabilidad y mejor eficiencia en formaciones con alta intercalación litológica.

En este proyecto se centró el estudio en dos pozos del Campo Floreña, en la sección 8 1/2", se comparó el desempeño de dos brocas PDC frente al desempeño de una broca híbrida en la Formación Mirador, la cual está compuesta principalmente por arena con presencia ocasional de lodolita y limolita, asimismo se compara el desempeño de una broca PDC y una broca híbrida en la Formación Los Cuervos, evaluando la eficiencia mecánica de cada broca, con base en los parámetros obtenidos tras su uso así como de la energía mecánica específica consumida en cada caso.

Se presenta el análisis de los costos de operación con uso de cada una de las brocas en los diferentes intervalos de estudio, el costo de la broca en cuestión, los pies perforados y el tiempo de operación. Para el cálculo de dicho tiempo se tiene en cuenta el tiempo efectivo, es decir el tiempo en el que la broca estuvo en fondo perforando, así como el tiempo de viaje. El indicador principal para efectuar una comparación entre los costos para cada caso de estudio es el costo por pie requerido para la perforación.

Se usa el dólar americano (USD) como unidad monetaria de valor constante. En cuanto a la tasa de interés de oportunidad (TIO) se maneja un valor de 12% efectivo anual el cual es usado por BAKER HUGHES para la evaluación de proyectos. Debido a que una campaña de perforación en el Campo Floreña tarda alrededor de ocho meses, se trabaja con periodos de tiempo de un año y se establece un horizonte de tiempo de cinco años.

5.1 TASA DE INTERÉS DE OPORTUNIDAD (TIO)

La tasa de interés de oportunidad está definida como la tasa de interés más alta sacrificada por un inversionista para la ejecución de un proyecto³². De esta manera, es la rentabilidad mínima que debe obtenerse del proyecto con el fin de determinar

³²BACA, Guillermo. Ingeniería Económica. Bogotá D.C.: Fondo educativo panamericano. 2005. p. 197.

su viabilidad. Para efectos del proyecto se usa una tasa de interés de oportunidad del 12% efectivo anual, la cual está dada por la compañía Baker Hughes para la evaluación de sus proyectos.

5.2 ANÁLISIS DE COSTOS (OPEX)

El OPEX u Operating Expenditures se define como los costos operativos y están dados por compras de género o servicios usados en la operación diaria de una compañía.

Se presentan los costos de operación para cada pozo en el intervalo de estudio correspondiente. Para esto, se calcula previamente el costo por pie para cada broca de estudio, el cual incluye el costo de la broca, el costo del taladro, el tiempo de viaje y el tiempo efectivo, tal como se muestra en la **Ecuación 5**. Para el cálculo del tiempo de viaje, se asume que la velocidad de perforación en hueco revestido es de 1000ft/h y en hueco abierto de 300ft/h. En la **Tabla 14** y en la **Tabla 15** se observa el costo por pie para cada intervalo de estudio en los Pozos FL1 y FL2 respectivamente.

Ecuación 5. Cálculo de costo por pie

$$CPF = \frac{\text{Costo taladro} * \text{Tiempo} + \text{Costo broca}}{\text{Pies perforados}}$$

Fuente: Baker Hughes Colombia. Cálculo de costo por pie.

Donde:

CPF: Costo por pie (USD/ft)

Costo taladro: (USD)

Tiempo: (h)

Costo broca: (USD)

Pies perforados: (ft)

Tabla 14. Costo por pie para la perforación de la Formación Mirador en la sección de 8 ½”, para los intervalos de estudio del Pozo FL1

Pozo	Pies perforados (ft)	Tiempo (h)	Costo por pie (USD/ft)
FL1 HIB(18094'-18179')	85	73,1628	11.740,63
FL1 PDC(18179'-18264')	85	79,44613	12.157,10
FL1 PDC(18264'-18437')	173	101,2228	7.483,66

Fuente: BAKER HUGHES. Reportes desempeño de las brocas de estudio para la sección 8 ½. Elaborado por el autor a partir de datos.

Tabla 15. Costo por pie para la perforación de la Formación Cuervos en la sección de 8 ½”, para los intervalos de estudio del Pozo FL2

Pozo	Pies perforados (ft)	Tiempo (h)	Costo por pie (USD/ft)
FL2 HIB(11520'-12445')	925	147,0521	2.037,43
FL2 PDC(12445'-13005')	560	94,98547	2.178,26

Fuente: BAKER HUGHES. Reportes desempeño de las brocas de estudio para la sección 8 ½. Elaborado por el autor a partir de datos.

En la **Tabla 14** se observa que el menor costo por pie perforado se obtiene con el uso de la broca PDC en el intervalo de 18264 a 18437 pies, razón por la cual esta es la broca PDC que se usa en la proyección del análisis financiero. En cuanto a la broca híbrida se tiene un costo por pie superior, debido a que en promedio tardó más tiempo perforando un pie de profundidad. Esto producto de la complejidad de la Formación Mirador así como de los parámetros con los cuales se operó dicha broca.

En la **Tabla 15** se obtuvo mejor resultados en cuanto al costo por pie con el uso de la broca híbrida, pues como ya se observó en capítulos anteriores bajo las condiciones de la Formación Los Cuervos, los parámetros bajo los cuales se operó dicha broca resultaron en un incremento en la eficiencia y pies perforados.

5.3 EVALUACIÓN FINANCIERA

Para efectos de la proyección de los costos y tomando como base de cálculo un escenario normal se asume un IPP de 4% anual el cual se establece observando el

comportamiento del IPP del año 2014 (6,33%)³³, 2015 (5,73%)³⁴ y lo corrido del año 2016 (Octubre. 3,37%)³⁵. Con este valor y con los costos por pie para las brocas de estudio en el periodo actual se calculó el costo total por broca para cada una de las formaciones durante el horizonte de proyección de cinco (5) años, como se presenta en la **Tabla 16** para la broca PDC tanto en la Formación Mirador como en la Formación Los Cuervos y en la **Tabla 17** para la broca híbrida tanto en la Formación Mirador como en la Formación Los Cuervos.

Para la proyección de los costos de la broca PDC en la Formación Mirador se escoge la mejor en cuanto al costo por pie obtenido previamente. De esta manera se tiene en cuenta la broca PDC usada en el intervalo de 18264 a 18437 pies.

Asimismo debe tenerse en cuenta que el espesor a perforar para cada formación se unifica, haciendo un promedio entre los pies perforados por las brocas ya corridas.

Tabla 16. Cálculo del costo total con el uso de broca PDC en la Formación Mirador y en la Formación Los Cuervos

Periodo (Años)	Pozo	Costo por pie (USD/ft)	Espesor a perforar (ft)	Costo total por broca (USD)
0	PDC Fm. Mirador (18264'-18437')	7.483,66	129	965.392
	PDC Fm. Los Cuervos (12445'-13005')	2.178,26	742	1.616.269
1	PDC Fm. Mirador (18264'-18437')	7.783,01	129	1.004.008
	PDC Fm. Los Cuervos (12445'-13005')	2.265,39	742	1.680.920
2	PDC Fm. Mirador (18264'-18437')	8.094,33	129	1.044.168
	PDC Fm. Los Cuervos (12445'-13005')	2.356,01	742	1.748.156
3	PDC Fm. Mirador (18264'-18437')	8.418,10	129	1.085.935
	PDC Fm. Los Cuervos (12445'-13005')	2.450,25	742	1.818.083
4	PDC Fm. Mirador (18264'-18437')	8.754,83	129	1.129.373
	PDC Fm. Los Cuervos (12445'-13005')	2.548,26	742	1.890.806
5	PDC Fm. Mirador (18264'-18437')	9.105,02	129	1.174.548
	PDC Fm. Los Cuervos (12445'-13005')	2.650,19	742	1.966.438

Fuente: BAKER HUGHES. Reportes desempeño de las brocas de estudio para la sección 8 ½. Elaborado por el autor a partir de datos.

³³REVISTA DINERO. Aumentó el índice de precios al productor durante 2014. Bogotá. 2015.

³⁴REVISTA DINERO. Variación total del IPP para el 2015. Bogotá. 2016.

³⁵DANE. Índice de precios del productor-IPP. Información Octubre de 2016.

Tabla 17. Cálculo de la inversión total con el uso de broca híbrida en la Formación Mirador y Formación Los Cuervos

Periodo (Años)	Pozo	Costo por pie (USD/ft)	Espesor a perforar (ft)	Costo total por broca (USD)
0	HIB Fm. Mirador (18094'-18179')	11.740,63	129	1.514.541
	HIB Fm. Los Cuervos (11520'-12445')	2.037,43	742	1.511.775
1	HIB Fm. Mirador (18094'-18179')	12.210,26	129	1.575.123
	HIB Fm. Los Cuervos (11520'-12445')	2.118,93	742	1.572.246
2	HIB Fm. Mirador (18094'-18179')	12.698,67	129	1.638.128
	HIB Fm. Los Cuervos (11520'-12445')	2.203,69	742	1.635.136
3	HIB Fm. Mirador (18094'-18179')	13.206,61	129	1.703.653
	HIB Fm. Los Cuervos (11520'-12445')	2.291,84	742	1.700.542
4	HIB Fm. Mirador (18094'-18179')	13.734,88	129	1.771.799
	HIB Fm. Los Cuervos (11520'-12445')	2.383,51	742	1.768.563
5	HIB Fm. Mirador (18094'-18179')	14284,2723	129	1.842.671
	HIB Fm. Los Cuervos (11520'-12445')	2478,84887	742	1.839.306

Fuente: BAKER HUGHES. Reportes desempeño de las brocas de estudio para la sección 8 ½. Elaborado por el autor a partir de datos.

5.3.1 Valor presente neto (VPN). Según GUILLERMO BACA³⁶, el VPN permite poner en pesos de hoy (en el caso del proyecto en dólares) los ingresos y los egresos futuros, lo cual facilita la decisión de un proyecto desde el punto de vista financiero, indicando si este es viable o no. De forma matemática el VPN es la sumatoria de los flujos de caja proyectados al día de hoy, lo cual se representa con la **Ecuación 6**. Para efectos del análisis financiero de proyecto se usa la metodología del valor presente, esto debido a que sólo se tienen en cuenta en la proyección los egresos representados por el costo por pie para cada broca en los intervalos de estudio, por lo cual en la proyección no se tienen en cuenta los ingresos.

Ecuación 6. Cálculo matemático del VPN

$$VPN = \sum F_n (1+i)^{-n} = F_0 + F_1(1+i)^{-1} + F_2(1+i)^{-2} + \dots + F_n(1+i)^{-n}$$

Fuente: BACA, Guillermo. Ingeniería económica. Bogotá D.C.: Fondo educativo panamericano. 2005. p.197.

Donde:

VPN: es el Valor presente neto.

F_n: es el flujo neto de efectivo en el periodo n.

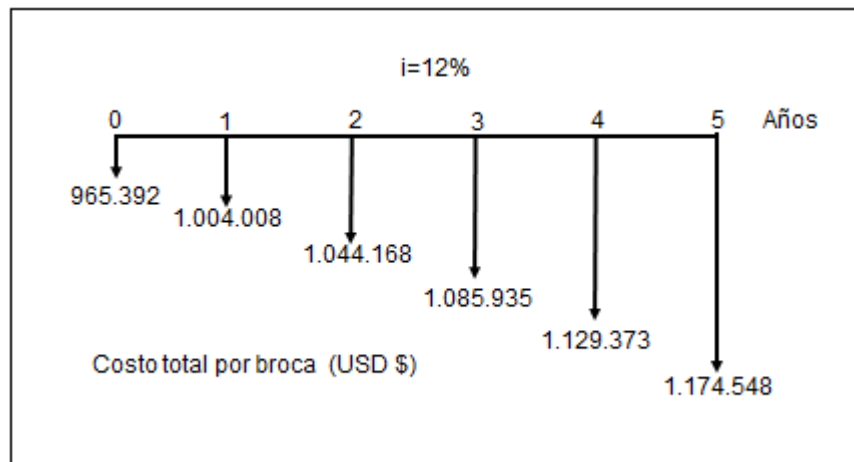
³⁶ BACA, Guillermo. Ingeniería económica. Bogotá D.C.: Fondo educativo panamericano. 2005. p.197.

i: es la tasa de interés de oportunidad (TIO).
 n: es el tiempo o periodo donde se evalúa.

5.3.1.1 Flujo de efectivo para la broca PDC y la broca híbrida en la Formación Mirador. A continuación se generan los flujos de efectivo presentados en la

Figura 16 y la **Figura 17** para la broca PDC usada en la Formación Mirador con base en la **Tabla 16** y la broca híbrida usada en la misma formación con base en la **Tabla 17** respectivamente.

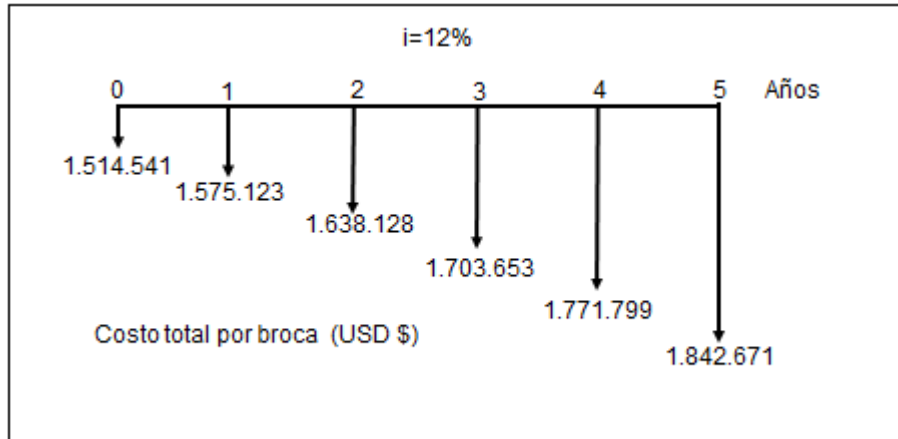
Figura 16. Flujo de efectivo para la broca PDC en la Formación Mirador.



Con estos flujos de efectivo se procede a calcular el VPN para la broca PDC en la Formación Mirador:

$$\begin{aligned}
 VPN = & (-965.392) + (-1.004.008) * (1 + 0,12)^{-1} + (-1.044.168) * (1 + 0,12)^{-2} \\
 & + (-1.085.935) * (1 + 0,12)^{-3} + (-1.129.373) * (1 + 0,12)^{-4} \\
 & + (-1.174.648) * (1 + 0,12)^{-5} = -4.851.387 \text{ USD}
 \end{aligned}$$

Figura 17. Flujo de efectivo para la broca híbrida en la Formación Mirador

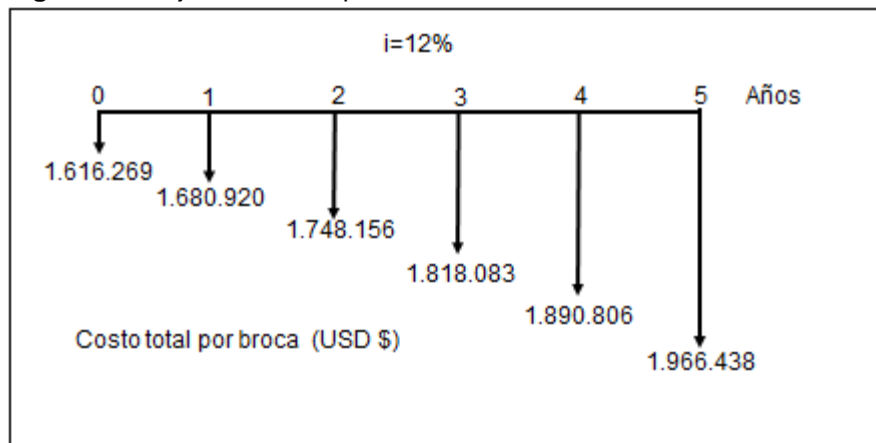


Con estos flujos de efectivo se procede a calcular el VPN para la broca híbrida en la Formación Mirador:

$$\begin{aligned}
 VPN = & (-1.514.541) + (-1.575.123) * (1 + 0,12)^{-1} + (-1.638.128) * (1 + 0,12)^{-2} \\
 & + (-1.703.653) * (1 + 0,12)^{-3} + (-1.771.799) * (1 + 0,12)^{-4} \\
 & + (-1.842.671) * (1 + 0,12)^{-5} = -7.611.025 \text{ USD}
 \end{aligned}$$

5.3.1.2 Flujo de efectivo para la broca PDC y la broca híbrida en la Formación Los Cuervos. En la **Figura 18** se presenta el flujo de efectivo para la broca PDC usada en la Formación Cuervos con base en la **Tabla 16** y en la **Figura 19** se observa el flujo de efectivo para la broca híbrida en la misma formación con base en la **Tabla 17**.

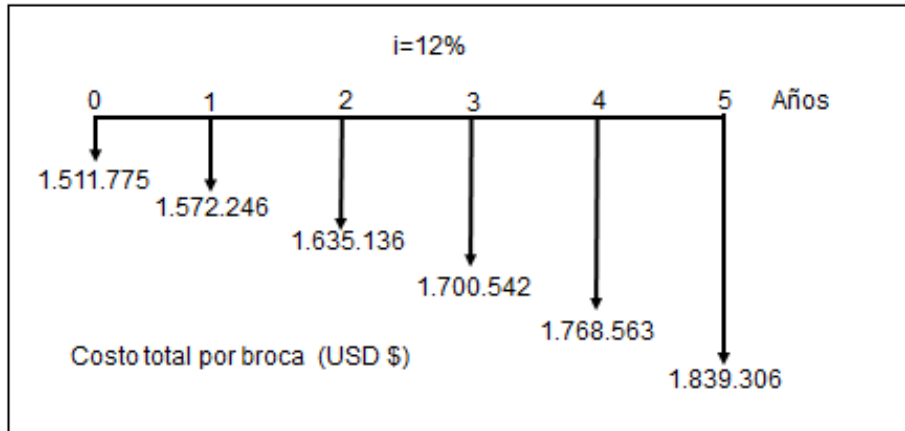
Figura 18. Flujo de efectivo para la broca PDC en la Formación Cuervos



Con estos flujos de efectivo se procede a calcular el VPN para la broca PDC en la Formación Cuervos:

$$\begin{aligned}
 VPN = & (-1.616.269) + (-1.680.920) * (1 + 0,12)^{-1} + (-1.748.156) * (1 + 0,12)^{-2} \\
 & + (-1.818.083) * (1 + 0,12)^{-3} + (-1.890.806) * (1 + 0,12)^{-4} \\
 & + (-1.966.438) * (1 + 0,12)^{-5} = -8.122.236 \text{ USD}
 \end{aligned}$$

Figura 19. Flujo de efectivo para la broca híbrida en la Formación Cuervos



Con estos flujos de efectivo se procede a calcular el VPN para la broca Híbrida en la Formación Cuervos:

$$\begin{aligned}
 VPN = & (-1.511.775) + (-1.572.246) * (1 + 0,12)^{-1} + (-1.635.136) * (1 + 0,12)^{-2} \\
 & + (-1.700.542) * (1 + 0,12)^{-3} + (-1.768.563) * (1 + 0,12)^{-4} \\
 & + (-1.839.306) * (1 + 0,12)^{-5} = -7.597.125 \text{ USD}
 \end{aligned}$$

En la **Tabla 18** se observa la proyección del costo total para cada broca tanto en la Formación Mirador como en la Formación Los Cuervos.

Tabla 18. Proyección a cinco años de los costos totales por broca por Formación.

Formación	Intervalo (Broca)	VPN (USD) a 5 años
Mirador	A (Híbrida)	7.611.025
	C (PDC)	4.851.387
Cuervos	D (Híbrida)	7.597.125
	E (PDC)	8.122.236

5.3.2 Diferencia en el costo total por broca proyectado a cinco años en la Formación Mirador. Se presenta el cálculo de la diferencia del costo total por broca, entre la broca PDC con costo proyectado a cinco años de 4.851.387 USD y la broca híbrida con la cual se obtiene un costo de 7.611.025 USD. Se observa que no se produce ahorro económico con el uso de la broca híbrida frente a la broca convencional, esto debido a los factores técnicos tratados en los capítulos anteriores.

$$\text{Ahorro} = 4.851.387 \text{ USD} - 7.611.025 = -2.759.638 \text{ USD}$$

5.3.3 Diferencia en el costo total por broca proyectado a cinco años en la Formación Los Cuervos. Se presenta el cálculo de la diferencia del costo total por broca, entre la broca PDC con costo proyectado a cinco años de 8.122.236 USD y la broca híbrida con la cual se obtiene un costo de 7.597.125 USD, representado el ahorro generado entre el uso de la broca convencional frente al uso de la broca híbrida.

$$\text{Ahorro} = 8.122.236 \text{ USD} - 7.597.125 \text{ USD} = 525.111 \text{ USD}$$

- **CONCLUSIÓN DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA**

Desde el punto de vista financiero la implementación de la broca híbrida para una campaña de perforación a cinco años es atractiva en la Formación Los Cuervos pues se genera un ahorro de 525.111 USD frente a los costos del proceso actual (broca PDC) en los intervalos de estudio en el Pozo FL2 en la Formación Los Cuervos.

6. CONCLUSIONES

- Las secuencias litológicas para los intervalos A, B y C en la Formación Mirador son similares entre sí, así como los intervalos D y E en la Formación Los Cuervos, razón por la cual los parámetros de perforación son comparables en cuanto a la litología atravesada.
- La broca híbrida implementada por la compañía Baker Hughes resulta en una buena opción al momento de la perforación de zonas con intercalación geológica brindando mayor estabilidad reduciendo el torque generado así como las fluctuaciones del mismo.
- El mejor desempeño en cuanto a pies perforados se da en la Formación Los Cuervos en el intervalo D perforado con broca híbrida con un avance de 925 pies perforando un 39,5% más que la broca PDC usada en el intervalo E con un avance de 560 pies en la misma formación.
- Debido a que los intervalos trabajados a lo largo del proyecto fueron perforados a diferentes profundidades, se considera que el estudio consiste en un modelo ideal, pues no se tuvo en cuenta la diferencia de compresibilidad de la formación.
- Desde el punto de vista financiero la implementación de la broca híbrida para una campaña de perforación a cinco años es favorable en la Formación Los Cuervos pues se genera un ahorro de 525.111 USD frente a los costos del proceso actual (broca PDC) en los intervalos de estudio en el Pozo L2 en la Formación Los Cuervos.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar una prueba Drill off test antes, durante y después de la corrida con las brocas de estudio con el fin de establecer los valores de los parámetros de perforación más convenientes operacionalmente.
- Trabajar con los parámetros de operación en el rango establecido con la prueba drill off test con el fin de evitar desgaste prematuro en la broca y obtener una perforación óptima en términos de MSE.
- Utilizar la broca híbrida de la compañía Baker Hughes en futuras perforaciones en la Formación Los Cuervos en pozos con características litológicas similares a las estudiadas, debido a su buena respuesta en cuanto a desempeño, pies perforados y tiempos de corrida.
- Optimizar parámetros de perforación aplicados en los intervalos de estudio con el uso de la broca híbrida en la Formación Mirador con el fin de mejorar su desempeño
- Implementar el uso de la broca híbrida en operaciones en donde el torque sea crítico, con el fin de brindar mayor estabilidad garantizando una perforación más óptima.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Producción Mensual de petróleo. Disponible [en línea] <<http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>> Bogotá. 2015.

BACA, Guillermo. Ingeniería económica. Bogotá D.C.: Fondo educativo panamericano. 2005. 413 p.

BAKER HUGHES. Drill Bit Foundation. A comprehensive introduction to drill bits. Versión 5.0. 2008.

BAKER HUGHES. Kymera: Todo en uno. Broca de perforación híbrida, tecnología con mejor desempeño en formaciones duras. En Revista CONNEXUS. No.1 p. 16-19 (2010)

BAKER HUGHES. Student Guide. Kymera Tech. (2011)

BARRERO, Darío. Colombian Sedimentary Basins. Cuenca de la Cordillera Oriental. 2007. p. 67.

Dolezal, T., Felderhoff, F., Holliday, A., Bruton, G., Expansion of Field Testing and Application of New Hybrid Drill Bit, Paper SPE 146737 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, USA, 30 October – 2 November 2011, page 1-11

DUEÑAS, Daniel y Romero, Juan. Evaluación del impacto de la potencia hidráulica de la perforación en los Pozos del Campo Floreña. Bogotá, 2015. Universidad de América. Facultad de ingenierías.

FEDESARROLLO. Evaluación económica de los contratos de Asociación Piedemonte y Recetor. [En línea] [01 Septiembre de 2015] disponible en: <http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/11445/1348/1/Repор_Agosto_1996_Fedesarrollo.pdf >

HOLLIDAY, A. Technology Update: Directional Hybrid Drill Bit Pushes Performance Standards. Paper SPE 0215-0036-JPT (Febrero 2015), page 1-2

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Trabajos escritos: presentación y referencias bibliográficas. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008. 110 p

JULIVERT, M. Lexique Stratigraphique International Amérique Latine: Colombie, v. 5. 1968.

NGUYEN, Don Tuan. Drill Bits Technology – Introduction of The New Kymera Hybrid Drill Bit. Stavanger, 2012. Tesis de maestría (Ingeniero de petróleo con especialización en perforación). Universidad de Stavanger. Facultad de ciencias y tecnología. Departamento de ingeniería de petróleo. 68 p.

NOSTESTEIN F, HUBMAN C.W. y BOWLER J.W., Geology of the Barco Concession, República de Colombia, Sur América, 1944, 572p.

PESSIER, R., & Damschen, M. Hybrid Bits Offer Distinct Advantages in Selected Roller-Cone and PDC Bit Applications. Paper SPE 128741-MS. New Orleans, Louisiana, USA Febrero 2010, page 1-9

PESSIER, Rolf. Quantifying Common Drilling Problems With Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction. SPE 24584. 1992. 16 p.

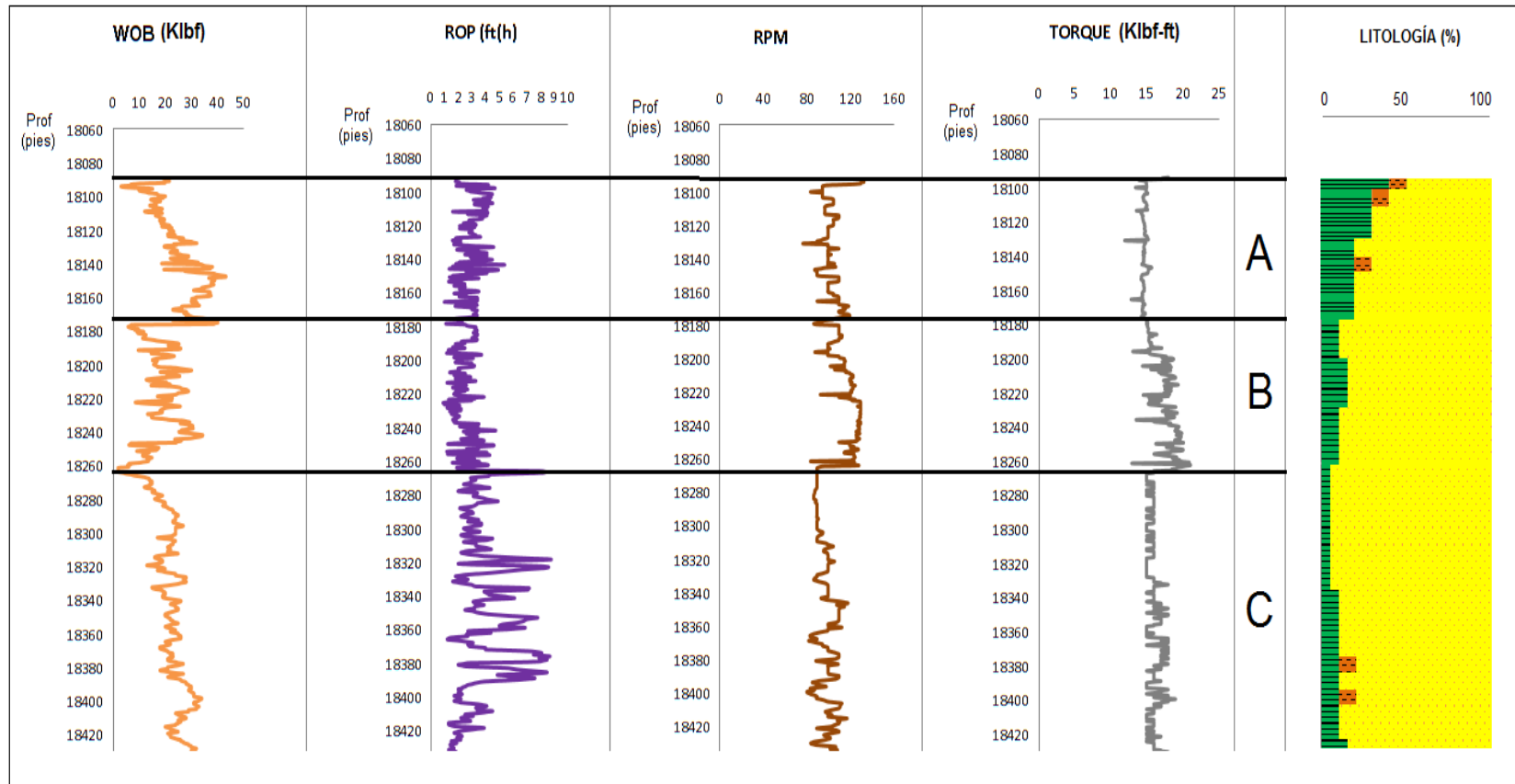
PORTILLA, Helmuth. Metodología para la optimización de parámetros de perforación a partir de propiedades geomecánicas. 2012. 7.p

TEALE, R. The concept of specific energy in rock drilling. Citado por PESSIER, R.C. "Quantifying Common Drilling Problems with Mechanical Specific Energy and a Bit-Specific Coefficient of Sliding Friction". SPE 24584. 1992. p.1

VAN DER HAMMEN. Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y tectogénesis de los Andes Colombian 1958.

ANEXOS

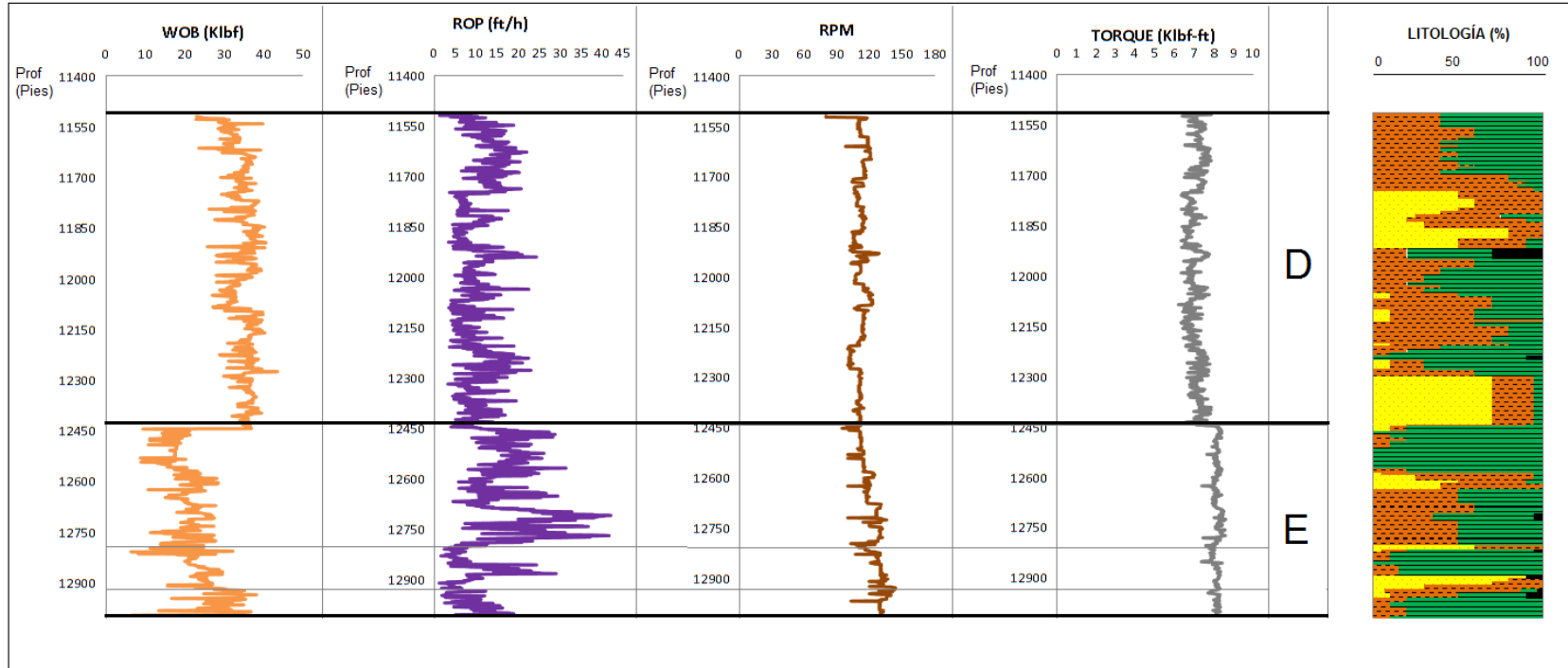
ANEXO A.
VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN RESPECTO A LA PROFUNDIDAD EN LOS INTERVALOS A, B Y C EN EL POZO L1



Fuente: BAKER HUGHES, Desempeño de la broca 8 ½". Intervalo de 18094 a 18437 pies en el pozo L1. Bogotá. Modificado por el autor

ANEXO B.

VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PERFORACIÓN RESPECTO A LA PROFUNDIDAD EN LOS INTERVALOS D Y E EL POZO L2



Fuente: BAKER HUGHES, Desempeño de la broca 8 ½". Intervalo de 11520 a 13005 pies en el pozo L2 Bogotá. Modificado por el autor

ANEXO C.

HOJA TÉCNICA BROCA USADA EN EL INTERVALO 18094-18179 PIES EN EL POZO L1.

BAKER HUGHES
 **8 1/2" HP524**
 (mm)



Reference Photo: 8-1/2 in. (215.9mm) HP524

- **Best of Both Worlds** Designed to take advantage of the best attributes of both, Kymera combines roller cone and fixed cutter elements.
- **StaySharp Polished Cutters** Baker Hughes patented StaySharp polished cutters improve drilling efficiency by reducing balling. Polishing eliminates buildup on the cutter face, enhancing cutting action and cuttings removal from the face of the bit. The industry's only polished cutters
- **Improved Directional Control** Relative to PDC bits, Kymera generates lower overall torque and minimized torque fluctuations to improve tool face control and reduce vibrations.
- **Faster and More Durable** When drilling interbedded and harder formations, relative to PDC bits, this unique design provides increased durability in transition zones and smoother, faster drilling in hard rock.
- **Higher overall ROP** Maintains PDC-equivalent ROP in soft formations while increasing ROP in harder formations typically drilled by roller cone bits.

Product Specifications	
Number of Blades:	4
Primary Cutter Size	.625 in (15.8 mm)
Cutting Structure:	
Inner Row	CONIC
Heel Row	CONIC
Gauge Row	PDC
Bearing / Seal Package:	Journal / Metal
Number of Nozzles:	4
Nozzle Type:	2 PORT, 2 CSP
Fixed TFA	.3 in ² (193.5 mm ²)
Gauge Length/Makeup Length	4.625 in (117.4 mm) / 12.372 in (314.2 mm)
Bit Breaker:	P
Connection:	4-1/2 API REG
Makeup Torque:	
5 1/2" Bit Sub	12.5 - 13.7 kft-lb (17.0 - 18.6 kNm)
5 3/4" Bit Sub	16.5 - 18.0 kft-lb (22.4 - 24.4 kNm)
6"+ Bit Sub	17.6 - 19.5 kft-lb (23.9 - 26.4 kNm)
Approx. Shipping Weight:	114.31 lb
Reference Part Number:	X20608

Operating Recommendations*:

Hydraulic Flow Rate:	300 - 750 gpm (1150 - 2850 lpm)
Rotation Speed:	For Rotary and Motor Applications
Max. Weight On Bit:	Please see your Local BHI Representative for Recommendation

Fuente: BAKER HUGHES. Hojas técnicas sección 8 1/2" para el Pozo L1. Bogotá.

ANEXO D.

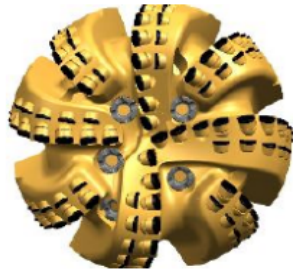
HOJA TÉCNICA BROCA USADA EN EL INTERVALO 18179-18264 PIES EN EL POZO L1.

BAKER HUGHES 8 1/2"
Q408FX
(215.9 mm)

Quantec Force™



Reference Photo: 8-1/2 in. (215.9mm) Q408FX



- **Application** Quantec PDC bits combine the very latest in HCC bit technology: Best in Class cutter technology, superior stability and hydraulic efficiency together with a design philosophy that is tailored to your drilling objectives. Designs are customized to achieve continual performance improvement in the toughest applications.
- **Diamond Volume Management** Diamond Volume Management (DVM) designs ensure that neither ROP or stability is compromised in the bit design. Profile and cutter placement are tailored to the application in order to achieve the longest run length at high overall ROP.
- **Quantec Force Cutters** These cutters are the result of the very latest in diamond manufacturing technology. The interface between the diamond table and carbide substrate has been optimized for even greater durability and thermal stability. These application specific cutters have been field-proven as being 6 times more wear resistant than anything that preceded them.
- **Gauge Protection** High quality TSP material is utilized to give superior wear resistance and thus long bit runs. Optional Hex-shaped TSP material allows tighter packing for ultra abrasive environments.
- **DART Process** Each QUANTEC project receives the attention of a multi-functional team of Design, Application and Research (DART) engineers. This process provides an in-depth analysis of the drilling challenges, and delivers an Application Specific QUANTEC PDC bit along with access to expert drilling advice. The DART process has been proven to deliver quicker results and lower drilling costs.

Product Specifications	
IADC:	M433
Number of Blades:	8
Cutter Quantity (Total, Face):	103, 73
Primary Cutter Size:	.529 in (13.4 mm)
Number of Nozzles:	8
Nozzle Type:	5 MSP, 3 PORT
Fixed TFA:	.23 in ² (148.3 mm ²)
Gauge Length:	2 in (50.8 mm)
Junk Slot Area:	11.832 in ² (76.3 cm ²)
Bit Breaker:	Q
Connection:	4-1/2 API REG
Makeup Torque:	
5 1/2" Bit Sub	12.5 - 13.7 kft-lb (17.0 - 18.6 kNm)
5 3/4" Bit Sub	16.5 - 18.0 kft-lb (22.4 - 24.4 kNm)
6"+ Bit Sub	17.6 - 19.5 kft-lb (23.9 - 26.4 kNm)
Reference Part Number:	X15883

Operating Recommendations*:

Hydraulic Flow Rate: 300 - 750 gpm (1150 - 2850 lpm)
 Rotation Speed: For Rotary and Motor Applications
 Max. Weight On Bit: 66 klb (29 tn or kdaN)

*The ranges of bit weight and RPM shown are representative of typical operating parameters, but will not necessarily yield optimum bit life or lowest drilling cost. It is not recommended that the upper limits of both weight and RPM be run simultaneously. Contact your local Hughes Christensen representative for recommendations in your area.

www.bakerhughes.com

Fuente: BAKER HUGHES. Hojas técnicas sección 8½" para el Pozo L1. Bogotá.

ANEXO E.

HOJA TÉCNICA BROCA USADA EN EL INTERVALO 18264-18438 PIES EN EL POZO L1.

BAKER HUGHES 8 1/2" DP508X
(mm)

Talon™



- **DART Approved** The well balanced and experienced Drilling Application Review Team (DART) carefully analyze the application to propose the right solution for your needs. The Network Behind the Solution.
- **Optimized Hydraulic Efficiency** Complete junk slot mapping, increased blade standoff and diverging junk slots are just some of the design elements that provide hydraulic efficiency in low-HSI applications. Also, the use of newly advanced Computational Fluid Dynamic (CFD) techniques ensure flow field in each junk slot, maximizing cuttings evacuation.
- **Talon Optimized Blade Profile** Optimized blade profiles improve drilling dynamics and efficiency, promoting a smooth cutting action.
- **StaySharp™ Polished Cutter Technology** StaySharp polished cutters are tailored to improve abrasion and impact resistance as well as diamond degradation mitigation. In addition, polished cutters eliminate buildup on the cutter face, enhancing cutting action and cuttings removal increasing performance.

Reference Photo: 8-1/2 in. (215.9mm) T508X



Product Specifications	
IADC:	M423
Number of Blades:	8
Cutter Quantity (Face, Backup):	37, 21
Primary Cutter Size	.625 in (15.8 mm)
Number of Nozzles:	8
Nozzle Type:	8 MSP
Fixed TFA	0 in ² (0.0 mm ²)
Gauge Length/Makeup Length	3 in (76.1 mm) / 11.061 in (280.9 mm)
Junk Slot Area	11.361 in ² (73.2 cm ²)
Bit Breaker:	U
Connection:	4-1/2 API REG
Makeup Torque:	
5 1/2" Bit Sub	12.5 - 13.7 kft-lb (17.0 - 18.6 kNm)
5 3/4" Bit Sub	16.5 - 18.0 kft-lb (22.4 - 24.4 kNm)
6"+ Bit Sub	17.6 - 19.5 kft-lb (23.9 - 26.4 kNm)
Reference Part Number:	X21073DB

Operating Recommendations*:

Hydraulic Flow Rate: 300 - 750 gpm (1150 - 2850 lpm)
 Rotation Speed: For Rotary and Motor Applications
 Max. Weight On Bit: 39 klb (17 tn or kdaN)

Fuente: BAKER HUGHES. Hojas técnicas sección 8½" para el Pozo L1. Bogotá.

ANEXO F.

HOJA TÉCNICA BROCA USADA EN EL INTERVALO 11520-12445 PIES EN EL POZO L2.

BAKER HUGHES **8 1/2" KM522X**
(215.9 mm)



Reference Photo: 8-1/2 in. (215.9mm) KM522X

- **Best of Both Worlds** Designed to take advantage of the best attributes of both, Kymera combines roller cone and fixed cutter elements.
- **StaySharp Polished Cutters** Baker Hughes patented StaySharp polished cutters improve drilling efficiency by reducing balling. Polishing eliminates buildup on the cutter face, enhancing cutting action and cuttings removal from the face of the bit. The industry's only polished cutters
- **Improved Directional Control** Relative to PDC bits, Kymera generates lower overall torque and minimized torque fluctuations to improve tool face control and reduce vibrations.
- **Faster and More Durable** When drilling interbedded and harder formations, relative to PDC bits, this unique design provides increased durability in transition zones and smoother, faster drilling in hard rock.
- **Higher overall ROP** Maintains PDC-equivalent ROP in soft formations while increasing ROP in harder formations typically drilled by roller cone bits.

Product Specifications	
Number of Blades:	2
Primary Cutter Size	.625 in (15.8 mm)
Cutting Structure:	
Inner Row	CONIC
Heel Row	CONIC
Gauge Row	PDC
Bearing / Seal Package:	Journal / Metal
Number of Nozzles:	4
Nozzle Type:	SP, Port
Fixed TFA	.3 in ² (193.5 mm ²)
Gauge Length	5 in (127.0 mm)
Bit Breaker:	Q
Connection:	4-1/2 API REG
Makeup Torque:	
5 1/2" Bit Sub	12.5 - 13.7 kft-lb (17.0 - 18.6 kNm)
5 3/4" Bit Sub	16.5 - 18.0 kft-lb (22.4 - 24.4 kNm)
6"+ Bit Sub	17.6 - 19.5 kft-lb (23.9 - 26.4 kNm)
Approx. Shipping Weight:	145 lb
Reference Part Number:	X17364

Operating Recommendations*:

Hydraulic Flow Rate:	300 - 750 gpm (1150 - 2850 lpm)
Rotation Speed:	For Rotary and Motor Applications
Max. Weight On Bit:	Please see your Local BHI Representative for Recommendation

Fuente: BAKER HUGHES. Hojas técnicas sección 8½" para el Pozo L2. Bogotá.

ANEXO G.

HOJA TÉCNICA BROCA USADA EN EL INTERVALO 12445-13005 PIES EN EL POZO L2.



8 1/2" T508X
(215.9mm)

Talon™



Reference Photo: 8-1/2 in.
(215.9mm) T508X



- **DART Approved**
The well balanced and experienced Drilling Application Review Team (DART) carefully analyze the application to propose the right solution for your needs. The Network Behind the Solution.
- **Optimized Hydraulic Efficiency**
Complete junk slot mapping, increased blade standoff and diverging junk slots are just some of the design elements that provide hydraulic efficiency in low-HSI applications. Also, the use of newly advanced Computational Fluid Dynamic (CFD) techniques ensure flow field in each junk slot, maximizing cuttings evacuation.
- **Talon Optimized Blade Profile**
Optimized blade profiles improve drilling dynamics and efficiency, promoting a smooth cutting action.
- **StaySharp®; Polished Cutter Technology**
StaySharp polished cutters are tailored to improve abrasion and impact resistance as well as diamond degradation mitigation. In addition, polished cutters eliminate buildup on the cutter face, enhancing cutting action and cuttings removal increasing performance.

Product Specifications	
IADC:	M423
Number of Blades:	8
Cutter Quantity (Face, Backup):	38, 23
Primary Cutter Size:	.625 in (15.8 mm)
Number of Nozzles:	4
Nozzle Type:	4 CSP, 4 FX
Fixed TFA:	.442 in sq. (285.0 mm sq.)
Gauge Length/Makeup Length:	3 in (76.1 mm) / 11.061 in (280.9 mm)
Junk Slot Area:	11.883 in sq. (76.6 cm sq.)
Bit Breaker:	123287565, 123292621
Connection:	4-1/2 API REG
Makeup Torque:	
5 1/2" Bit Sub	12.5 - 13.7 kft-lb (17.0 - 18.6 kNm)
5 3/4" Bit Sub	16.5 - 18.0 kft-lb (22.4 - 24.4 kNm)
6"+ Bit Sub	17.6 - 19.5 kft-lb (23.9 - 26.4 kNm)
Reference Part Number:	X21361DB
Attribute Name	Attribute Value

Operating Recommendations: *


Hydraulic Flow Rate:	300 - 750 gpm (1150 - 2850 lpm)
Rotation Speed:	For Rotary and Motor Applications
Max. Weight On Bit:	40 klb (18 tn or kdaN)

* The ranges of bit weight, RPM and max gpm shown is representative of typical operating parameters, but will not necessarily yield optimum bit life or lowest drilling cost. It is not recommended that the upper limits of both weight and RPM be run simultaneously. Contact your local Hughes representative for recommendations in your area.

** Recommend solids content of fluid to be approximately 3% or less.

www.bakerhughes.com

Fuente: BAKER HUGHES. Hojas técnicas sección 8 1/2" para el Pozo L2. Bogotá.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES




Yo MARÍA JOSÉ LLANES PARDO en calidad de titular de la obra EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA MECÁNICA DE BROCA HÍBRIDA EN LA PERFORACIÓN DE LA SECCIÓN 8 ½ " EN EL PIEDEMONTA LLANERO, elaborada en el año 2016, autorizo al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que me corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autor manifiesto conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor establezco las siguientes condiciones de uso de mi obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	X
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a su autor.

De igual forma como autor autorizo la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, D.C a los 9 días del mes de Marzo del año 2017.

EL AUTOR:

Nombres	Apellidos
MARÍA JOSÉ	LLANES PARDO
Documento de identificación No	Firma
1018467159	