

ANALISIS COMPARATIVO DE LA TECNOLOGÍA “SLIM HOLE” CON LA
PERFORACIÓN CONVENCIONAL DE POZOS

CESAR EDUARDO LOPEZ PEÑALOZA
HOLMAN SUA GOMEZ



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2011

ANALISIS COMPARATIVO DE LA TECNOLOGÍA “SLIM HOLE” CON LA
PERFORACIÓN CONVENCIONAL DE POZOS

CESAR EDUARDO LOPEZ PEÑALOZA
HOLMAN SUA GOMEZ

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director:
MSc. HERNANDO BUENDIA

Codirector:
MSc. EMILIANO ARIZA



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN CAMPOS MADUROS
BUCARAMANGA

2011

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	15
1. PERFORACION SLIM HOLE	16
1.1 EN QUE CONSISTE LA PERFORACIÓN SLIM HOLE	16
1.1.1 Definición	16
1.1.2 Aplicaciones.....	17
1.1.3 Tipos de equipos de perforación Slim Hole.....	18
1.1.4 Limitaciones y desventajas de la perforación SLIM HOLE	20
1.1.4.1 Fallas en la sarta de perforación	20
1.1.4.2 Fallas del Tool Joint.....	21
1.1.4.3 Detección de patadas.....	21
1.1.4.4 Pérdidas de presión.....	21
1.1.4.5 Descenso en la tasa de penetración	22
1.1.4.6 Profundidad.	22
1.1.4.7 Cara del pozo y estabilidad.	23
1.1.4.8 Producción.....	23
1.1.4.9 Herramientas.	24
1.1.5 Requerimientos técnicos adecuados de la tecnología SLIM HOLE	24
1.1.5.1 Pruebas hidráulicas	28
1.1.5.2 Revisión de los equipos y procedimientos	29
1.1.5.3 Tuberías.....	29
1.1.5.4 Selección del revestimiento.....	30
1.1.5.5 Poder de aporte del pozo	30
1.1.5.6 Tasa de perforación.....	30
1.1.5.7 Altas densidades equivalentes de circulación.....	31
1.1.5.8 Limitaciones de profundidad.....	31
1.1.5.9 Pruebas de pozo.	31
1.1.5.10 Cementación.....	31
1.1.5.11 Control de pozo	32
1.1.5.12 Pega diferencial.....	32

1.1.5.13 Diámetros de perforación del hueco.	32
2. COMPARACION DE LA TECNOLOGIA SLIM HOLE CON LA PERFORACIÓN CONVENCIONAL	33
2.1 PERFORACIÓN EXPLORATORIA EN AREAS REMOTAS.....	33
2.2 PERFORACIÓN DE POZOS DE DESARROLLO.....	38
2.3 REENTRADA EN POZOS EXISTENTES	41
2.4 IMPACTO AMBIENTAL.....	45
2.5 ANALISIS DE COSTOS	47
3. EVALUACION DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGIA SLIM HOLE EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO.....	52
3.1 PERFORACIÓN INFILL	52
3.1.1 Antecedentes de la perforación Infill	53
3.1.2 En que consiste la perforación Infill.....	56
3.2 DESCRIPCION DEL CAMPO ESCUELA COLORADO.....	61
3.2.1 Ubicación geográfica del Campo Escuela Colorado.....	61
3.2.2 Reseña Histórica	63
3.2.3 Marco regional.....	63
3.2.4 Estratigrafía de la cuenca del Valle Medio del Magdalena	65
3.2.5 Pre-Cretáceo	66
3.2.5.1 Formación Girón.....	66
3.2.6 Cretáceo	66
3.2.6.1 Formación Los Santos-Tambor.....	66
3.2.6.2 Formación Rosa Blanca	67
3.2.6.3 Formación Paja.....	67
3.2.3.4 Formación Tablazo.....	67
3.2.3.5 Formación Simití.....	68
3.2.3.6 Formación La Luna.....	68
3.2.3.7 Formación Umir.....	68
3.2.7 Terciario.....	68
3.2.7.1 Formación Lisama.....	69
3.2.7.2 Formación La Paz.....	70
3.2.7.3 Formación Esmeraldas.....	70

3.2.7.4 Formación Mugrosa.....	70
3.2.7.5 Formación Colorado.	70
3.2.7.6 Formación Real.	71
3.2.8 Historia de producción del Campo Escuela Colorado.....	72
3.3 ANALISIS TECNICO	74
3.3.1 Diseño básico de la perforación convencional	74
3.3.1.1 Pozo Colorado 39.....	78
3.3.1.2 Características del pozo Colorado 39	80
3.3.2 Diseño básico de perforación Slim Hole	83
3.3.2.1 Programa de perforación para la Tecnología Slim Hole	83
3.4 ANALISIS AMBIENTAL	87
3.4.1 Volumen de ripios y lodo	87
3.4.2 Locación	90
3.5 ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO	92
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES.....	99
BLIBLIOGRAFIA.....	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equipo de perforación no convencional Slim hole EF-50	18
Figura 2. Equipo de perforación no convencional Slim hole EF-75.....	19
Figura 3. Programa típico de comparación de Casing.....	25
Figura 4. Reducción en área y en costos del sitio en Slimhole	33
Figura 5. Completamiento Slimhole de BP en el Campo Plungar	35
Figura 6. Esquema del pozo Nyangou-1	36
Figura 7. Esquema de la operación section milling.....	42
Figura 8. Esquema del window milling.....	43
Figura 9. Section milling perforado con casing de 7" y desviación, en Oklahoma.	44
Figura 10. Ahorro para diferente tipos de reentrada.....	45
Figura 11. Mapas típicos de contorno de ruido de los equipos Slimhole (a) y equipo convencional (b). Los ejes horizontales y verticales representan la distancia en metros desde el centro del equipo. Las circunferencias representan los niveles de ruido en db.	46
Figura 12. Factor de costo por movimiento.....	48
Figura 13. Factor de levantamiento del equipo respecto al tamaño del hueco.	49
Figura 14. Factor de costo diario del equipo respecto al tamaño del hueco.	49
Figura 15. Costo por metro perforado.....	50
Figura 16. Comparación estándar de costos a profundidad total.....	51
Figura 17. Producción del campo Raja después del proyecto Infill.....	54
Figura 18. Grafica de la producción, Unidad de North Riley.....	55
Figura 19. Grafica de la producción, Unidad de Dollarhide.....	56
Figura 20. Producción vs. Tiempo.....	57
Figura 21. Mejoras de la discontinuidad por la perforación Infill.....	58
Figura 22. Modificación del patrón de inyección.....	59
Figura 23. Ubicación Campo Colorado.....	62
Figura 24. Columna estatigráfica generalizada Cuenca VMM.....	65
Figura 25. Distribución de los pozos para Campo Escuela Colorado.....	69

Figura 26. Historia de Producción del Campo Colorado.....	73
Figura 27. Declinación Actual del Campo.	73
Figura 29. Comparación grafica de los pozos Colorado 36, 37 y 39	77
Figura 28. Ubicación Pozo Colorado 39 en el Bloque 5.	78
Figura 30. Columna estratigráfica generalizada del VMM con las zonas de interés.	79
Figura 31. Diseño pozo Convencional Colorado 39.....	81
Figura 32. Esquema para capacidad de lodo en el pozo convencional.....	82
Figura 33. Diseño pozo Slimhole.....	84
Figura 34. Esquema para capacidad de lodo en pozo Slimhole.....	83
Figura 35. Cantidad de ripio para cada perforación dependiendo del exceso. .	90
Figura 36. Reducción del area de la perforación Slim Hole respecto a la convencional	91
Figura 37. Gasto total de cemento según la perforación.	94
Figura 38. Gastos de casing de superficie según la perforación	95
Figura 39. Gastos de casing de producción según la perforación.....	96
Figura 40. Tiempo de perforación requerido según cada caso para alcanzar 8000 pies	97
Figura 41. Costo total de alquiler de taladro según la perforación	98
Figura 42. Comparación de costos para perforar 8000 pies.....	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificación técnica de los equipos de perforación no convencional Slim Hole.....	15
Tabla 2. Ejemplo de pozos Slim Hole en Colombia.....	16
Tabla 3. Comparación de costos para un pozo en Canadá a 5000 ft.....	39
Tabla 4. Composición del combustible y emisiones de gas para unidad CTD, equipo Slimhole y equipo convencional.	47
Tabla 5. Comparación de los pozos Colorado.	75
Tabla 6. Tamaño del hueco del pozo Convencional	80
Tabla 7. Revestimiento del hueco del pozo convencional	80
Tabla 8. Cementación pozo convencional.	81
Tabla 9. Cantidad del lodo del pozo convencional Colorado 39.....	83
Tabla 10. Tamaño del hueco para Slimhole.....	84
Tabla 11. Revestimiento para Slimhole.....	85
Tabla 12. Sacos de cemento requeridos en toda la longitud.	86
Tabla 13. Capacidad total de lodo en el pozo Slimhole.	87
Tabla 14. Volumen de ripios para Colorado 39 con 1,5 de exceso	88
Tabla 15. Volumen de ripio para Slim Hole con 1,5 de exceso	88
Tabla 16. Volumen de ripios para Colorado 39 con 3 de exceso	89
Tabla 17. Volumen de ripios para Slim Hole con 3 de exceso.....	89
Tabla 18. Disminución originada por la perforación Slim Hole	91
Tabla 19. Comparación del equipo convencional y Slimhole.....	92
Tabla 20. Comparación en gastos de cemento.....	93
Tabla 21. Comparación en costos de casing de superficie.....	94
Tabla 22. Comparación en costos de casing de producción	95
Tabla 23. Análisis de costos para una perforación de 8000 pies.....	97

RESUMEN

TITULO:
ANALISIS COMPARTIVO DE LA TECNOLOGIA "SLIM HOLE" CON LA PERFORACIÓN CONVENCIONAL DE POZOS.*

AUTORES:
LOPEZ Peñaloza Cesar Eduardo
SUA Gómez Holman **

PALBRAS CLAVES:

Perforación realizada con diámetro reducido
Material originado por la perforación del suelo
Pozo de producción secundaria
Cantidad de crudo para produce

DESCRIPCION:

Durante el último medio siglo, la industria del petróleo y del gas ha estado utilizando en forma continua la tecnología de perforación Slim Hole para mejorar los resultados de exploración, para conseguir mejores resultados económicos y reducir los costos del proyecto sobre los ya estimados en un proyecto convencional, fundamentados principalmente en el uso de diámetros reducidos, tamaños más pequeños en los equipos de perforación, menos cemento, menos fluidos de perforación y menor disposición de ripios, así como la capacidad de perforar el pozo y completarlo en un periodo de tiempo más corto.

Actualmente la producción de hidrocarburos se enfoca en los campos maduros por la poca cantidad de hallazgos petrolíferos. En este trabajo se propone la viabilidad de aplicar la tecnología Slim Hole como un pozo infill en el Campo Escuela Colorado. El propósito de este trabajo es ver la aplicabilidad para incrementar las reservas a un bajo costo de exploración y un periodo de tiempo menor de operación comparado con la perforación convencional en Colombia, teniendo en cuenta la preparación adecuada y cumplimiento de los requerimientos técnicos que implica la tecnología para garantizar un programa de campo seguro y eficiente, teniendo en cuenta sus grandes ventajas técnicas, económicas y ambientales.

* Trabajo de grado.

** UIS. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, grupo de investigación campos maduros, director: Msc. BUENDÍA Hernando, codirector: Msc. ARIZA Emiliano

ABSTRACT

TITTLE:
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY "SLIM HOLE" WHIT CONVENTIONAL
DRILLING IN WELLS

AUTHORS:
LOPEZ Peñaloza Cesar Eduardo
SUA Gómez Holman

KEYWORDS:
Small diameter drilling made
Material from the soil drilling
Secondary production well
Amount of oil production

DESCRIPTION:

During the last half of century, Petroleum and Gas industry has been using constantly the latest drilling technology: "Slim Hole". This technology performance leads to the improvement of the exploration development, to obtain the best economical results and reducing the project costs over the costs already estimated for a conventional project.

The performance of the technology "Slim Hole" is based mainly in the use of reduced diameters, smaller sizes in the drilling equipment, less cement, drilling fluids and core disposition, besides the excellent development during. Activities such as drilling and completion where they can be executed in a shorter period of time.

Actually, hydrocarbons production is very focus in mature fieds' development, due to the lack of big fields' findings. In this paper it is proposed the viability of using the "Slim Hole" technology into an infill well in Colorado Field in Colombia.

The purpose of this project is to increase the reserves under exploration lower costs and shorter periods of time during the well operation, compared with the conventional drilling. All these things related with the right development and the accomplish for each technical requirement that involves the technology "Slim Hole" in order to guarantee a safety and efficient field program, including its technical, economical and environmental advantages.

* Work degree.

** UIS. Physicochemical Faculty of Engineering, College of Petroleum Engineering, research group mature fields, director: Msc. BUENDIA Hernando, co-director: Msc. Emiliano ARIZA

INTRODUCCION

La alta demanda de hidrocarburos y los pocos hallazgos nos llevan a buscar nuevas tecnologías y a investigar cómo aprovechar al máximo las reservas ya existentes. Es por esto que los esfuerzos de los ingenieros y demás profesionales involucrados en las actividades de exploración y explotación de un campo productor de petróleo, deben estar encaminados a este propósito.

La perforación Slim Hole es una técnica que está siendo aplicada en el mundo entero por sus buenos resultados operacionales, siendo un factor importante en el aumento de la capacidad de producción de un pozo de petróleo.

Este proyecto está enfocado en dar una descripción de la perforación Slim Hole de un pozo Infill y determinar su viabilidad técnica y económica aplicada al Campo Escuela Colorado.

En primer lugar se describe la tecnología de perforación Slim Hole, posterior a esto se realiza un estudio comparativo en los aspectos técnico, económico y ambiental respecto a la tecnología de perforación convencional.

Finalmente se analizan los aspectos técnico, ambiental y económico para la viabilidad de aplicación en el Campo Escuela Colorado.

1. PERFORACION SLIM HOLE

1.1 EN QUE CONSISTE LA PERFORACIÓN SLIM HOLE

La industria del petróleo y del gas ha estado experimentando en forma continua con el uso de la tecnología de perforación Slim Hole para reducir los costos de perforación y mejorar los resultados de exploración.

Pero ¿Por qué perforar un Slim Hole?, la respuesta se divide en 2 partes, la primera es muy simple y básicamente es conseguir mejores resultados económicos y la segunda es reducir los costos del proyecto sobre los costos ya estimados en un proyecto convencional.¹

1.1.1 Definición

Durante el último medio siglo, la tecnología Slim Hole ha sido aplicada en la industria del petróleo como una alternativa económica a la perforación convencional y a las técnicas tradicionales de completamiento del pozo con diámetro estándar. Los ahorros en los costos se realizan a partir del uso de diámetros de tubulares reducidos, tamaños más pequeños en los equipos de perforación, menos cemento, menos fluidos de perforación y menor disposición de los ripios de perforación, así como la capacidad de perforar el pozo y completarlo en un periodo de tiempo más corto.

La tecnología Slim Hole también puede ser utilizada para extensiones en pozos existentes y operaciones de exploración en áreas remotas como lo son montañas y selvas donde la medida de la locación o las preocupaciones ambientales no permiten la perforación convencional.²

¹ (K.K Millheim, Mining University Leoben, M. Prohaska, Mining Leoben University and B. Thompson, RDS London, Slim Hole Drilling Technology Past, Present, Future. SPE 30151).

² Mehdi Azari and Mohamed Soliman, Evaluation of Slimhole Production Performance, 1997, SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, 4-6 March 1997.

Para realizar un estudio de los efectos por la variación en el diámetro del pozo sobre la perforación, producción y su comportamiento, lo primero que se indica es el rango de los diámetros que se van a utilizar, así se da pie a la definición de un pozo Slim Hole como tal.

La tecnología Slim Hole se define como toda perforación en la cual el pozo perforado tiene dimensiones menores comparado con un proyecto convencional, cumpliendo el requisito de que por lo menos el 90% o más de su longitud total perforada se haya realizado con una broca menor a 7 pulgadas.

Los pozos Slim Hole dependen de quién lo ejecute, las dimensiones reducidas de la tubería y el equipo mismo comparado con los pozos convencionales. Scott and Earl lo definieron como, “cualquier pozo que no resista un mínimo de tubing de 2¾ pulgadas”. Amoco lo define como, “pozos en los que al menos el 90% de su longitud se perfora con brocas de longitud menor a 7 pulgadas” Esta es también la definición aceptada por BP Exploration Operating Co. En un informe más reciente publicado en JPT por Millheim, el dice que, “se trata básicamente de un pozo con un diámetro menor a 6 pulgadas”. Brunsmann define al Slim Hole como, “cualquier pozo con un tamaño de hueco perforado de 4 pulgadas o menos”, y el completamiento Slim Hole como, “cualquier producción que maneje un Tubing de 4 pulgadas o menor independiente al tamaño final del hueco”.³

1.1.2 Aplicaciones

Las aplicaciones típicas para la perforación Slim Hole incluyen pozos exploratorios en áreas remotas donde las operaciones de logística son un problema y las operaciones de reentrada en las que el pozo existente tiene un diámetro pequeño. Además, la tecnología de perforación Slim Hole ofrece la posibilidad de reducir significativamente los costos de producción de pozos,

³ Mehdi Azari and Mohamed Soliman, Evaluation of Slimhole Production Performance, 1997, SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, 4-6 March 1997.

profundización y desviación (sidetracking) de pozos existentes, perforación para pozos horizontales y multilaterales.

1.1.3 Tipos de equipos de perforación Slim Hole

Los equipos de perforación Slim Hole se dividen en dos tipos: en equipos de perforación convencional Slim Hole y los equipos de perforación no convencional Slim Hole. Los equipos de perforación convencional Slim Hole son aquellos que se modifican del equipo de perforación convencional, se reducen todas sus dimensiones y capacidades de las diferentes partes del equipo. Son utilizados para pozos exploratorios, pozos infill y pozos de producción. Los equipos de perforación no convencional Slim Hole también son llamados equipos de minería o rig minning; son equipos de dimensiones menores a los equipos convencionales y de más fácil transporte, se limitan por la profundidad y por la producción que podría tener el pozo.

Figura 1. Equipo de perforación no convencional Slim Hole EF-50.



Fuente: Discovery drill manufacturer

Figura 2. Equipo de perforación no convencional Slim Hole EF-75



Fuente: Discovery drill manufacturer

Tabla 1. Especificación técnica de los equipos de perforación no convencional Slim Hole

Especificación	EF-50	EF-50F	EF-75
Profundidad	5000 ft	5000 ft	7000 ft
Capacidad Pull Back	25000 lb	25000 lb	36000 lb
Capacidad de alimento	12000 lb	12000 lb	14000 lb
Bomba de agua	Transmite 435-50 gpm con 1000psi		
Peso total	20430 lb	12000 lb	20430 lb
Drill Head	0-1,200RPM	0-1,200RPM	0-1,200RPM
Transmision	4 veloc.	4 veloc.	4 veloc.
Motor diesel	Cummins 215 HP Tier III		
Motor hidraulico	Rexroth 160cc 5800 psi		
Bombas Hidraulicas	Principal: Rexroth 125cc 5800psi		
	Secundaria: Rexroth 95cc 5000psi		
	Terciaria: Rexroth 28cc 4000psi		
Levantamiento			DDM diseño
Wireline	DDM diseño 5000ft		7500ft

Fuente: Discovery drill manufacturer

Algunos de los equipos utilizados actualmente en Colombia son el EF-50 (Figura 1), EF-50F y EF-75 (Figura 2). En la Tabla 1 se ven las especificaciones de los diferentes equipos de perforación no convencional Slimhole y en la Tabla 2 algunos ejemplos de los pozos perforados con estos equipos.

Tabla 2. Ejemplo de pozos Slim Hole en Colombia

POZOS SLIM HOLE EN COLOMBIA				
Pozo	Ubicación	Operador	Equipo	Profundidad (ft)
ANH – CAUCA-10	Vereda el Picacho (Tulúa)	UIS	DDM EF-75	3937 (Real 939,72)
ANH – PATÍA-3	Verdad Guacimal (El Bordo-Cauca)	UIS	DDM EF-75	2142,75
ANH – PATÍA 27	Vereda Marquillo (Mercaderes-Cauca)	UIS	DDM EF-75	1590
ANH-PATÍA-29	Vereda La Barca(El Bordo-Cauca)	UIS	DDM EF-75	2144

Fuente: Archivos oficina Slim Hole UIS. 2011

1.1.4 Limitaciones y desventajas de la perforación SLIM HOLE

La tecnología de perforación Slim Hole puede reducir significativamente los costos de perforación y completamiento. Sin embargo el ahorro alcanzado por la perforación Slim Hole se puede ver afectado por:

- Incremento en fallas mecánicas
- Reducción de la longitud lateral del hueco
- Carencia de control horizontal

1.1.4.1 Fallas en la sarta de perforación. Una de las desventajas de la perforación con Slim Hole es las fallas en la sarta de perforación asociada con el uso de pequeños diámetros tubulares. La reducción de peso en el drillpipe hace que la sarta de perforación mecánicamente sea más débil que su equivalente convencional. Por ejemplo, cuando se cambia el drillpipe de 5½ pulgadas a 3½ pulgadas, la capacidad para transmitir el torque se podría ver

reducida en un factor de cinco. Por lo tanto, la fuerza de la sarta de perforación de diámetro pequeño es siempre preocupante, especialmente en la operación de fresado donde se encuentran altos torques. Para mantener la potencia, la velocidad de la broca debe aumentar. Además, la alta velocidad de rotación es requerida para mantener la velocidad lineal de corte debido a que se va reduciendo el diámetro de la broca. La alta velocidad de la broca puede crear problemas en la confiabilidad.

1.1.4.2 Fallas del Tool Joint. Las fallas de Tool Joint son otro problema para la perforación Slim Hole. Debido a que cuando la tubería y los joints son más delgados y pequeños inherentemente son más débiles y tienen tendencia a hinchamiento y a torcerse, particularmente en pozos más profundos. Ahora la industria ha diseñado y probado grandes torques en tool joints y tubería Premium para reducir la incidencia de fallas.

1.1.4.3 Detección de patadas. La detección de patadas es más difícil para la perforación Slim Hole porque la cantidad de gas que entra al yacimiento por el anular ocuparía mucho más altura que en pozos convencionales. Esto puede resultar dentro del máximo de presión permitido en el casing acercándose más rápidamente que un pozo convencional. Por ejemplo, la contención de una patada en pozos convencionales está entre 10 y 15 barriles, mientras que este volumen de gas en Slimhole podría ESTALLAR. La capacidad de detectar tempranamente una patada es por lo tanto esencial.⁴

1.1.4.4 Pérdidas de presión .A diferencia de la geometría de la sarta de perforación de un pozo convencional, las pérdidas de presión por fricción en Slim Hole son muy sensibles por la velocidad de la rotación de la tubería. Adicionalmente, la medida de presión en el standpipe se podría ver afectada por otros cambios operacionales tales como el caudal de la bomba, movimiento de tubería y corazonamiento. La causa del incremento en el caudal de lodo que

⁴ Bode, D.J., No&, RB. and Nickens, H.V. 1989. Well Control Methods and Practices in Small-Diameter Wellbores. Paper SPE 19526, presented at the Annual SPE Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, October 8-11.

retorna es muy difícil de identificar cuando los efectos son más de uno, además que casi todas las operaciones ocurren simultáneamente.⁵

Todos estos factores hacen aun más complicado detectar las patadas. Además, el tiempo más probable en que ocurre una patada es durante una conexión, cuando las bombas son cambiadas y la presión ejercida por el lodo contra la formación es reducida.

1.1.4.5 Descenso en la tasa de penetración .Otra desventaja para la perforación Slim Hole es el descenso en las ratas de penetración, especialmente para brocas cónicas. Las ratas de penetración son óptimas para tamaños de hueco entre 6½ y 11¼ pulgadas. Cuando se utilizan brocas cónicas, la rata de penetración tiende a decrecer así como va decreciendo el diámetro del hueco a partir 12¼ pulgadas, debido a que se reduce la estructura de los ripios. El decrecimiento de la rata de perforación se compensa con los ahorros que alcanza la perforación Slim Hole. Las bajas ratas de penetración fue el principal problema inherente a las operaciones para la perforación Slim Hole en el año 1950.

1.1.4.6 Profundidad. La profundidad es el principal factor que se considera cuando se realiza un diseño de un pozo Slim Hole, especialmente en exploración. Para la tecnología disponible Slim Hole puede alcanzar profundidades de 15000 pies. Conoco recientemente reportó que un pozo en el sur de del mar del norte fue perforado a 12300 pies; y en los últimos 3000 pies tuvieron un diámetro de hueco de 4,7 pulgadas.⁶

En pozos horizontales, el desplazamiento horizontal es también menor que con huecos grandes debido a que se reduce el peso de la sarta de perforación disponible.²⁷

⁵ Bode, D.J., No&, RB. and Nickens, H.V. 1989. Well Control Methods and Practices in Small-Diameter Wellbores.

Paper SPE 19526, presented at the Annual SPE Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, October 8-11.

⁶ Shields, J.A. and Taylor, M.R. 1992. Slimhole Kick Detection: Options and Answers, ThirdAnnual IADC European Well Control Conference, Leeuwenhorst, The Netherlands, June 3rd4th.

1.1.4.7 Cara del pozo y estabilidad. La integridad de la cara del pozo y la inestabilidad son otras de las preocupaciones para la perforación Slim hole, debido al pequeño espacio anular entre la sarta de perforación y el pozo, las pérdidas de presión son grandes como en la perforación convencional. Adicionalmente las pérdidas de presión reducen la capacidad de controlar las pérdidas de circulación y las elevadas presiones de poro. Un sistema especial de lodo es necesario para aumentar la capacidad pesante y reducir las fuerzas de fricción. Adicionalmente, la posibilidad de que se pegue la tubería incrementa para la perforación Slim Hole.

1.1.4.8 Producción. La producción en pozos Slim Hole ha venido siendo cuestionada, especialmente debido a que por el reducido tamaño del hueco es más vulnerable a sufrir de estrangulamiento.

Estudios realizados en el campo Pearsall indicaron que la producción en pozos Slim Hole se puede ver afectada entre el 60% y el 80% cuando se reduce el tamaño del casing desde 9 $\frac{5}{8}$ hasta 4 $\frac{1}{2}$ pulgadas. Estos estimativos se basaron en la presión suministrada por la bomba, el corte de agua y el GOR de cada pozo que termina siendo un factor determinante.

Para pozos que presentan un alto GOR, el uso de tamaños de casing más pequeños limita el tamaño del equipo de separación de gas que se puede utilizar. Con esta reducción en el tamaño del equipo, la eficiencia de separación de gas también se reduce, conduciendo a una menor productividad cuando se está utilizando una bomba convencional. Sin embargo, el cambio de bomba puede incrementar los costos. La implementación de equipos más pequeños por lo general presenta tolerancias internas más cerradas.

Una de las mayores limitantes para la perforación horizontal Slim Hole ha sido la inhabilidad de transmitir efectivamente el peso a la broca.

La larga sarta de perforación puede proveer mucho más peso a la broca respecto de una pequeña. Este peso adicional ofrecido por la sarta de perforación larga provee la capacidad de corregir los cambios de ángulo o

problemas. Así como la extensión lateral aumenta, el peso disponible que otorga una tubería de perforación con diámetro pequeño disminuye hasta el punto que al hacer correcciones de ángulo puede ser difícil o casi imposible.

1.1.4.9 Herramientas. La carencia de herramientas para la perforación Slim Hole ya que son especialmente más sofisticadas me representa una desventaja económica en comparación con la aplicación de herramientas para diámetros más grandes. Para la perforación horizontal con Slim Hole los equipos no tienen la capacidad ingenieril de ofrecer parámetros seguros respecto a la perforación convencional. Adicionalmente las herramientas que se pueden correr en Slimhole deben tener diámetros inferiores a 4 pulgadas. Los equipos de perforación direccional presentan diámetros entre $4\frac{3}{4}$ y $4\frac{1}{8}$ pulgadas [Ref 16] . Sin embargo el tamaño estándar requerido para correr registros es de diámetros por debajo de $3\frac{3}{4}$ pulgadas.

1.1.5 Requerimientos técnicos adecuados de la tecnología Slim Hole

Cualquier aplicación de las nuevas tecnologías requiere una preparación adecuada para garantizar un programa de campo seguro y eficiente. La tecnología Slim Hole requiere una preparación y unos procedimientos diferentes de las técnicas convencionales de perforación rotatoria. La aplicación de técnicas de perforación de la industria minera, los pequeños anillos del pozo, la medición precisa del flujo de líquido para la detección de patada, y los fluidos de perforación especializada requieren comprensión significativa, técnica y preparación. La industria ha demostrado las ventajas económicas de la utilización de esta nueva tecnología emergente para la exploración de petróleo y gas, especialmente en las zonas fronterizas remotas del mundo. Muchos aspectos técnicos de la aplicación de la tecnología se discuten lo que dará una idea a la mínima preparación técnica que una empresa necesita realizar para estar cómoda con una primera solicitud.

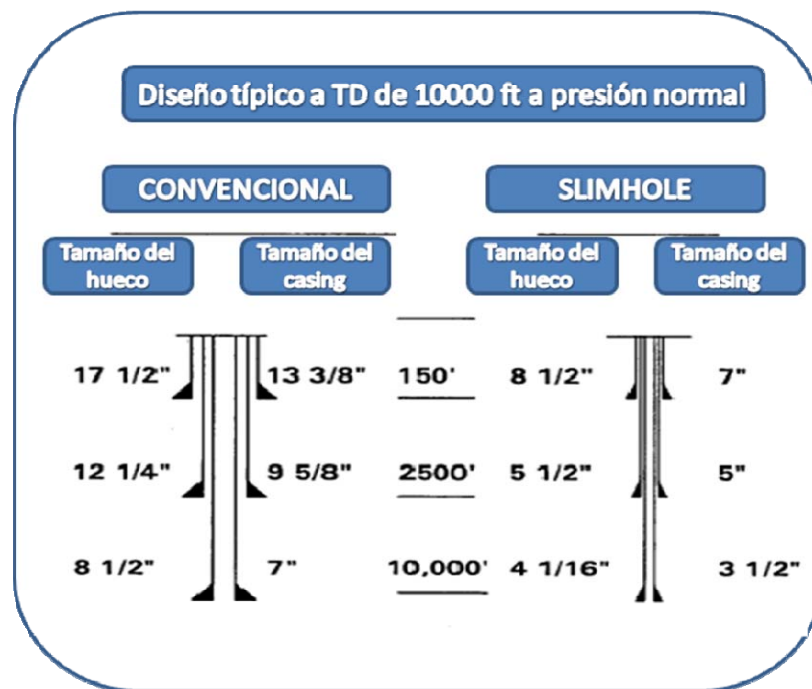
La industria de la perforación ha aplicado muchas definiciones del término Perforación Slim Hole. Tal como se aplica a los procesos convencionales de perforación, Slimhole normalmente indica un pozo que está diseñado para

llegar a la profundidad total (TD) con el diámetro del hueco más pequeño de lo que sería normal.

La ilustran las diferencias genéricas entre los diámetros de hueco perforado y tamaños de casing normalmente utilizados en los pozos convencionales y Slim Hole.

Una característica principal de la perforación Slim Hole es la utilización de brocas de diamante de alta RPM con bajo peso sobre la broca (WOB) para lograr tasas óptimas de penetración. Esto da lugar a diferencias de equipamiento primario en comparación con las plataformas de perforación convencionales.

Figura3. Programa típico de comparación de Casing



Fuente: F.E Shanks II, Mobil E&P Technical Center, and K.R Williams, Slimhole Exploration Requires Proper Technical Preparation. SPE 26337. Texas, 3-6 October 1993.

El control preciso WOB se consigue normalmente mediante sistema hidráulico para la alimentación y el control de WOB. Debido a los requisitos para altas RPM, el diámetro del hueco que se está taladrando es sólo marginalmente más grande que la varilla de perforación debido a los requisitos de estabilidad lateral. Por lo tanto, espacios anulares más pequeños están asociados con los pozos Slimhole que con los pozos perforados convencionalmente.

La reducción del espacio libre anular afecta a varias áreas importantes de los requisitos de ingeniería de perforación. En los pozos convencionales, el área de la sección transversal del anillo es mucho mayor que el área de la tubería de perforación. Por cadenas largas de la tubería, o perforaciones profundas, la pérdida de presión en la tubería de perforación domina sobre el anillo por la zona de flujo. Sin embargo, en Slim Hole, el área de la sección transversal de la barra de taladro es mayor que la superficie del anillo. Por lo tanto, la mayor pérdida de presión se producirá en el anillo.

Con las pérdidas de presión que ocurren en diferentes geometrías del pozo entre convencionales y Slim Hole, los datos históricos y las ecuaciones para el diseño hidráulico de pozos convencionales no son válidos.

Este fue el requisito de Mobil para perforar un pozo de prueba en 1991 y llevar a cabo amplias investigaciones de hidráulica para preparar técnicamente la perforación de pozos de petróleo y gas.

Hay dos tipos de equipos disponibles para perforar Slimhole. Equipos que han sido específicamente contruidos por la industria minera y el equipo que es un convertido o modificado del equipo convencional. Si bien estos equipos son capaces de perforar eficientemente los pozos Slimhole, el equipo de perforación convencional tiene menos movilidad debido a su tamaño y peso. El sistema de perforación de diamante de alta velocidad, con capacidad de perforación continua, requiere de unidad top drive capaz de rotar en revoluciones RPM de aproximadamente 1000.

Esto requiere un control preciso de peso en el control de la broca y velocidad de avance regulable. Los equipos Slim Hole construidos por la industria minera son típicamente de potencia de diesel hidráulico. Los paquetes hidráulicos son más pequeños y ligeros que los equipos eléctricos. Los equipos están diseñados de manera compacta y muchos son construidos en módulos pequeños para facilitar el movimiento dentro y fuera de las zonas remotas. La modificación principal del equipo de la minería es la adición del equipo de well control. Para operaciones normales este es un procedimiento sencillo. La atención se ha de dar al contratista de perforación para asegurar que todos estén de acuerdo en cuanto a los procedimientos para utilizar el equipo de well control.

Otra opción ha sido desarrollada para permitir la perforación Slim Hole como una adaptación de los equipos existentes. Utiliza un motor por el hueco y un sub-parachoques para producir el peso controlado sin modificar el malacate. El sistema no está diseñado para la extracción de muestras continua y está destinado principalmente a ser utilizado para terminar la perforación de los pozos en mayores profundidades.

El equipo es capaz de perforar convencionalmente con brocas ticónicas cuando sea necesario. Sin embargo, para los huecos de mayor diámetro, los equipos no suelen tener caballos de fuerza suficiente para competir con las tasas de penetración de equipos convencionales.

Una serie completa de brocas full bore diamond ha sido diseñado para aplicaciones de O & G. Para brocas de diámetros distintos de lo que ya ha sido diseñado, es una simple cuestión de personalizar los diámetros y tipos de diseño con poco aumento en el costo o tiempo de entrega.

A continuación se presentan los requerimientos técnicos más importantes para implementar las tecnologías Slim Hole, basado en estudios de casos ejecutados a nivel mundial.

1.1.5.1 Pruebas hidráulicas. Hay varios factores críticos que deben ser bien entendidos en la planificación de un Slim Hole y que están asociados con el sistema hidráulico de la perforación. Debido a pequeños anillos en un pozo Slim Hole, la presión causada por el flujo de fluidos en el pozo se encuentra fuertemente afectada por pequeñas variaciones en la geometría del pozo, la posición de la varilla de perforación con respecto al eje del pozo, y la velocidad de la barra de taladro de rotación. Estos factores, generalmente insignificantes en la perforación convencional, aumentan significativamente la dificultad de predecir y controlar las presiones en los pozos Slim Hole.

Al respecto la empresa Mobil reconoció la importancia de la hidráulica del pozo para la perforación Slim Hole. El equipo de perforación que utilizó fue un instrumento para medir los parámetros del Key Drilling y el sistema de lodo. El sistema Exlog's DrillByte se utilizó para grabar automáticamente y mostrar los datos de estos sensores en las pruebas de perforación y el sistema hidráulico. Este último consistía en cambiar la configuración del barril de corazonamiento, la velocidad de la sarta de perforación, y la tasa de flujo de lodo mientras se mide la presión de perforación vertical.

La experiencia y la tecnología adquirida en el área de Dallas Test Well se utilizó para planificar los pozos futuros como los de Bolivia, Pando#1 y Manuripi #1. Las pruebas hidráulicas en estos pozos fueron diseñadas para confirmar los resultados de las pruebas de pozo y mejorar las capacidades del modelado de sistemas hidráulicos. Los objetivos específicos de las pruebas de campo fueron:

1. Proporcionar una presión adicional y unos datos de flujo para evaluar y mejorar los modelos hidráulicos.
2. Evaluar los métodos para la estimación de la geometría del pozo sobre la base de distribución de la presión en el anillo.

3. Confirmar y mejorar las estimaciones de la densidad de circulación equivalente (ECD) para fines de control de pozo.
4. Establecer la presión vertical correspondiente a “tasas de circulación lenta” para su uso durante las operaciones de control de pozo.
5. Confirmar los efectos de los factores de distribución de la presión en un anillo del pozo Slim Hole, incluyendo: la geometría del anular - relación entre el diámetro de perforación y el diámetro de pozo, la rotación de la barra de perforación, profundidad de la broca (contrapresión), propiedades de los fluidos.

1.1.5.2 Revisión de los equipos y procedimientos. Los elementos clave del sistema de perforación Slim Hole se evaluaron y los siguientes comentarios se refieren a los efectos, ventajas y desventajas de estos elementos clave. La viabilidad de los cambios depende del programa que se trate. Puede que no sea económicamente práctico para aplicar algunas de estas recomendaciones en un solo programa de pozo.

Cualquier cambio en la geometría del pozo afecta a muchos aspectos del sistema. De vital importancia para la geometría del pozo es la estabilidad de la tubería de perforación lateral, que permite altas RPM de la tubería de perforación y se produce una tasa de penetración óptima con brocas de diamante.⁷

1.1.5.3 Tuberías. Los espacios anulares entre la tubería de perforación y el hueco son muy pequeños, entre 0,15 y 0,25 pulgadas. Las ventajas de las distancias pequeñas son el uso de las tuberías más pequeñas y ligeras que las utilizadas en la perforación rotatoria convencional, y a su vez un equipo más pequeño, necesario para manejar las tuberías. Cuando se usa en lugares remotos el equipo más ligero y tuberías más pequeñas y ligeras traducen en ahorro de costos especialmente en el transporte.

⁷ F.E Shanks II, Mobil E&P Technical Center, and K.R Williams, Slimhole Exploration Requires Proper Technical Preparation. SPE 26337. Texas, 3-6 October 1993.

1.1.5.4 Selección del revestimiento. Los diámetros del casing están relacionados con los diámetros del hueco. Con las distancias anulares pequeñas se deben realizar trabajos adicionales en los procedimientos de cementación. Debido a las distancias anulares pequeñas, existen ventajas asociadas al exterior del casing. Para perforar en una frontera remota, hay ventajas de usar la tubería de perforación como casing. El aspecto negativo del uso de la tubería de perforación es la falta de conocimiento acerca de las conexiones de en su uso como casing. Las conexiones deben ser evaluadas para establecer niveles de rendimiento.

1.1.5.5 Poder de aporte del pozo. La unidad de alta velocidad de pseudo-top fue muy eficaz a la producción de la alta RPM y el torque necesario para la perforación Slim Hole. Para un equipo existente, sería ventajoso que la tubería de perforación fuera del mismo diámetro. Esto permitiría el uso de un cabezal giratorio, así como tener una resistencia uniforme en toda la tubería de perforación. Para crear un nuevo equipo de perforación, el top drive con un diámetro medio. Un top drive probablemente se traduciría en mástil/torre de perforación un poco más pesado debido a la necesidad de llevar y transmitir un torque alto en el mástil.

1.1.5.6 Tasa de perforación. Generalmente brocas de diamante son utilizadas en corazonamiento Slim Hole y en combinación con bajo peso (2000-8000 lb) y altas revoluciones RPM (350-1000), proporcionan tasas de penetración adecuadas (2-15 m/h). El factor más importante en la tasa de penetración parece ser RPM. Los pequeños espacios anulares parecen beneficiarse de la capacidad de rotación, proporcionando la estabilidad lateral de la sata de perforacion. Esto permite que la barra del taladro que gira a velocidades de hasta 1000 RPM, tenga una tasa de penetración mucho más alta que la baja RPM (60-150), usada en perforación convencional.

En pozos perforados en Perú, las tasas de penetración de la perforación Slim Hole fueron similares o ligeramente mayores a las del equipo convencional, mientras se perforaron las mismas formaciones.

1.1.5.7 Altas densidades equivalentes de circulación. Altos ECDs están asociados con el pequeño espacio anular de la perforación Slimhole. Esto puede conducir a la pérdida de circulación en formaciones fracturadas o no competentes. Se debe tener cuidado al planificar y controlar las propiedades del fluido, especialmente la viscosidad, en el pozo.

1.1.5.8 Limitaciones de profundidad. Las limitaciones para los equipos comunes Slim Hole están entre aproximadamente 9000 pies y 12500 pies. Sin embargo, con cambios en el mástil y los viajes del equipo, y la tubería de perforación correctos, el equipo podría tener un alcance hasta de 15000 pies.

1.1.5.9 Pruebas de pozo. Para la tecnología Slim Hole las herramientas para realizar pruebas de pozo están disponibles. Sin embargo si se le va a realizar una prueba al pozo cuando la sarta de perforación es utilizada como casing, se requiere suficiente planificación previa dado que muchos de los componentes necesarios podrían no estar disponibles.

1.1.5.10 Cementación. Las técnicas de cementación deben ser desarrolladas para dar una mayor probabilidad de éxito y buenos trabajos de cementación para pequeños espacios anulares. La técnica llamada “Puddling” se utilizó hace muchos años en la industria de la perforación. Se requiere que el cemento sea desplazado antes de la corrida del casing. Los retardadores nuevos y otros productos químicos que se han desarrollado en los últimos años ofrecen una oportunidad para que esta técnica se reevalúe para esta aplicación.⁸

⁸ F.E Shanks II, Mobil E&P Technical Center, and K.R Williams, Slimhole Exploration Requires Proper Technical Preparation. SPE 26337. Texas, 3-6 October 1993.

1.1.5.11 Control de pozo. Una situación de control de pozo se encontró durante la perforación del Manuripi. Una arena muy permeable y porosa se encontró de 3589 pies a 3635 pies. Al intentar recuperar el intervalo de núcleo de 3665 pies a 3692 pies el pozo tuvo un flujo fuerte. El pozo fue cerrado con una válvula de presión del soporte de tubería de 135 psi, y el casing de 170 psi. El pozo se estranguló con el método de del perforador y se cerró de nuevo con presiones constantes de 205 psi con la tubería y el casing. El pozo se controló y no mostró aumentos o disminuciones en el cierre de presiones. El pozo se puso en circulación de nuevo y atreves del estrangulador no presento signos de gas. Los cierres de las presiones se repitieron y que se estableció 200 psi en la casing y tubería. El pozo se abrió y comenzó a fluir a 60 gpm, disminuyendo a 4 gpm en 14 minutos. El pozo se distribuyó a través de la línea de flujo, sin signos de influx.⁹

1.1.5.12 Pega diferencial. Durante la perforación de arenas muy permeables con un sistema de lodo bajo balance con 0,5 a 1,0 ppg, con un alto ECD y dejando la sarta de perforación estacionaria en la parte inferior por largos periodos, no se encontró pega diferencial. Esto puede ser debido al bajo contenido de sólidos en la salmuera utilizada.

1.1.5.13 Diámetros de perforación del hueco. Las brocas de alta velocidad de diamante para la perforación de corazonamiento o perforación total esencialmente se obtienen por encargo. Un estudio detallado para determinar el tamaño óptimo del hueco en la perforación Slimhole se debe realizar. Este consideraría ECD, diámetro del núcleo, el tamaño del casing, cementación, la estabilidad lateral de los tubos de perforación, etc.¹⁰.

⁹ F.E Shanks II, Mobil E&P Technical Center, and K.R Williams, Slimhole Exploration Requires Proper Technical Preparation. SPE 26337. Texas, 3-6 October 1993.

¹⁰ F.E Shanks II, Mobil E&P Technical Center, and K.R Williams, Slimhole Exploration Requires Proper Technical Preparation. SPE 26337. Texas, 3-6 October 1993.

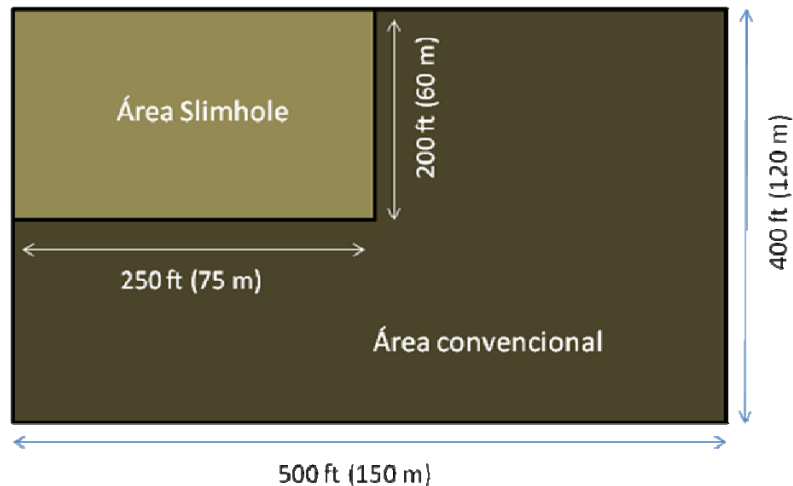
2. COMPARACION DE LA TECNOLOGIA SLIM HOLE CON LA PERFORACIÓN CONVENCIONAL

2.1 PERFORACIÓN EXPLORATORIA EN AREAS REMOTAS

Estas áreas pueden carecer de infraestructura, donde la construcción de carreteras y la logística tienen un valor elevado. En esta situación, el pozo Slim Hole puede ser concebido simplemente como un pozo de exploración sin tener en cuenta sus capacidades productivas. El Slim Hole, reducirá los requerimientos de capital para alto riesgo, y altos costos de operación.

Los pozos Slim Hole utilizan menos lodo, casing, cemento, agua, diesel; generan un volumen menor de ripios; y necesita menor cantidad de personal para operación y soporte del sistema de perforación que con el sistema convencional. Por ejemplo, si el diámetro del hueco se reduce en un 50%, el consumo de lodo y los ripios se reducirán en un 75% (figura 4). Los costos totales se reducirán entre 40% -60%.

Figura 4. Reducción en área y en costos del sitio en Slimhole.



Fuente: Dachary, J. and Vighetto, R 1992. Slimhole Drilling Proven in Remote Exploration Project. Oil and Gas Journal, June.

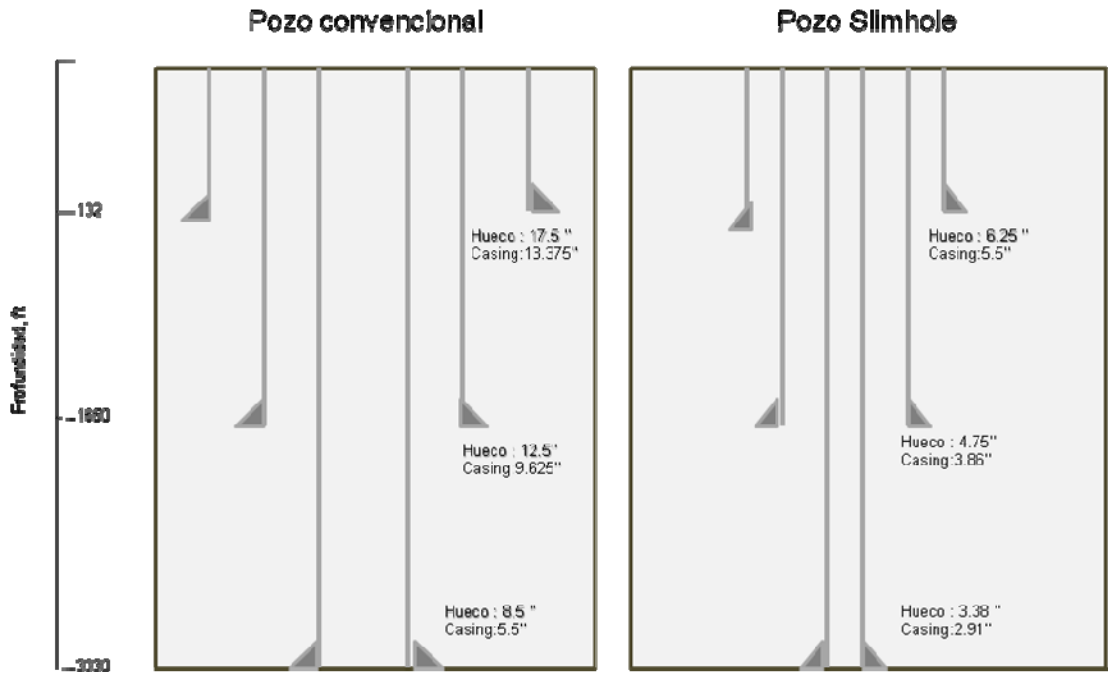
- Diámetro del hueco reducido a un 50%
- Composición del lodo reducido en un 75%
- Ripios reducidos en un 75%
- Área del pozo reducida en un 75%
- Ahorro en el costo total entre 40 y 60%

La empresa Conoco perforó pozos Slim Hole en Irian Jaya, Indonesia, usando equipos portables en helicópteros. El área operacional en Iria Jaya es una de las áreas más remotas en Indonesia, que se encuentra a 1900 millas de Singapur (punto de movilización) y a 1740 millas de la oficina principal. La perforación Slim Hole permitió que la empresa utilizara plataformas más pequeñas para los equipos reduciendo los costos elevados que llevan los estudios del campo, movilización y desmovilización, la construcción del campamento base, etc. El equipo Slim Hole solo requirió 100 airlift (transporte aéreo) para desplazarse en comparación con los 330 airlift (además de otros 220 al mover la herramienta de campo y los tubulares) para convencional. El equipo Slim Hole fue transportado en solo 5 días mediante helicóptero frente a más de 16 días en el caso de equipos convencionales.

La compañía BP identificó la perforación Slim Hole como una tecnología para su estrategia de exploración en 1990. BP Exploration perforó 6 pozos Slim Hole en el campo Plungar en Inglaterra, con el equipo Micro-Drill MD3. El equipo MD3 pesa tan solo 13 toneladas métricas y tiene 36 pies de alto en comparación a 116 pies del equipo convencional. El equipo requiere un sitio de perforación 70% más pequeño que el convencional. El ahorro de tiempo en la manipulación y la reducción de costos estuvieron entre el 60% y 70%. En el programa Slim Hole de BP, el diámetro del Slim Hole de $3\frac{3}{8}$ pulgadas se completó con un casing de 2,91 pulgadas OD en comparación a los huecos de $8\frac{1}{2}$ pulgadas con casing de $5\frac{1}{2}$ pulgadas en pozos convencionales (figura 5). El tamaño de los huecos es más pequeño como resultado de la disminución de seis veces el volumen de ripios y su correspondiente reducción en el volumen

de lodo. Murray citó que en el proyecto de exploración Slim Hole de BP se alcanzó un ahorro de más del 40%.

Figura 5. Completamiento Slimhole de BP en el Campo Plungar



Fuente: Murray, P J, Spicer, P J, Jantzen, R E, Syrstad, S O and Taylor, M R 1993. Slimhole Exploration: A Case for Partnership in The Nineties, IADC/SPE-25724, presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Amsterdam, Neth., February 23-25.

Desde 1983, Total Exploration Production ha perforado más de 230 pozos Slim Hole en la cuenca de París. Mas del 80% de la longitud fue perforada con un diámetro de 6 pulgadas.

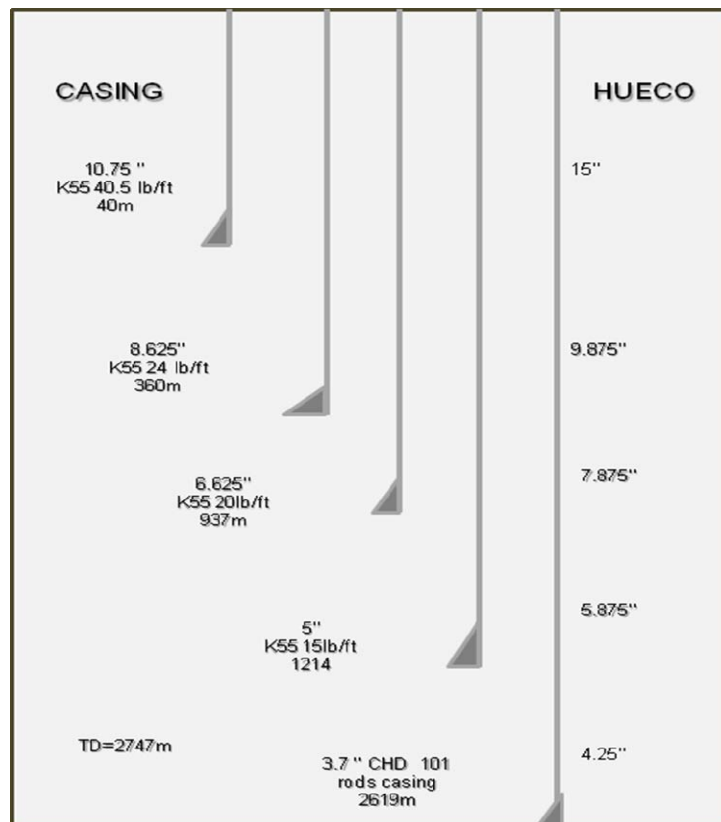
Durante el segundo semestre de 1991, Total Exploration ejecuto un proyecto de perforación Slim Hole en el bosque tropical de Gabon. Se perforaron dos pozos: uno a 9010 pies terminando con un hueco de 3 pulgadas y otro a 1371 pies terminando con un hueco de 5 7/8 pulgadas. Las operaciones de

corazonamiento continuo recuperaron 6127 pies, o el 59% de la longitud total perforada.

El diseño del casing para el proyecto de Total en Gabon se estableció de la siguiente manera (figura 6):

- Casing de 10 $\frac{3}{4}$ pulgadas en un hueco de 15 pulgadas perforado a 131 pies de profundidad.
- Casing de 8 $\frac{5}{8}$ pulgadas en un hueco de 9 $\frac{7}{8}$ pulgadas perforado a 1181 pies.
- Casing de 6 $\frac{5}{8}$ pulgadas en un hueco de 7 $\frac{7}{8}$ pulgadas perforado a 3074 pies.
- Casing de 5 pulgadas en un hueco corazonado de 5 $\frac{7}{8}$ pulgadas a 3983 pies.
- Barra de taladro de 3.7 pulgadas con casing de 4 $\frac{1}{4}$ pulgadas en un hueco corazonado a 8593 pies.

Figura 6. Esquema del pozo Nyangou-1



Fuente: Oil and Gas Journal, May 13, p51

Con la perforación del pozo convencional se habría requerido un hueco de 36 pulgadas y una superficie de casing de 30 pulgadas, y el pozo habría terminado con un diámetro de 8 ½ pulgadas.

Total Exploration reporto que el uso del equipo Slim Hole en comparación a un equipo convencional permite una reducción sustancial en el volumen y peso del equipo, bienes de consumo, acceso, e instalaciones. El mejoramiento directo en logística incluye una reducción en la cantidad y en las especificaciones del transporte del equipo, una reducción en los tamaños de acceso y locación, y una fácil organización del transporte en helicóptero si fuera necesario.

El proyecto global de la empresa Total en Gabon tiene un costo de \$12.8 millones de dólares. El mismo programa se llevo a cabo con un enfoque de perforación convencional y se estimo que costaría un 15% más. El siguiente es el desglose de los costos aproximados para el proyecto:

- Logística y obras civiles, 39.5%
- Elementos consumibles, 8%
- Todos los contratos de perforación, 29%
- Registros y registros de lodo, 8.5%
- Varios (inspección, estudios de viabilidad, etc.), 15%

Total Exploration informo que una operación Slim Hole costaría alrededor de un 30% menos que una operación convencional y tomaría menos tiempo con un eficiente, resistente y moderno equipo de perforación Slim Hole. Total Exploration llego a la conclusión que el diámetro convencional de 8 ½ pulgadas usados comúnmente en los pozos wildcat podría ser reemplazado con un Slim Hole de 6 pulgadas con la posibilidad de un hueco de 4 ½ pulgadas.

2.2 PERFORACIÓN DE POZOS DE DESARROLLO

En muchos campos maduros de gas y aceite las reservas son función del número de pozos perforados. Para la actual tecnología, cerca del 40% del aceite in situ puede ser recobrado, un 20% del aceite pudo no haber sido barrido, el 20% podría haber sido puenteada a menor escala y el 20% fue la saturación del aceite residual. Si la mitad del aceite es barrida y puenteada podría ser económicamente recobrado. Las reservas de aceite recuperable podrían incrementarse hasta un 50%. Los pozos Infill en campos maduros son comúnmente recobrados barriendo y puenteando el aceite.

La perforación y completamiento de nuevos pozos es costoso, afortunadamente la tecnología Slim Hole ofrece oportunidades para reducir costos tanto en perforación como en completamiento, alcanzando una producción más económica.

La tecnología Slim Hole en completamiento reduce los costos de desarrollo. Hudson Bay Oil and Gas Company perforó 36 pozos Slim Hole en Canadá en 1950 a profundidades entre 2600 ft y 6900 ft, utilizando un tamaño de tubing de 2 $\frac{7}{8}$ pulgadas y fue cementados con un hueco de 6 $\frac{1}{4}$ pulgadas. Los costos en pozos Slim Hole son 35% menos que los pozos completados convencionalmente. La mayoría del ahorro se debe en la reducción de los costos de los materiales. En la tabla 3; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra en detalle la comparación entre pozos Slim Hole y convencional a una profundidad de 5000 ft. De acuerdo con las operaciones, y utilizando un cuidadoso programa de desarrollo Slim Hole se podrían obtener ahorros del 25% en pozos productores y 30% en pozos inyectoros en comparación con las operaciones de perforación y completamiento convencionales ¹¹.

¹¹ Scott, R.W. and Earl, J.F. 1961. Small Diameter Well Completions, Part 1: Economics and Application. World Oil, August 1, pp. 57-66.)

Tabla 3. Comparación de costos para un pozo en Canadá a 5000 ft.

	Slim Hole(USD)	Convencional (USD)
Casing	1300	2100
Tubing	5300	5300
Wellhead	1100	2200
Materiales diversos (equipo float, centralizadores, etc.)	800	1200
Contrato de perforación y día de trabajo	15800	16600
Gastos de Company Overhead	900	900
Transporte terrestre	900	1800
Trabajo fuera del área	120	120
Cementación	2800	2000
Ácidos	150	600
Registros	850	850
Perforación	450	350
Fracturamiento	3300	4500
Gastos de locación	2500	2500
Lodo	1000	1000
Análisis de corazones	200	200
TOTAL	37470	52220
AHORRO	\$14750 o un 28%	

Fuente: Deguillaume, J. and Johnson, B. 1990. Drilling With SemiAutomatic and Automatic Horizontal. Racking Rigs, IADC/SPE-19980, presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Houston, Texas, February 27-March 2.

Las técnicas de perforación Slim Hole han sido utilizadas por LA compañía Unocal para perforar en el valle San Joaquín cerca de Bakersfield, California.¹²

Los campos ubicados al oeste del valle San Joaquín usan inyección de vapor como recobro secundario debido a la baja gravedad de crudo en esa área. Anteriormente los pozos inyectoros fueron normalmente perforados con plataformas de perforación convencional. Estos pozos inyectoros han sido perforados utilizando plataformas de workover y técnicas de completamiento Slim Hole con un tubing hasta superficie de 2³/₈ pulgadas. Unocal indicó que los pozos inyectoros fueron perforados sin mayores problemas. El tubing de 2³/₈ pulgadas fue cementado con un cemento termo estable desde el TD hasta la superficie para asegurar que este no presente una brecha de vapor hacia la superficie y para aislar el tubing de la formación de agua, de tal modo que se reduzcan las pérdidas de calor. En comparación con la inyección convencional no hay un cambio significativo en la presión de inyección. La reducción económica en la inyección de vapor con Slim Hole es muy superior respecto a la convencional. El costo total del pozo fue reducido a aproximadamente 50% de la inyección convencional.¹³

Unocal indicó que usando pozos Slim Hole como inyectoros bajos de presión tienen las siguientes ventajas y desventajas:

- Reducción total del costo del pozo varía entre 25% y 50% comparado con un inyector convencional.
- Reduce el tamaño en la locación
- Reduce los costos en tubería (no es necesario el casing de 5¹/₂)
- Se dificulta el manejo de operaciones de workover dentro de la tubería de 2³/₈.

¹² Dahl, T. 1982. Swedish Group's Small Hole Swallow-Drilling Technique Cuts Costs. Oil & Gas Journal, April 19, pp. 98-100.

¹³ Dahl, T. 1982. Swedish Group's Small Hole Swallow-Drilling Technique Cuts Costs. Oil & Gas Journal, April 19, pp. 98-100.

2.3 REENTRADA EN POZOS EXISTENTES

El uso de la perforación Slim Hole para la reentrada en los pozos existentes a proporcionado oportunidades para desarrollar las reservas a través de una perforación más profunda, o sea sirve para encontrar nuevas reservas por debajo de los de yacimientos antiguos y la perforación horizontal que de otro modo no serian rentables para desarrollar. En los Estados Unidos de América, hay aproximadamente 500000 pozos, muchos de ellos con 4 ½ pulgadas, 5 pulgadas, y 5 ½ pulgadas de casing. En las zonas maduras, la reentrada Slimhole y la perforación horizontal pueden ofrecer la única oportunidad para desarrollar las nuevas reservas con eficacia, o para obtener los beneficios de convertir los pozos existentes en pozos horizontales. La técnica de reentrada Slimhole aumentara estas actividades en el futuro debido a la gran cantidad de pozos existentes.

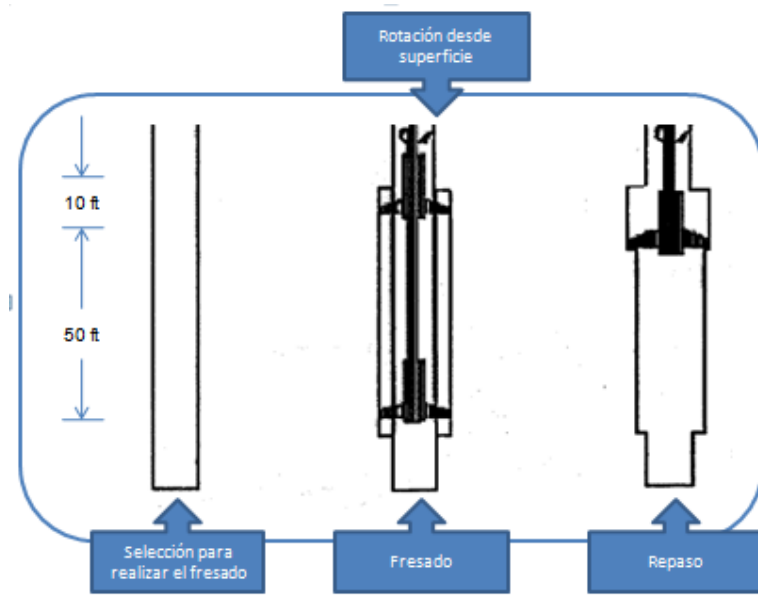
La principal razón por la que se realiza una reentrada Slimhole en lugar de una nueva perforación es la reducción de costos; menos tiempo de perforación, alquiler de los equipos de lodo, y los costos asociados a perforación ya que no incurren o no es necesario perforar verticalmente. Además, el cabezal del pozo, los equipos de superficie, las tuberías y los equipos de medición, también se encuentran en el lugar por la producción anterior.

Otras ventajas técnicas incluyen la disponibilidad de perforación y los registros que ayudan al operario a volver a entrar. En la reentrada horizontal, el registro de depósito de lodo puede indicar las áreas donde los problemas de fresado podrían ocurrir y donde las operaciones de compresión de cemento podrían ser necesarias. Registros litológicos, como rayos gama y neutrones pueden mostrar al operador los intervalos de profundidad de las formaciones y ayudar a identificar las zonas de interés, y la información existente sobre el registro del pozo original, también puede ayudar al operador a determinar el azimut para interceptar las zonas más productivas de la formación. El conocimiento de los

registros existentes puede reducir la posibilidad de condiciones inesperadas durante las operaciones de perforación en zonas menos conocidas.

Un tipo de reentrada Slim Hole es desviar el pozo existente a horizontal. En esta técnica, una parte del casing existente se fresa y el hueco es desviado a horizontal. Hay dos tipos de operaciones de fresado que se utilizan para reentrada: section milling y window milling. La operación de section milling utiliza una sarta de perforación con un aspa tipo mil que se gira desde la superficie (figura 7). La operación de fresado comienza alrededor de 10 pies por encima del punto seleccionado de inicio. Esto permite suficiente espacio para limpiar el casing con el motor y mientras la broca se desvía.

Figura 7. Esquema de la operación section milling.



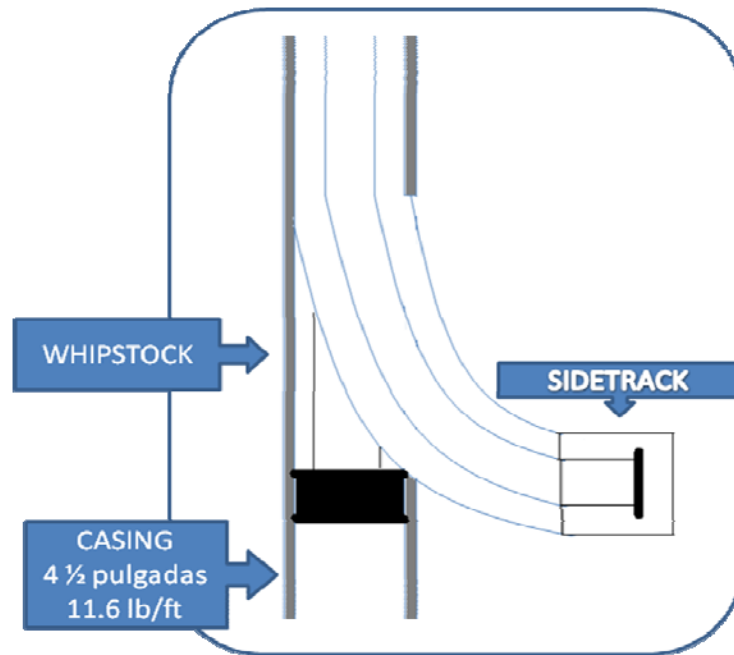
Fuente: Slimhole Drilling Saves Dollars in Thermal Injectors.¹⁴

Otro tipo de operación de fresado es la window milling. En lugar de eliminar toda la circunferencia del casing, solo se remueve una pequeña franja del casing, paralela a la línea central del casing y en el lado del casing donde el

¹⁴ Grove, G A and Vervloet, A W. 1993. Slimhole Drilling Saves Dollars in Thermal Injectors. Paper SPE-25780, presented at SPE Them Oper. Int. Symp., Bakersfield, CA, Feb. 8-10.

pozo horizontal tendrá lugar. Esto se logra estableciendo un desviador orientado en el casing debajo del punto de inicio y luego ejecutar un montaje en el fondo del hueco, el casing y desvía el pozo existente en la dirección deseada (figura 8).

Figura 8. Esquema del window milling.



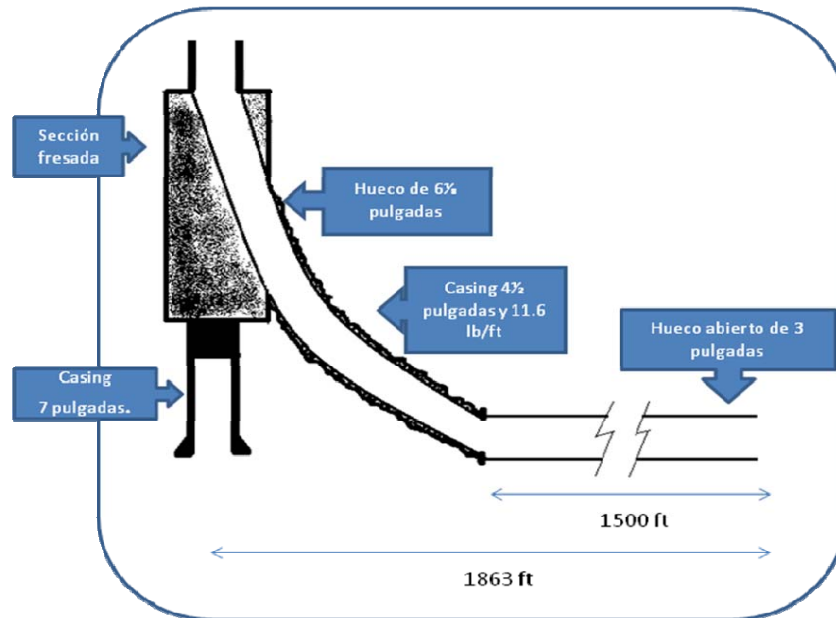
Fuente: Slimhole Drilling Saves Dollars in Thermal Injectors.

En comparación con las operaciones de section milling, las operaciones window milling no requieren tapón de cemento para iniciar y se remueve menos casing. Las operaciones window milling reducen el tiempo requerido para la desviación.

Otro ejemplo de reentrada es un pozo con 4 1/2 pulgada de casing por Oklahoma Natural Gas en el condado de Logan, Oklahoma. Un section milling fue desarrollado en el casing de 7 pulgadas, y el hueco fue desviado con una broca de 6 1/2 pulgadas y la unidad de motor de 4 1/2 pulgadas (figura 9). Una sarta de 4 1/2 pulgadas de casing se ejecuto y cemento en superficie. La parte

lateral se perforo con una broca de 3 ¾ pulgadas con un desplazamiento de horizontal de 1863 pies. Un ahorro significativo fue reconocido.

Figura 9. Section milling perforado con casing de 7" y desviación, en Oklahoma.

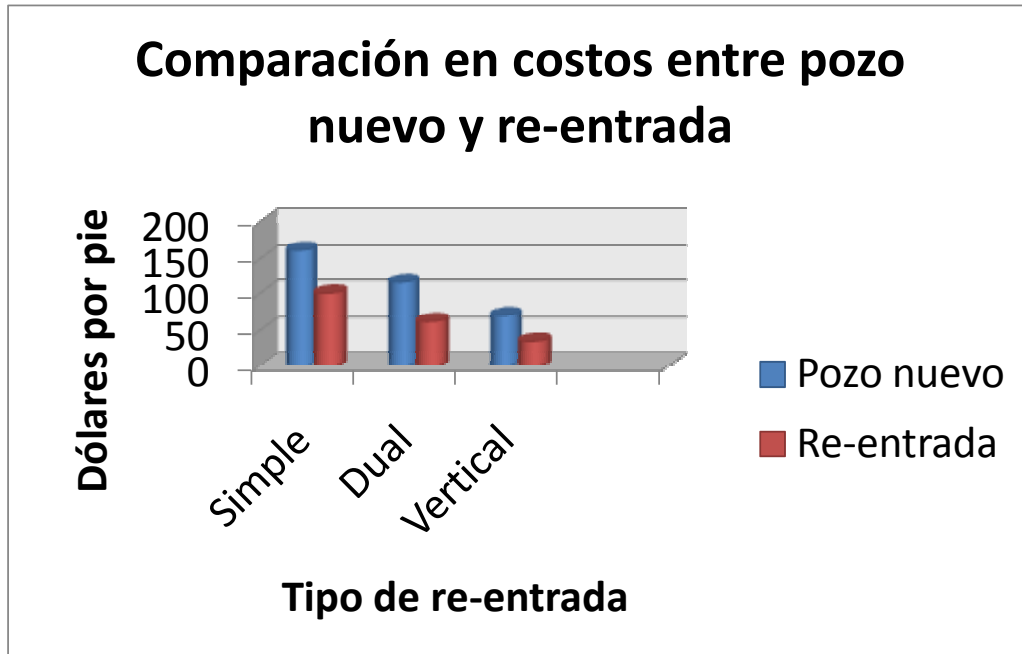


Fuente: Slimhole Drilling Saves Dollars in Thermal Injectors. ¹⁵.

Union Pacific Resources Company (UPRC) ha informado que el costo promedio de perforación en un pozo de reentrada horizontal fue alrededor de \$100 dólares por pie de formación expuesta en comparación a un promedio de \$162 dólares por pies en el Campo Pearsall al Sur de Texas, o un ahorro del 38%. El ahorro en los costos por los diferentes tipos de reentradas se muestra en la (figura 10).

¹⁵ Grove, G A and Vervloet, A W. 1993. Slimhole Drilling Saves Dollars in Thermal Injectors. Paper SPE-25780, presented at SPE Them Oper. Int. Symp., Bakersfield, CA, Feb. 8-10.

Figura 10. Ahorro para diferente tipos de reentrada.



Fuente: Pittard, F J, Weeks, R D and Wasson, M R 1992. Slimhole Horizontal Reentries Provide Alternative to New Drills. Petroleum Engineer International.

2.4 IMPACTO AMBIENTAL

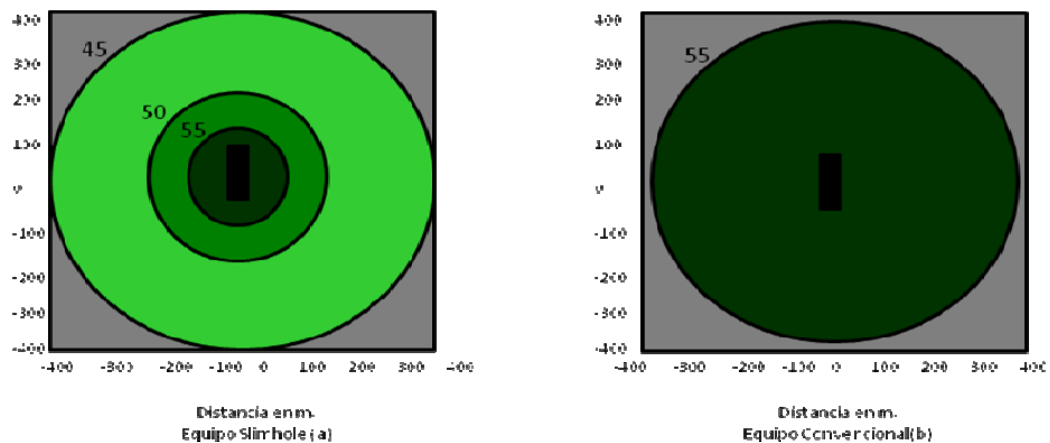
El impacto ambiental es uno de los problemas principales al realizar perforaciones, teniendo en cuenta que este aspecto cada día se vuelve más y más importante la tecnología Slimhole brinda la oportunidad de reducir al mínimo los residuos y mejorar su impacto general.

Siempre reduce área del equipo, potencia requerida, consumo de combustible, lodo y desechos de perforación, emisiones de gases, ruido , transporte, entre otros.

Dada la diferencia de pesos en los equipos y maquinarias utilizadas, la tecnología Slimhole también disminuye la contaminación del aire porque requiere menos potencia para su funcionamiento.

Otro aspecto de los principales beneficios que brinda la tecnología de perforación Slimhole sobre la perforación convencional de pozos es la reducción de emisiones de ruido. Es un factor muy ventajoso cuando se perfora cerca a zonas residenciales. La Figura 11 muestra una comparación global de los niveles de ruido entre un equipo Slimhole y un equipo de perforación convencional.

Figura 11. Mapas típicos de contorno de ruido de los equipos Slimhole (a) y equipo convencional (b). Los ejes horizontales y verticales representan la distancia en metros desde el centro del equipo. Las circunferencias representan los niveles de ruido en db.



Fuente: Shields, J.A. and Taylor, M.R. 1992. Slimhole Kick Detection: Options and Answers, Third Annual IADC European Well Control Conference, Leeuwenhorst, The Netherlands, June 3rd-4th

El tamaño pequeño de los equipos involucrados en las operaciones de perforación Slimhole también ha dado resultados en la reducción de transporte para la movilización y desmovilización de los equipos de perforación; contribuyendo en otra parte al ahorro general. Esto reduce el impacto global y el riesgo de incidentes vinculados con el transporte del equipo.

Otra de las ventajas de la tecnología Slimhole es la reducción de emisiones. Dado que el equipo necesario para la perforación Slimhole es más pequeño que un equipo convencional, el consumo de combustible y las emisiones de gas pueden reducirse proporcionalmente. La tabla 4 muestra una comparación del consumo de combustible y emisiones del equipo Slimhole con el equipo convencional.

Tabla 4. Composición del combustible y emisiones de gas para unidad CTD, equipo Slimhole y equipo convencional.

	Diesel (m/mes)	CTD Unidad 25	Equipo Slimhole 35	Equipo Convencional 160
Emisiones de Gas Kg/día	CO ₂	2,122	3,293	15,055
	CO	2,5	3,7	16,8
	NO ₂	2,1	4,6	21
	HC	2,8	3,9	17,8
	HC(gas)	1,1	1,83	8,4
	SO ₂	2,2	4,2	19,4

Fuente: Completamiento Slimhole de BP en el Campo Plungar.

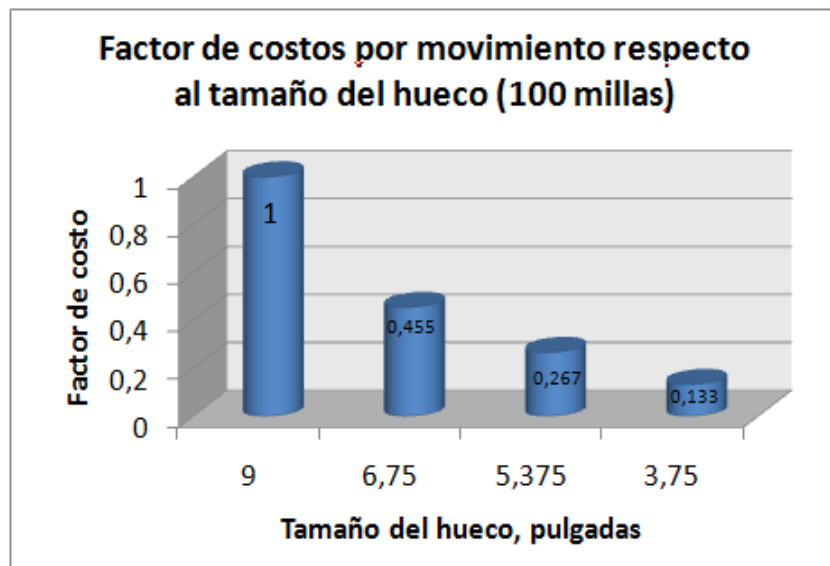
2.5 ANALISIS DE COSTOS

Los pozos Slim Hole ofrecen un potencial para reducir significativamente los costos de perforación. Este ahorro es importante para el estado actual de las condiciones económicas de la industria petrolera debido a la reducción de presupuestos de capital. La reducción en los costos de un Slimhole está entre el 40% y el 60% para la exploración de pozos lejanos o en zonas remotas y de un 25% a 40% para los pozos en desarrollo comparados con los pozos convencionales. Se pueden alcanzar por las siguientes razones:

- Menor inversión de capital
- El uso de equipos más pequeños de perforación y/o workover
- Reducción en el tamaño del casing y los costos
- Locaciones más pequeñas
- Reducción de ripios, brocas, lodo, cementación y costos de combustible asociados con el tamaño del hueco.

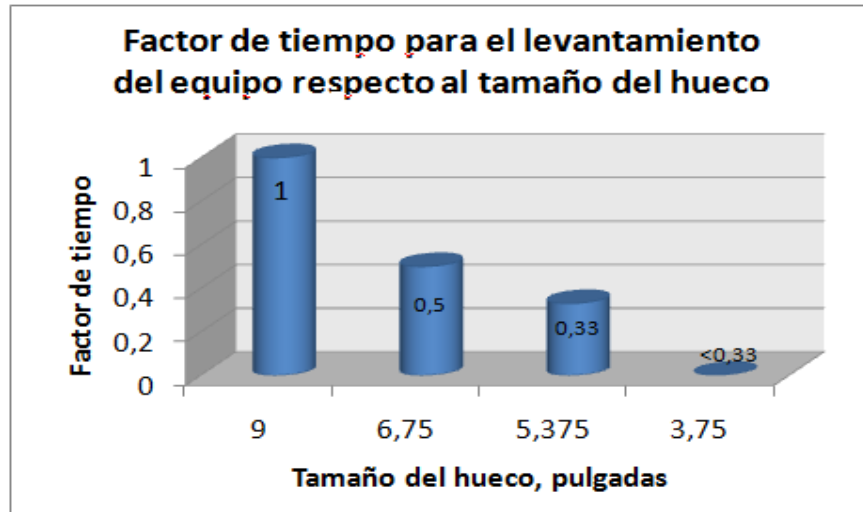
A continuación se ve la reducción en tiempo y costos de la perforación Slim Hole aunque sean del año 1950 y son bajos según los estándares actuales, el ahorro en los costos relativos y de tiempo probablemente siguen siendo validos, estos resultados se ven desde la figura 12 hasta la figura 14.

Figura 12. Factor de costo por movimiento (100 millas).



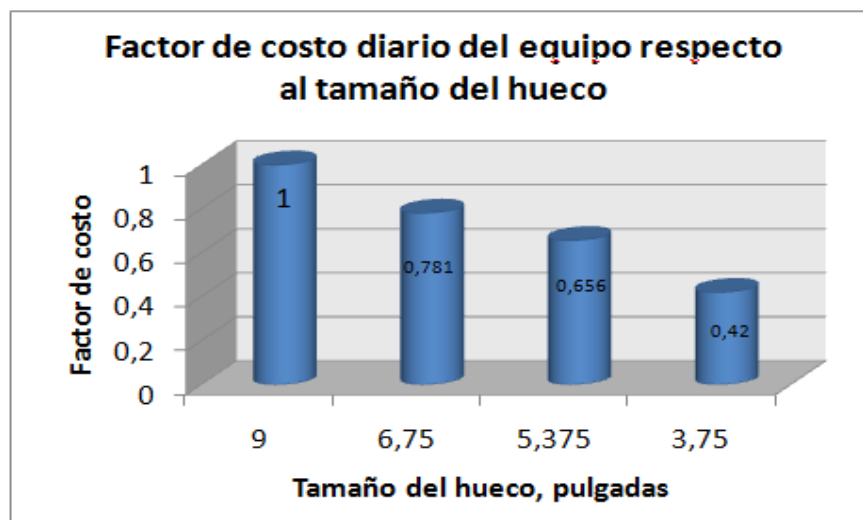
Fuente: Staff 1993. BP to Survey Slimhole Tech Drilling Contactor, September 1993, p18.

Figura13. Factor de levantamiento del equipo.



Fuente: Staff 1993. BP to Survey Slimhole Tech Drilling Contactor, September 1993, p18.

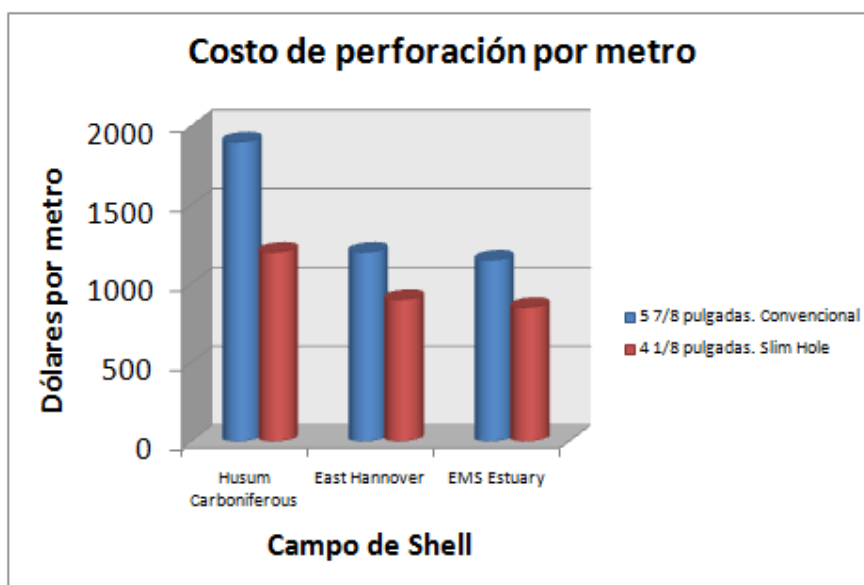
Figura 14. Factor de costo diario del equipo.



Fuente: Staff 1993. BP to Survey Slimhole Tech Drilling Contactor, September 1993, p18.

Recientemente, el análisis de los datos en tres campos por Shell muestran que, debido a un mejor desempeño, el costo de perforación por metro de un hueco de 4 1/8 pulgadas perforado está entre 19% y 41% más bajo que el de la perforación convencional de 5 7/8 pulgadas (figura 15).

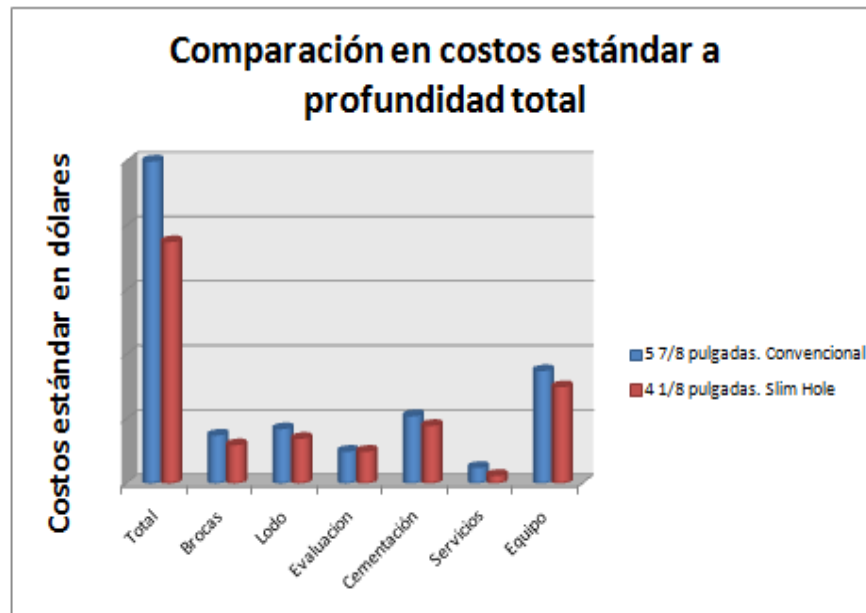
Figura 15. Costo de perforación por metro



Fuente: McLaughlin, Philip L. 1959. Reassessing the Merit of Small-Diameter Drill Holes, Ninth Annual Drilling Symposium, Pennsylvania State University, University Park, PA, October 8-10.

Basándose en un pozo individual, se estima que cuando la medida final del hueco de un pozo de gas de 15748 pies es reducido de 5 7/8 a 4 1/8 pulgadas, el costo se reduce en un 24% (figura 16) y el volumen de ripios teórico es reducido a la mitad.

Figura16. Costos de comparación a profundidad total.



Fuente: McLaughlin, Philip L. 1959. Reassessing the Merit of Small-Diameter Drill Holes, Ninth Annual Drilling Symposium, Pennsylvania State University, University Park, PA, October 8-10.

En cuanto a la eliminación de ripios si el tamaño de un Slimhole es la mitad que el de un convencional, el volumen de ripios se reducirá en un 25% del volumen convencional. Esto reducirá en gran medida los costos de disposición. Los tamaños de hueco más pequeños dan como resultado una disminución de seis veces en volumen de ripios y la correspondiente reducción en el volumen de lodo. En general, el volumen anular de un pozo Slim Hole está en un orden de menor magnitud que el volumen convencional.

3. EVALUACION DE LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGIA SLIM HOLE EN EL CAMPO ESCUELA COLORADO

Debido a que en el Campo Escuela Colorado se tiene previsto perforar pozos infill, se presenta un análisis de la viabilidad de aplicación con la tecnología de perforación Slim Hole.

3.1 PERFORACIÓN INFILL

Dadas las circunstancias apropiadas la perforación infill puede competir favorablemente con las técnicas de recobro mejorado, con base en el factor de recobro por una menor inversión y menores costos de operación. La perforación Infill es una técnica en la cual se perforan nuevos pozos después de una producción primaria o un desarrollo secundario del campo, con esto se puede obtener una mejora en las eficiencias de barrido vertical y areal, mejorar la continuidad lateral entre zonas productoras debido a la reducción en el espaciamiento entre pozos, además, reducir los límites económicos del proyecto debido a la aceleración en la producción o en el mejor de los casos al aumento en las reservas probadas del campo.

Mediante el estudio de la información que se tiene del campo como datos estadísticos e históricos, geológicos y petrofísicos entre otros; se desarrolla metodológicamente la selección de las zonas de mayor factibilidad para llevar a cabo la perforación Infill con Slim Hole y se establece técnicamente la mejor opción mediante la elaboración de un programa típico de perforación junto con un análisis de costos comparativo para poder observar la viabilidad del proyecto.

3.1.1 Antecedentes de la perforación Infill

A pesar de que la perforación Infill siempre ha sido parte de un buen manejo de campo, a principios de 1980 fue reportada como un proceso independiente de la inyección de agua y reconocido como un proceso para incrementar el recobro.

La experiencia en campo con la perforación Infill es bastante extensa, pero hasta el momento ha sido poco documentada. Se cree que debido a las reservas actuales fueron influenciadas en medida desconocida por la perforación Infill, implícita en los distintos proyectos de recobro, puede, como tal, no tener el gran potencial teórico propuesto.¹⁶

En numerosas experiencias en otros campos alrededor del mundo los resultados de la perforación Infill están incompletos pero abarcan toda la gama de proyectos, desde los primarios hasta el recobro terciario. A continuación algunos casos de estudio de campos.

Recobro Primario

El campo Raja,¹⁷ ubicado al sur de Sumatra produjo desde 1940 a 1976 a partir de 36 pozos con un espaciamento de 80 acres. Entre 1976 y 1978, se perforaron 6 pozos nuevos, incrementando la producción de 300 a 3500 BOPD.

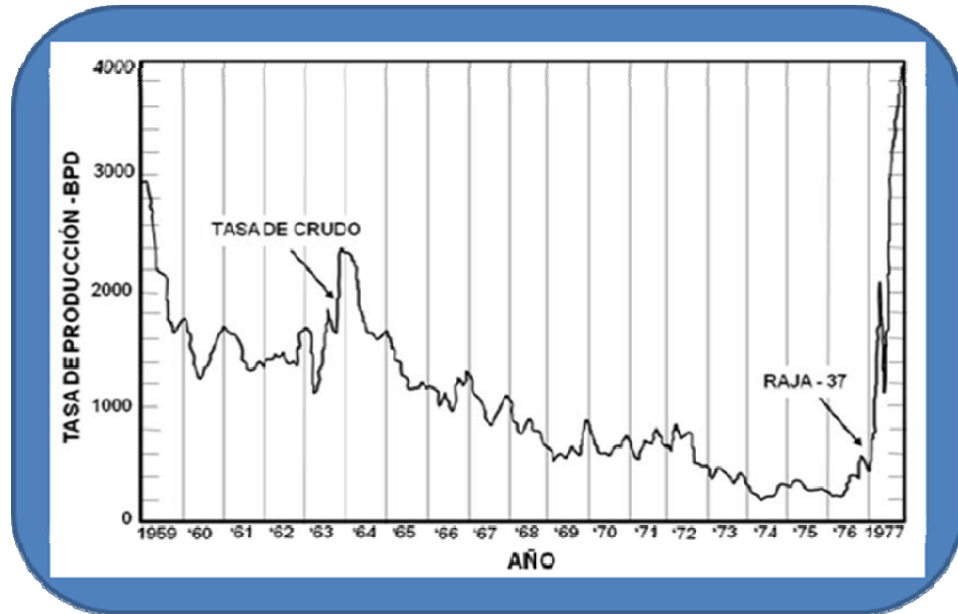
Esta zona presenta una geología bastante complicada, con producción de varias limolitas y arenas a lo largo de un espesor de 1500 ft. Presenta canales de tipo meándricos y está en toda la estructura. La aplicación de un proyecto de perforación Infill en el campo Raja tuvo un incremento de más de 10 veces en la producción debido a una mejora en la continuidad lateral. La figura 17

¹⁶ ADAMS, N.J. "Drilling Engineering. A Complete Well Planning Approach". PennWell Book. Tulsa, Oklahoma. 1985.

¹⁷ AFANADOR, Carlos. Y DELGADO, Luis. "Viabilidad Técnica y Económica de la Perforación Under Balance Aplicada al Campo Escuela Colorado". Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Químicas. Escuela Ingeniería de Petróleos, 2008.

muestra el comportamiento de la producción al momento en el que se implemento la perforación Infill.

Figura 17. Producción del campo Raja después del proyecto Infill.



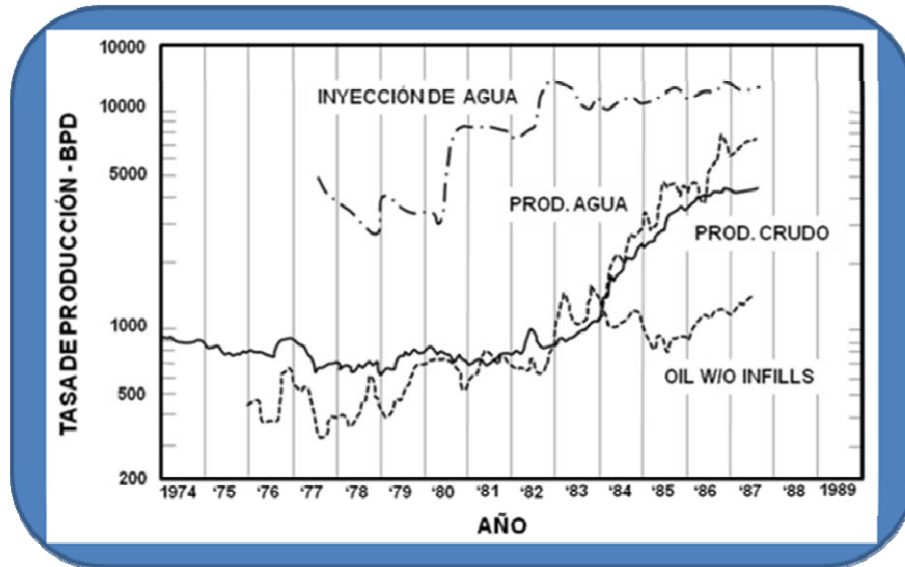
Fuente: BASUNI, M.N. "Successful Infill Drilling in Raja Field Causes Ten-Fold Increase in Production", Proc., Indonesian Petroleum Assn. (Junio 1978) 277-93.

Recobro Secundario

El desempeño de un proyecto de perforación Infill con inyección de agua en la unidad de North Riley [Ref 22] se muestra en la figura 18. A partir de 1984, 91 pozos Infill fueron perforados, produciendo más de 3.2 millones de barriles de crudo. El promedio de producción de cada pozo Infill es de 20 BOPD, representando más del 70% de la producción total. La producción final esperada a partir del análisis de curvas de declinación para los pozos Infill es de 145000 barriles por pozo. Aplicando la perforación Infill para estos pozos, el campo pasó de un arreglo de 5 puntos, con un espaciamiento de 80 acres, a

uno de 9 puntos manteniendo el espaciamento. Por lo cual, la mayor parte de la actividad en este campo es de conversión de pozos.

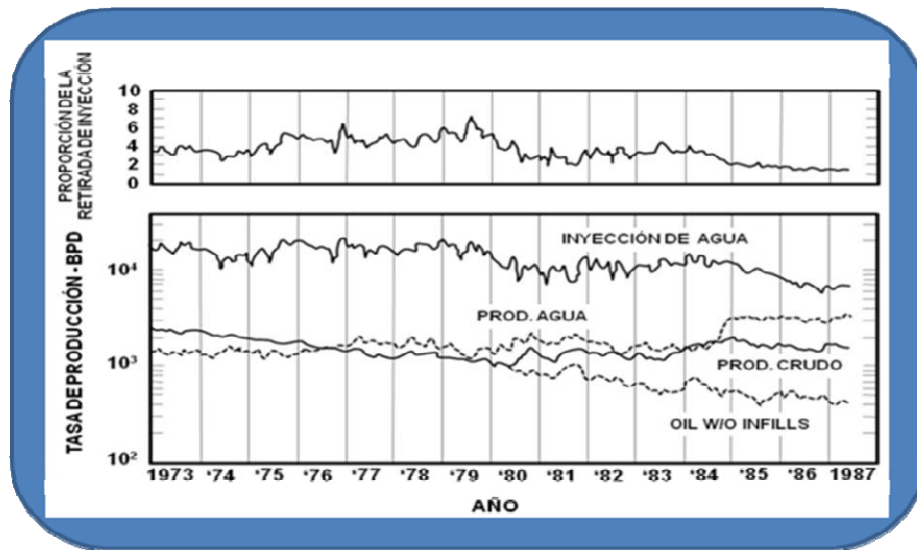
Figura 18. Grafica de la producción, Unidad de North Riley.



Fuente: modificado por los autores de GOULD, T. L. y SAREM A. M. S. "Infill Drilling for Incremental Recovery", JPT (Marzo 1989) p 229-237.

A continuación la Figura 19 muestra el proyecto de inyección de agua con la implementación de perforación de pozos Infill en la unidad de Dollarhide. Desde 1980, 44 pozos Infill fueron perforados, produciendo más de 2.65 millones de barriles de crudo. Estos pozos producen más del 80% de los 2000 BOPD que produce el campo. El análisis de la curva de declinación del campo muestra la producción total de crudo y la producción de crudo con espaciamento de 40 acres. Esta figura nos indica que aun incrementando el número de pozos, estos no proporcionan ninguna interferencia. La producción final promedio para los pozos Infill es de 125000 barriles de petróleo por pozo al final de la curva de declinación.

Figura 19. Grafica de la producción, Unidad de Dollarhide.



Fuente: modificado por los autores de GOULD, T. L. y SAREM A. M. S. "Infill Drilling for Incremental Recovery", JPT (Marzo 1989) p 229-237.

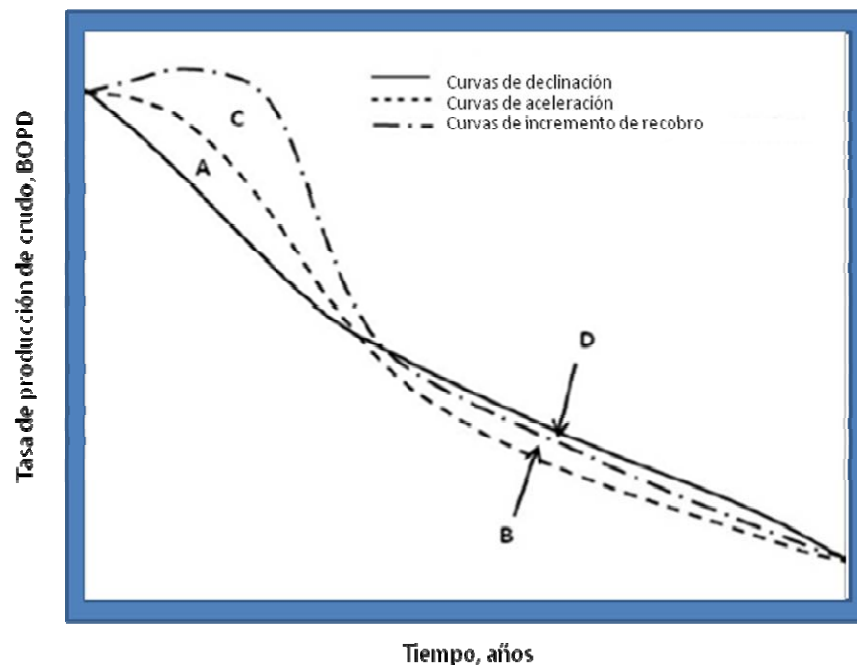
3.1.2 En que consiste la perforación Infill

La perforación Infill se define como una técnica de perforación de nuevos pozos después de una producción primaria o un desarrollo secundario del campo. Es muy importante debido a que contribuye a un mayor recobro ya sea por inyección de agua, de CO₂ o demás métodos de recobro. Para el caso de un yacimiento homogéneo la perforación Infill resulta en una aceleración de la producción, pero no proporciona un incremento en las reservas. Sin embargo, en el caso de yacimientos heterogéneos con poca continuidad se pueden obtener reservas adicionales, en las cuales se pueden localizar zonas no drenadas que mediante la implementación de esta técnica podrán ser perforadas y producidas posteriormente mediante algún método de producción. El campo Escuela Colorado es un campo heterogéneo con poca continuidad, lo cual lo hace un buen prospecto con gran potencial para la implementación de una metodología de perforación Infill. La Figura 20 muestra una grafica de

Producción vs Tiempo, la curva típica de declinación (caso base), aceleración e incremento del recobro.

Para el caso de la aceleración, el área bajo la curva es igual al área bajo la curva de la de declinación. Es decir, las áreas A y B entre las curvas de aceleración y declinación son iguales, debido a que no se está obteniendo incremento de reservas de petróleo. En el caso del incremento del recobro, el área bajo la curva es mayor que en comparación con el área bajo la curva de declinación. Es decir, el área C entre las curvas de incremento y de declinación es mayor que el área D entre las mismas curvas, esto es debido a las nuevas reservas encontradas.¹⁸

Figura 20. Producción vs. Tiempo



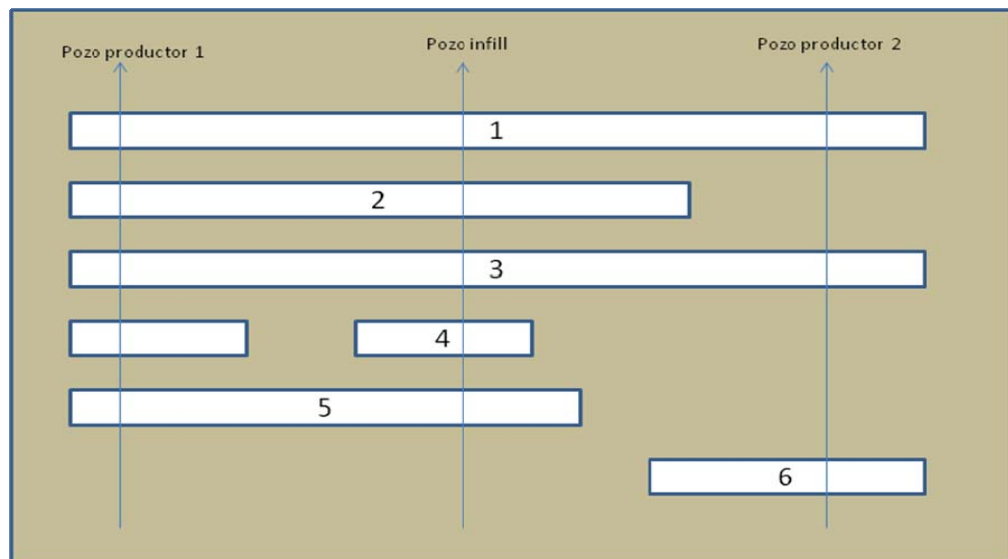
Fuente: modificado por los autores de THAKUR, G.C. y SATTER, A. "Integrated Waterflood asset Management". Tulsa, Pennwell Book, 1998.

La heterogeneidad y la discontinuidad pueden ser atenuadas con la aplicación de la técnica de perforación Infill, reduciendo el espaciado mediante la

¹⁸ BASUNI, M.N. "Successful Infill Drilling in Raja Field Causes Ten-Fold Increase in Production", Proc., Indonesian Petroleum Assn. (Junio 1978) 277-93.

perforación de nuevos pozos que se verá reflejado en un aumento de la conectividad entre inyectores y productores. La Figura 21 muestra un corte transversal a la formación, denotando una discontinuidad y la heterogeneidad del yacimiento. Con la implementación de la perforación Infill se acelera la producción ya que produce de los estratos 1, 2, 3, 5, 6; los cuales son producidos por los pozos 1 y 2. El mayor aporte del pozo Infill es el incremento de las reservas al poner a producir la arena 4, una arena que a causa de la naturaleza del yacimiento (heterogéneo) no se había encontrado.

Figura 21. Mejoras de la discontinuidad por la perforación Infill



Fuente: modificado por los autores de THAKUR, G.C. y SATTER, A. "Integrated Waterflood asset Management". Tulsa, Pennwell Book, 1998.

Algunos factores que contribuyen al incremento del recobro después de la perforación son los siguientes,¹⁹:

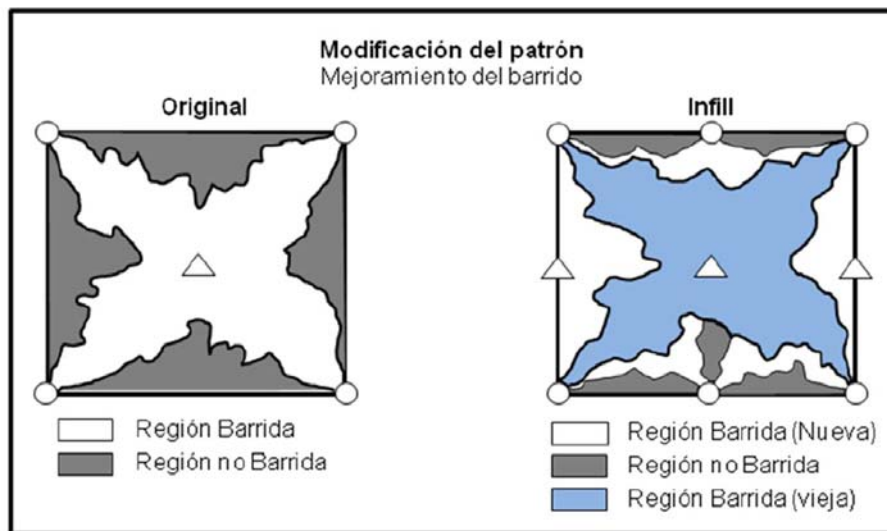
- Mejora en el barrido areal.
- Mejora en el desequilibrio de inyección debido a la heterogeneidad areal.

¹⁹ BLASKOVICH, F.T. "Historical Problems with Oil Field Rejuvenation". SPE, (Junio 2000). SPE 62518.

- Mejora en el barrido vertical.
- Mejora en la continuidad lateral entre zonas.
- Reducción del límite económico.

En la mejora de la eficiencia de barrido areal, el crudo retenido en las esquinas o zonas donde no hay inundación es desplazado inmediatamente debido al cambio de los patrones de inyección, es decir, perforando nuevos pozos y cambiando pozos productores por inyectoros para invertir las líneas de flujos, y así tener una mayor eficiencia de barrido areal y vertical. La Figura 22 muestra el mejoramiento en el barrido con el cambio del patrón de inyección.

Figura 22. Modificación del patrón de inyección.



Fuente: modificado por los autores de THAKUR, G.C. y SATTER, A. "Integrated Waterflood asset Management". Tulsa, Pennwell Book, 1998.

La conectividad lateral puede mejorarse mediante la perforación de un pozo Infill entre dos pozos ya existentes, abriendo una nueva zona entre ellos, dando como resultados un incremento en el recobro. La aceleración en la producción, debido a la perforación Infill, acarrea grandes beneficios económicos, ya que permite alcanzar uno de los objetivos más perseguidos por la compañías, que

es la obtención de ganancias en el menor tiempo posible, debido a los altos costos que implica la producción de crudo.

Varios factores deben ser considerados para la selección de un proyecto de perforación Infill, algunos de estos son,²⁰

- Desempeño producción/inyección.
- Descripción del yacimiento.
- Diseño del proyecto de perforación Infill.
- Evaluación económica.

Un modelo integrado de yacimiento requiere de un amplio conocimiento de geología, geofísica, propiedades de los fluidos, flujo de fluidos, mecanismos de recobro, perforación y completamiento de pozos, además de la historia de producción del pozo. Todo esto, juega un papel importante en el diseño de la metodología más apropiada para el proyecto de perforación Infill en un campo maduro.

Algunas características del yacimiento pueden ser útiles para evaluar la aplicabilidad de la técnica de perforación Infill. Con base en resultados positivos, obtenidos de varios proyectos realizados en campos alrededor del mundo, se han establecido ciertos rangos para las propiedades del yacimiento²¹ Estos valores sirven de guía en la selección de campos viables para la implementación de un programa de perforación de pozos Infill, para lo cual es necesario desarrollar un modelo integrado de yacimiento como se dijo con anterioridad teniendo en cuenta la siguiente información de campo:

²⁰ CALVETE, F. Información Técnica Campo Escuela Colorado (diapositivas). Bucaramanga, 2007. 39 diapositivas.

²¹ CAPACHO, C.A y VARGAS E. "Diseño de un Programa de Perforación en El Opón". Trabajo de grado de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, 1975.

- Profundidad, ft. 4300 a 7000
- Espesor neto, ft. 12 a 500
- Permeabilidad, md 0.7 a 27
- Porosidad, % 7 a 19
- Saturación de agua, % 20 a 45

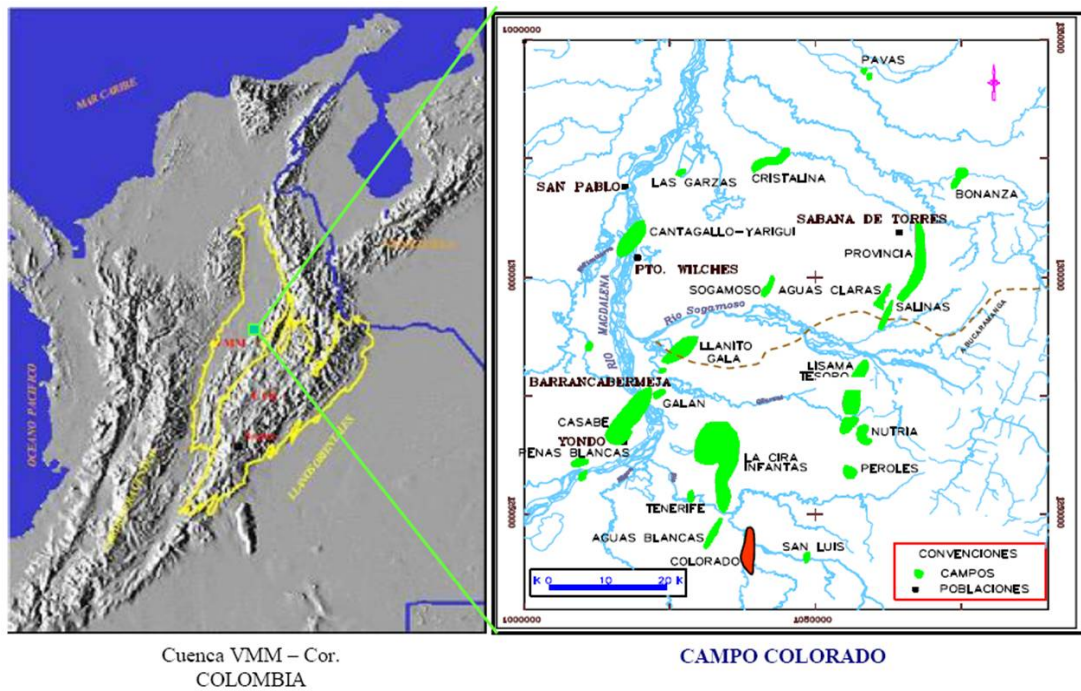
Estos rangos corresponden a valores experimentales, pero campos con valores fuera de los rangos no necesariamente serán descartados como candidatos potenciales para la implementación de un programa de perforación de pozos Infill.

3.2 DESCRIPCION DEL CAMPO ESCUELA COLORADO

3.2.1 Ubicación geográfica del Campo Escuela Colorado

El Campo Escuela Colorado es una unidad académica administrativa de carácter científico, tecnológico y de operación de hidrocarburos, creada para poner en funcionamiento el convenio de cooperación empresarial con fines científicos y tecnológicos suscrito ante la Universidad Industrial de Santander y ECOPETROL S.A. el principal objetivo de este convenio es que la universidad incorpore un componente práctico a su oferta académica, y que la industria petrolera nacional disponga de un laboratorio para la experimentación y desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a aumentar la producción del país.

Figura 23. Ubicación Campo Colorado.



Fuente: Gerencia Magdalena Medio, “Diagnostico y Estrategias de Recobro Campo Colorado” Instituto Colombiano del Petróleo. 2003.

El Campo Colorado esta situado en la parte central de la concesion de Mares, en el departamento de Santander (Colombia) en jurisdiccion del municipio de San Vicente del Chucurí, en la Cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) en la Provincia Estructural del Piedemonte Occidental de la Cordillera Oriental, al sureste del municipio de Barrancabermeja (Santander) y al sur del Campo La Cira – Infantas, entre coordenadas $X= 1'036.000 - 1'040.500$ Este y $Y=1'238.000 - 1'247.500$ Norte con origen Bogotá, en el área de la antigua concesión De Mares. Se desarrollo completamente entre los años de 1953 y 1964 en donde se perforaron la mayoría de los pozos, alrededor de unos 60, con lo cual se aumento a 75 el total de pozos perforados en la estructura.

3.2.2 Reseña Histórica

La explotación se realiza entre los años de 1923 a 1932 cuando se perforaron 7 pozos, de los cuales todos, excepto el N° 7, fueron abandonados por problemas mecánicos. En Febrero 11 de 1932 y con el abandono del pozo C-6 se finalizó la primera fase exploratoria. Posteriormente se realizaron estudio superficiales; se hicieron levantamientos gravimétricos. El 3 de Septiembre de 1945 se empezó a perforar el pozo C-9 al cual se le realizaron pruebas adecuadas que aportaron resultados satisfactorios, estos alentaron a la Troco a programar perforaciones para el lapso (1945-1946) perforando un total de 8 pozos. Entre los años 1953 a 1964 Ecopetrol desarrollo completamente el campo, mediante la perforación de 60 pozos para un total de 75 pozos perforados en la estructura. En el año 1961 alcanzo la maxima producción, con un caudal de 1771 BOPD, declinando rapidamente, hasta llegar a un valor de 467 BOPD en 1966/04, caracterizandose este periodo por la perdida de pozos productores debido a diferentes problemas mecanicos como el taponamiento de las lineas por parafinas. El maximo numero de pozos activos se alcanzó en 1963 con un total de 44 pozos. A partir de 1966 y hasta el año 1976 se mantuvo con una producción promedio de 670 BOPD. Desde 1976 se empezó a notar un aumento en la declinación, pasando de 692 BOPD en 1976/06 a 47 en 1989/06. Se han realizado campañas de “Workover” recuperando la producción del area, pero la declinación es igualmente fuerte perdiendose rapidamente los resultados de los trabajos realizados.

3.2.3 Marco regional

La evolución tectónica del VMM ha sido caracterizada por eventos tectónicos distensivos que tuvieron lugar en Triásico tardío y el Cretácico tardío con algunas interrupciones, comenzando con un graben supracontinental limitado por paleofallas normales, cuya MARCO subsidencia causada por la tectónica de bloques (Fabre, 1983) esta ligada a la depositación de los sedimentos pre-Cretaceos de las formaciones Bocas, Jordán, Girón, y los Santos. A comienzos

del Cretáceo la distensión desencadena una regresión general hasta principios del Terciario, la cual está marcada por la depositación de la Formación Lisama. La fase tectónica en la misma época en que ocurre vulcanismo en la Cordillera Central, compresiva de la depresión del VMM habría comenzado a formarse a finales del Cretáceo e inicios del Paleoceno y se extiende hasta el Reciente, adquiriendo su forma actual en el Mioceno (Morales, 1985). Durante el Paleoceno medio ocurre el levantamiento del Macizo de Santander – Floresta y desde el Eoceno hasta el Mioceno se depositaron las formaciones La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado en ambientes continentales. Una fase de compresión mayor ocurrida durante el Mioceno medio Tardío debido al levantamiento orogénico de la Cordillera Oriental provoca la deformación de los sedimentos hasta entonces depositados, formando una cadena plegada y fallada cabalgante con vergencia al occidente. Las paleofallas normales de basamento formadas en la fase distensiva (Triásico – Cretáceo tardío), son reactivadas como fallas inversas durante el Mioceno y Plioceno.

Durante el Mioceno Tardío Plio – Pleistoceno se depositó la última secuencia molásica representada por el Grupo Real, el Grupo Mesa y depósitos recientes, los cuales están poco o nada deformados (Fabre, 1983).

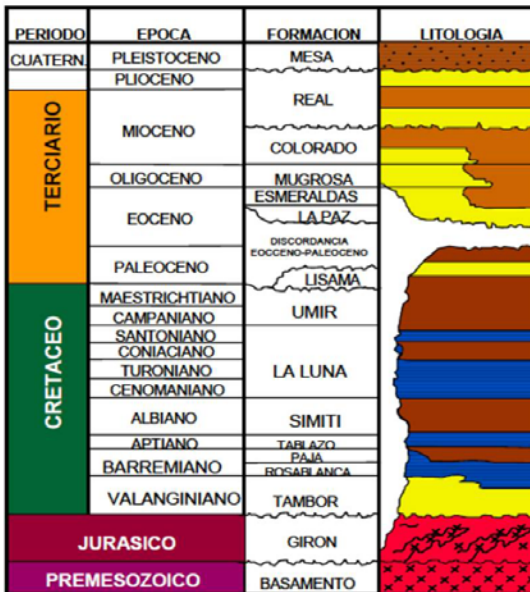
El VMM constituye una depresión tectónica con dos márgenes bien diferenciadas; un borde pasivo al occidente caracterizado por una geometría monoclinas con presencia de truncamientos de las formaciones Cretácicas que desaparecen hacia la Cordillera Oriental la deformación se incrementa con un complicado margen compresional (Martínez et al., 1989), de tal manera que el subsuelo del Cretáceo es cada vez más antiguo hacia el Oeste y el Cretáceo superior se restringe al Este del VMM. Sobre este subsuelo descansan discordantemente las rocas de la secuencia sedimentaria del Terciario extendida heterogéneamente por toda la cuenca del VMM, cuya base presenta una relación de “onlap” hacia el borde oeste de la cuenca. La distribución y el tipo de depósitos está fuertemente controlada por la paleo topografía que distribuye diferentes asociaciones de facies de acuerdo a su localización paleogeográfica. En los depósitos como en el área de Yarigui, Cayumba y

Vijagual los ciclos estatigraficos son mas espesos y contienen generalmente mayor fracción de facies arenosas de canal. Hacia los paleo altos, como la Cristalina, Cachira (Sogamoso) y Casabe las capas terminan en “onlap” y predominan las facies finas de llanura de inundación y complejos de “crevasse splay” (ICP, 1999).

3.2.4 Estratigrafía de la cuenca del Valle Medio del Magdalena

La secuencia estratigráfica del VMM abarca edades desde el jurásico tardío hasta el reciente (Figura 24). Los alcances de este estudio son específicamente las unidades productoras correspondientes a la sección del Terciario.

Figura 24. Columna estratigráfica generalizada Cuenca VMM.



Fuente: Diagnostico y Estrategias de recobro Campo Colorado”. ECOPEPETROL S.A., Gerencia Magdalena Medio, Instituto Colombiano del Petróleo. 2003.

3.2.5 Pre-Cretáceo

3.2.5.1 Formación Girón. La Formación Girón está constituida por una serie de cuarzoarenitas limpias de grano medio que gradan a cuarzoarenitas conglomeráticas y conglomerados finos con guijos de cuarzo lechoso y ocasionalmente con presencia de chert negro. Las areniscas presentan estratificación cruzada y capas lenticulares medias a gruesas, la selección es pobre, con granos subredondeados, matriz arcillosa y cemento silíceo. El espesor de esta formación oscila entre unos 0 a 4500 metros, con un reporte de 2600 metros en la sección del Río Lebrija. Se ha definido como una de las facies características de la “Mosca del Jurásico”, con algunas intercalaciones más finas de capas rojas.

3.2.6 Cretáceo

3.2.6.1 Formación Los Santos-Tambor. La secuencia comprendida por las Formaciones Los Santos – Tambor en algunas zonas reposa de manera discordante sobre rocas del Jurásico. En esta área se conocen afloramientos donde el tope de la Formación Girón corresponde a un conglomerado de 80 metros de espesor y está supra yacido discordantemente por la Formación Los Santos.

En otros lugares como el Río Chucurí, el tope de la Formación Girón está conformado por unas arcillas rojas que presentan principalmente intercalaciones delgadas de areniscas hacia su base y donde el contacto con la Formación Tambor es concordante. Hacia la base de la Formación Tambor se encuentra un conjunto rudfítico, suprayacido por un intervalo lutítico arenoso seguido por un conjunto arenoso. Los ambientes de depositación corresponden a abanicos aluviales, ambientes estuarinos a mareales y ríos de baja sinusidad en llanuras aluviales. Los análisis petrográficos y petrofísicos en muestras de superficie reportan porosidad del orden de 2.0% y permeabilidad de 0.08 mD. El espesor medido en el área de estudio alcanza los 620 metros, sin determinar su contacto a la base.

3.2.6.2 Formación Rosa Blanca. Está constituida por micritas y esparitas, algunos niveles lumaquéllicos, lodolitas calcáreas, algunas arenitas lodosas calcáreas con gradación a niveles micríticos y niveles concreciónales. Fue depositada en una cuenca subsidente que originó transgresión hacia el Este. El contanto inferior con la Formación Santos – Tambor es concordante. El ambiente de depósito es inframareal a supramareal con alguna influencia de tormentas y algunas facies evaporíticas. El espesor promedio en el área de estudio es de 690 metros.

3.2.6.3 Formación Paja. La base de la Formación Paja presenta intercalaciones de micritas, calizas lumaquéllicas y lodolitas carbonosas. Hacia la parte media presenta intercalaciones de capas medias a gruesas de calizas arenosas a arenitas calcáreas de grano fino, ocasionales niveles muy gruesos y macizos de calizas lumaquéllicas. Hacia el tope presenta lodolitas carbonosas levemente limosas, algo calcáreas, silíceas, intercalaciones de micritas compactas macizas en capas gruesas a muy gruesas. Esta litología corresponde a ambientes marinos someros, intermareales a supramareales. Se encuentra reposando en contacto concordante sobre la Formación Rosa Blanca. Su espesor en el área varía entre 230 a 560 metros.

3.2.3.4 Formación Tablazo. La Formación Tablazo está en contacto gradacional con la Formación Paja hacia la base, donde está constituida por micritas lodosas, en la parte media por calizas arenosas intercaladas con niveles muy gruesos de calizas lumaquéllicas. Hacia el tope se presentan intercalaciones de niveles macizos de micritas y shales negros calcáreos. En la parte media del área de estudio la sección es mas calcárea y hacia el sur se torna más arenosa.. esta secuencia fue depositada en un ambiente marino somero submareal a supramareal con oscilaciones intermareales bastante amplias. Presenta un espesor que varía entre 225 y 540 metros en el área de estudio.

3.2.3.5 Formación Simití. La Formación Simití está caracterizada por una serie de shales negros carbonosos, lodolitas calcáreas ricas en materia orgánica, generalmente con concreciones las cuales son mas abundantes hacia el tope; de estas, algunas veces se presentan manifestaciones de hidrocarburo líquido. Se depositó en un ambiente marino somero. Se encuentra en contacto gradacional con la Formación Tablazo. El espesor puede variar entre 550 y 650 metros.

3.2.3.6 Formación La Luna. La Formación La Luna está conformada por micritas, niveles concrecionales y de chert negro a marrón, en capas macizas, tabulares con laminación fina y contactos netos. La alternancia de facies laminadas y bioturbadas demuestra la existencia de condiciones anoxicas intermitentes. El contacto infrayacente con la Formación Simití es gradacional. El espesor en el área de estudio varía entre 450 y 595 metros, presentando mayor espesor hacia la parte media.

3.2.3.7 Formación Umir. La Formación Umir presenta de base a techo cuarzoarenitas de grano fino de color gris, lodolitas limoarenosas de colores grises, mantos de carbón bituminoso a sub-bituminoso. Adicionalmente, se presentan intercalaciones de cuarzoarenitas de grano medio y grueso y lodolitas carbonosas. Esta formación descansa discordantemente sobre la Formación La Luna, aunque en otros sitios del Valle Medio del Magdalena se ha descrito el contacto como gradacional. Se considera que esta unidad fue depositada en un ambiente Litoral – deltaico. Esta unidad puede alcanzar unos 1.300 metros de espesor en el área de estudio.

3.2.7 Terciario

La secuencia sedimentaria del Terciario en el Campo Colorado corresponde al intervalo Paleoceno-reciente. Las rocas sedimentarias son predominantemente de origen continental y fueron depositadas en una cuenca de antepaís. Posteriormente y hasta el Reciente la depositación se dio en una cuenca

intermontana como parte de un cinturón deformado, producto del levantamiento de las Cordilleras Central y Oriental, como respuesta a las colisiones de la Cordillera Occidental y el Arco de Panamá con el Occidente y Noroccidente de Colombia (Barrero, 1979, Colleta et al., 1990; Dengo & Covey, 1993; Cooper et al., 1995). La secuencia terciaria del VMM ha sido subdividida desde el punto de vista regional y de producción en las unidades operacionales A, B, C, D y E. Suárez (1996) utiliza un esquema crono-estratigráfico en el cual las unidades deposicionales se encuentran limitadas por discordancias y son denominadas informalmente por dicho autor como Tectonosecuencias, debido a su relación con eventos tectónicos ocurridos durante esta época en la Cuenca del VMM. La estratigrafía de base a techo corresponde a las formaciones Lisama, La Paz (Zona E), Esmeraldas (Zona D), Mugrosa (Zonas B y C), Colorado (Zona A), además del Grupo Real y el Grupo Mesa. Las Zonas D y E corresponden a la Tectonosecuencia 1 del Eoceno Superior, la cual representa la primera depositación netamente continental en la cuenca posterior al predominio marino en el Cretáceo. Las zonas B y C corresponden a la Tectonosecuencia 2 y la Zona A a la Tectonosecuencia 3. Las formaciones Colorado, Mugrosa y Esmeraldas constituyen las principales unidades almacenadoras de hidrocarburos en el VMM, las cuales han sido probadas en diferentes campos a través de la cuenca.

3.2.7.1 Formación Lisama. Las rocas del Paleoceno en el VMM están representadas por la denominada Formación Lisama, la cual se depositó en respuesta al cambio desde condiciones marinas (Formación Umir) a deltaicas, generando una secuencia regresiva de lodolitas y areniscas de grano fino a medio. Para Barrero (1979) los sedimentos clásticos finogranulares del Cretáceo tardío al Paleoceno representados en el VMM por las Formaciones La Luna, Lisama y Umir, fueron acumulados durante un ciclo transgresivo – regresivo en una cuenca sometida a subsidencia térmica y levantado posteriormente por la acreción de la Cordillera Occidental. El límite superior de la Formación Lisama está marcado por la discordancia angular del eoceno

medio. Las unidades que descansan sobre esta discordancia son variables a través de todo el VMM.

3.2.7.2 Formación La Paz. La formación La Paz esta constituida por areniscas de grano grueso a conglomeraticas depositadas en sistemas fluviales trenzados a meandricos de baja sinuosidad. La edad de esta formación se estima Eoceno tardio y su espesor puede alcanzar hasta los 2000 pies. Las areas fuente de sedimentos para la formación La Paz fueron la cordillera Central, el Paleo-macizo de Santander y el Paleo-alto de Sogamoso.

3.2.7.3 Formación Esmeraldas. La Formación Esmeraldas se encuentra suprayaciendo la Formación La Paz y abarca la mayor parte del Eoceno tardío, con un espesor que puede alcanzar unos 1.500 pies. Litológicamente está compuesta de espesos intervalos de lodolitas y limolitas oscuras con delgados mantos de carbón depositados en ríos meándricos (Rubiano, 1995); el límite de la Formación Esmeraldas esta dado por un nivel rico en moluscos de agua dulce y palinomorfos denominado “Horizonte Fosilífero Los Corros”.

3.2.7.4 Formación Mugrosa. La Formación Mugrosa tiene un espesor que varía desde 1.900 a 2.400 pies y está compuesta por intercalaciones de areniscas de grano fino y lodolitas varicoloreadas, acumuladas dentro de un ambiente de sistemas de ríos meándricos (Rubiano, 1995). Para Suárez (1996), ésta formación corresponde a la denominada Tectonosecuencia 2 cuyo tope está marcado por un nivel arcilloso rico en fósiles de agua dulce, restos de reptiles, peces y mamíferos que se conoce como el “Horizonte fosilífero de Mugrosa”.

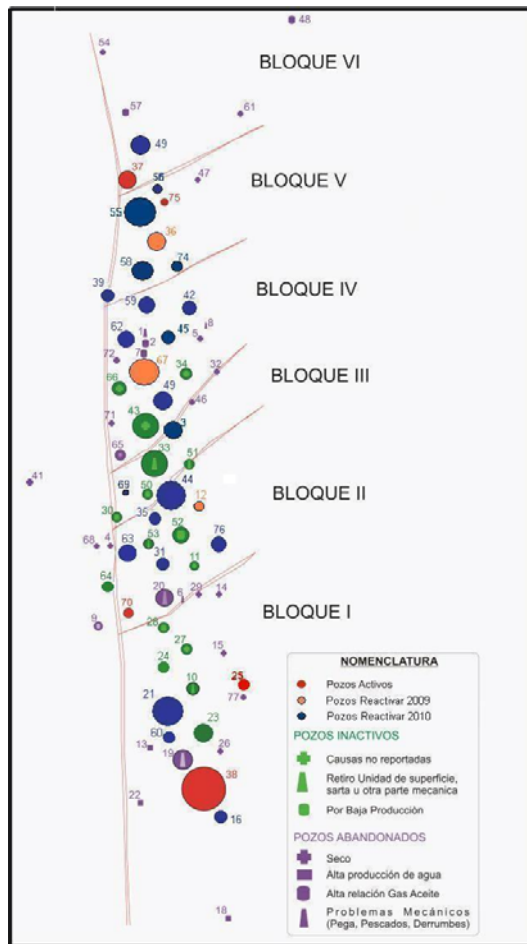
3.2.7.5 Formación Colorado. La Formación Colorado presenta un espesor de hasta 3.200 pies en el sector de los pozos Sogamoso-1 y El Dorado-1 (Campo Sogamoso hacia el norte del Campo Colorado). Está conformada por una serie de lodolitas masivas con intercalaciones de areniscas de grano fino a grueso de origen aparentemente fluvial, con presencia de barras puntuales y longitudinales (De La Cruz, 1988). Esta secuencia corresponde a la

Tectonosecuencia 3 de Suarez (1996), cuyo tope está marcado por la aparición de un nivel de lutitas carbonáceas y fosilíferas de edad Mioceno medio, conocido como “La Cira Shale”.

3.2.7.6 Formación Real. La Formación Real está constituida principalmente por conglomerados y areniscas de grano grueso con intercalaciones de arcillolitas varicoloreadas depositadas en ambientes continentales. La secuencia estratigráfica del VMM fue inicialmente descrita por Morales et al. (1958) y modificada por Etayo et al. (1958). Abarca edades desde el Jurásico tardío hasta el Reciente (Figura). Los alcances del estudio estratigráfico son específicamente las unidades productoras correspondientes a la sección del Terciario. Las formaciones Colorado, Mugrosa y Esmeraldas constituyen las principales unidades almacenadoras de hidrocarburos en el VMM, las cuales han sido probadas en diferentes campos a través de la cuenca. La secuencia sedimentaria del Terciario en el Campo Colorado corresponde al intervalo Paleoceno – Reciente. Las rocas sedimentarias son predominantemente de origen continental.

La estructura del Campo Colorado está conformada por un anticlinal asimétrico en el cual se presenta un gran número de fallas que dividen el Campo en 6 bloques (Figura 25), con lo cual se ha manejado la hipótesis de que el Campo es compartimentalizado.

Figura 25. Distribución de los pozos para Campo Escuela Colorado

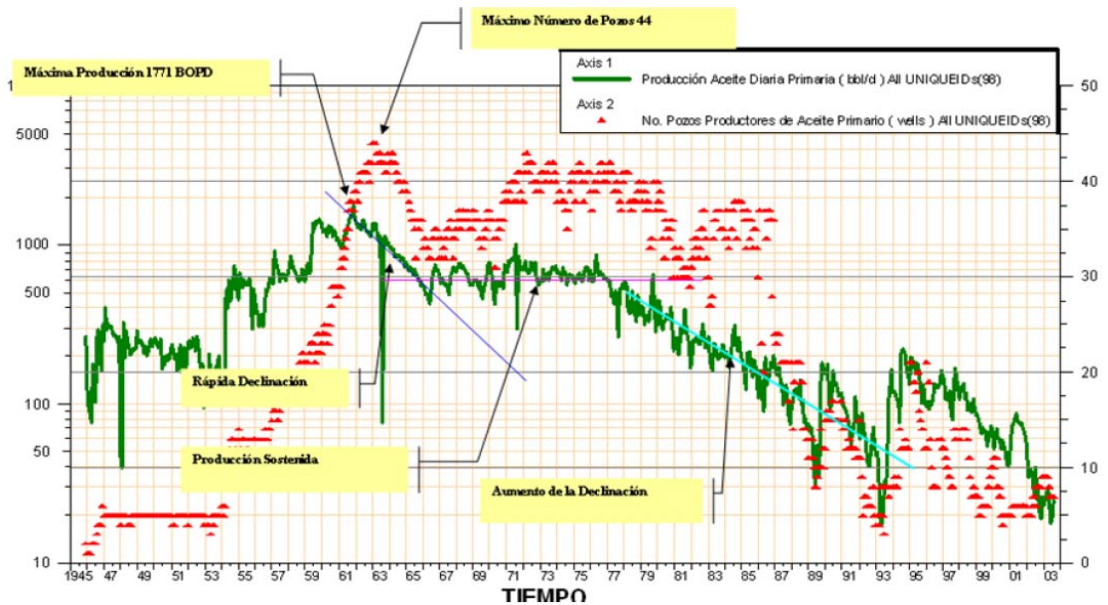


Fuente: Modificado de CALVETE, F. Información Técnica Campo Escuela Colorado (diapositivas). Bucaramanga, 2007. 39 diapositivas.

3.2.8 Historia de producción del Campo Escuela Colorado

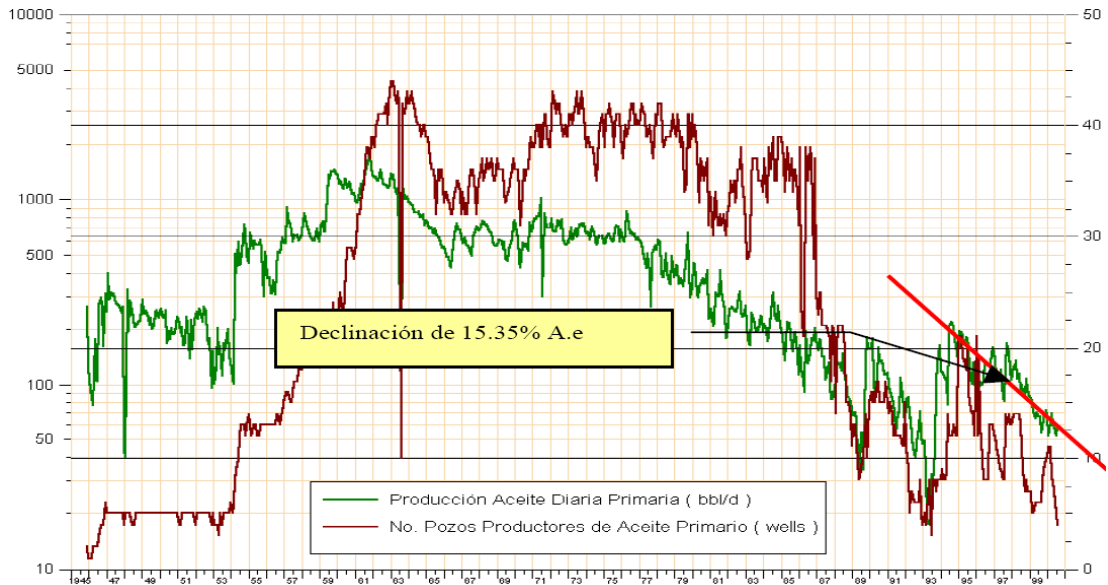
Teniendo en cuenta la reseña histórica que se citó anteriormente enfocada a la perforación, de manera general la producción que se ha producido en el Campo Escuela Colorado se observa en la figura(26) y la respectiva declinación en la producción del Campo en la figura(27)

Figura 26. Historia de Producción del Campo Colorado.



Fuente: Modificado de "Diagnostico y Estrategias de recobro Campo Colorado".
 ECOPEPETROL S.A., Gerencia Magdalena Medio, Instituto Colombiano del
 Petróleo. 2003.

Figura 27. Declinación Actual del Campo.



Fuente: Modificado de "Diagnostico y Estrategias de recobro Campo Colorado".
 ECOPEPETROL S.A., Gerencia Magdalena Medio, Instituto Colombiano del
 Petróleo. 2003.

3.3 ANALISIS TECNICO

Hay una cantidad de consideraciones que son fundamentales para el diseño de cualquier programa de pozo. La selección del tipo de equipo de perforación y su equipo de perforación en sí, es una de las consideraciones básicas.

Algunos de los elementos a ser considerados en la selección del equipo de perforación incluyen:

- Ubicación del pozo
- Rangos de profundidad del pozo y tamaños de los huecos que se van a perforar
- Esfuerzos sobre la tubería del revestimiento
- Requerimientos de rotación de la mesa rotaria (RPM)
- Tubería de perforación
- Limitación en los paquetes de perforación
- Sistemas de lodo
- Alturas de trabajo sobre la estructura
- Equipo de control de arremetida de pozo (preventor)
- Controles
- Varios (cargadores, herramientas, etc.)

Para el análisis comparativo entre la tecnología Slimhole y la perforación convencional de pozos en el aspecto técnico en este capítulo se tiene en cuenta la geometría del pozo para su estudio.

3.3.1 Diseño básico de la perforación convencional

El primer paso para realizar el análisis técnico es comparar algunos pozos ya perforados del Campo Escuela Colorado para encontrar sus similitudes en un sector determinado para el asentamiento de casing y buscar el que a mayor profundidad haya sido perforado.

Se analizan 3 pozos:

- Colorado 36
- Colorado 37
- Colorado 39

La localización de los pozos se puede observar en la Figura 28. El pozo Colorado 36 y 39 se localizan en el Bloque V, el pozo Colorado 37 en el Bloque VI.

En la Tabla 5 se observa las diferentes características de cada pozo de manera comparativa. El punto más importante es la profundidad de asentamiento del casing de superficie que oscila entre 600 y 608 pies.

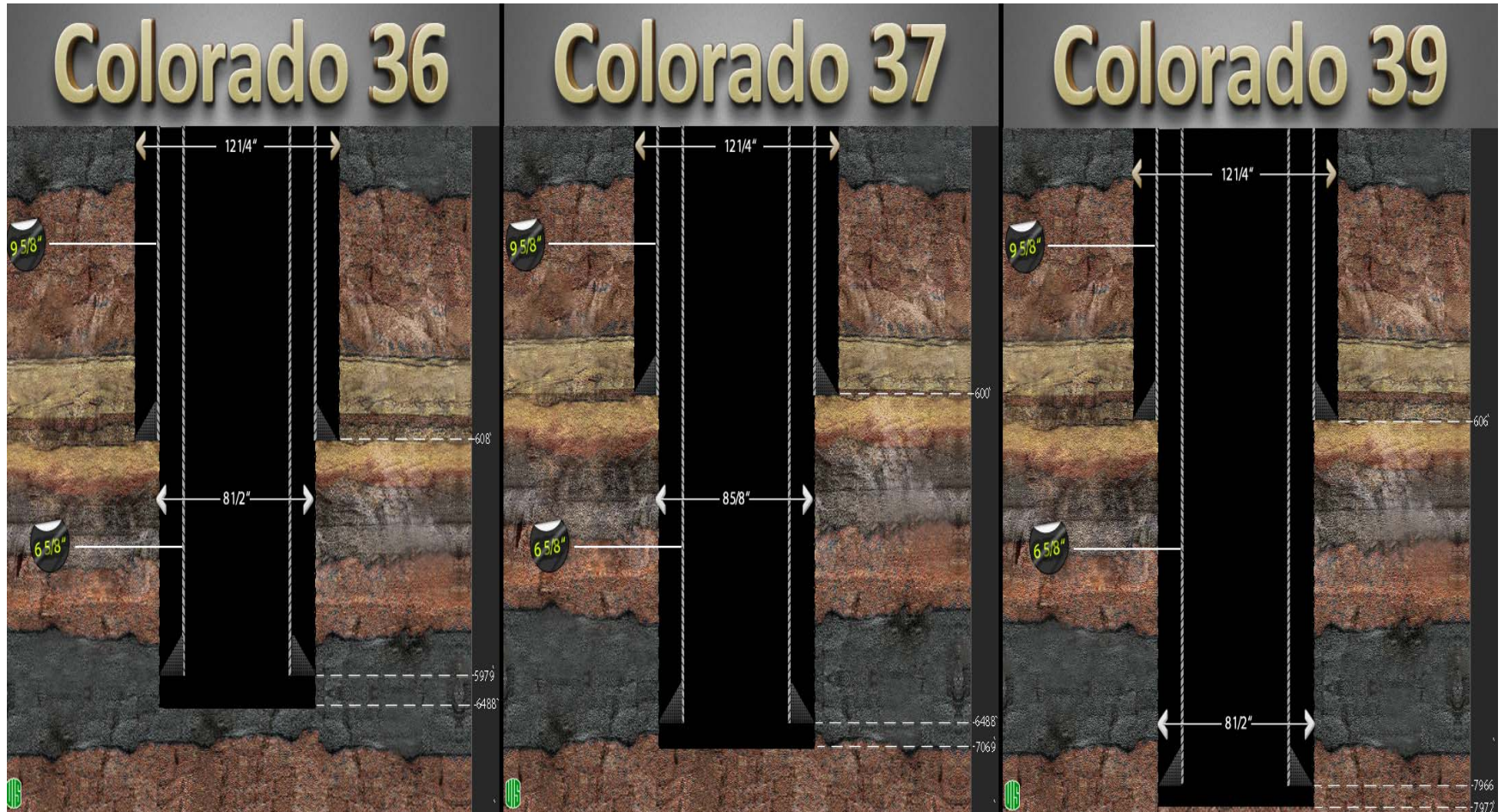
Tabla 5. Comparación de los pozos Colorado.

Tabla comparativa de los pozos colorado			
Pozo	Colorado 36	Colorado 37	Colorado 39
Cuenca	VMM	VMM	VMM
Bloque	V	VI	V
DT (ft)	6048	7069	7972
Diámetro del hueco inicial (in)	12½	12½	12½
Diámetro del hueco final (in)	8½	8⅝	8½
Diámetro del Csg en superficie (in)	9⅝	9⅝	9⅝
Diámetro del Csg en producción(in)	6⅝	6⅝	6⅝
Profundidad de asentamiento del Csg de superficie (ft)	608	600	606
Profundidad de asentamiento del Csg de producción (ft)	5979	6488	7966

Fuente: Autores.

Como durante la perforación futura de pozos infill se quiere llegar a una máxima profundidad, y el casing de superficie esta a una profundidad similar para los casos en observación, se selecciona el pozo Colorado 39. Este pozo se utilizara como base para la comparación del diseño Slimhole. El diseño grafico de la comparación de los pozos se observa en la Figura 29.

Figura 29. Comparación grafica de los pozos Colorado 36, 37 y 39.

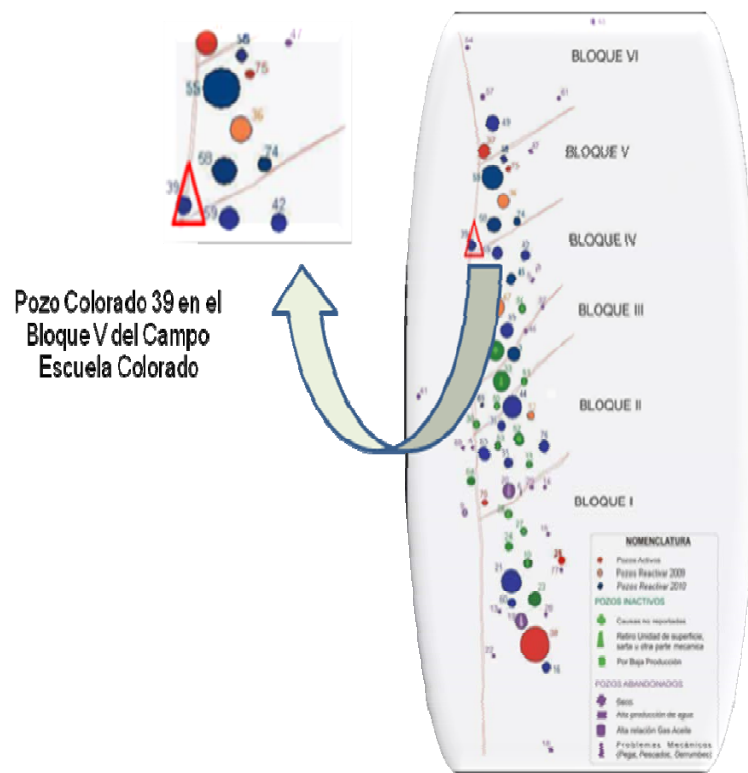


Fuentes: Autores

3.3.1.1 Pozo Colorado 39. La perforación del pozo Colorado 39 se inicio el 23 de octubre de 1957, se ubica en el departamento de Santander, en el municipio de San Vicente de Chucuri, pertenece a la cuenca del Valle Medio del Magdalena y su operador fue Ecopetrol.

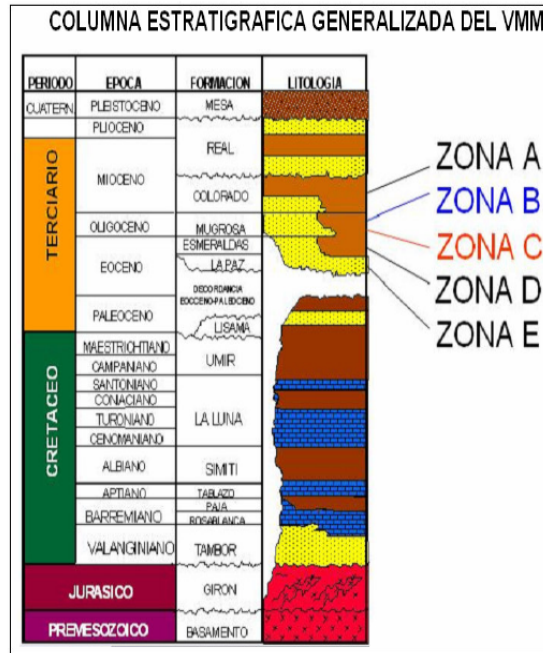
Dentro del Campo Escuela Colorado se localiza en el Bloque V (Figura 28) y su zona de interés es la AB (Figura 30).

Figura 28. Ubicación Pozo Colorado 39 en el Bloque 5.



Fuente: Modificado de CALVETE, F. Información Técnica Campo Escuela Colorado (diapositivas). Bucaramanga, 2007. 39 diapositivas.

Figura 30. Columna estratigráfica generalizada del VMM con las zonas de interés.



Fuente: Diagnostico y Estrategias de recobro Campo Colorado”. ECOPETROL S.A., Gerencia Magdalena Medio, Instituto Colombiano del Petróleo. 2003.

Este pozo fue perforado de forma normal hasta 7925 pies. Se bajo y sentó revestimientos de 9 $\frac{1}{2}$ pulgadas a 606 pies y 6 $\frac{1}{2}$ pulgadas a 7966 pies. Cementado. Tope de Cretáceo a 7925 pies.

En el proceso de completamiento se cañonearon y realizaron pruebas de formación a los intervalos 7910-7988 pies (acuífero, colapso a 7736 pies menor de 6 $\frac{1}{2}$ se colocó tapón en la parte inferior de la zona E. En los intervalos 6483-5982 pies (acuíferos y secos) y 5693-5688 pies (aceite 36.1 API). Se colocó un retenedor a 6450 pies.²²

²² Datos de registro del pozo, oficina Campo Escuela Colorado.

3.3.1.2 Características del pozo Colorado 39

Tabla 6. Tamaño del hueco del pozo Convencional

Tamaño del hueco		
Desde (ft)	Hasta (ft)	Broca (in)
0	606	12¼
606	7966	8½

Fuente: Autores

Para el revestimiento del pozo Colorado 39 convencional, se utilizaron estos dos tipos de casing:

- a) Casing de superficie: 9⁵/₈ in, J55, 40lb/ft
- b) Casing de producción: 6⁵/₈in, N80 & J55, 24 & 20lb/ft

Ver Figura 31.

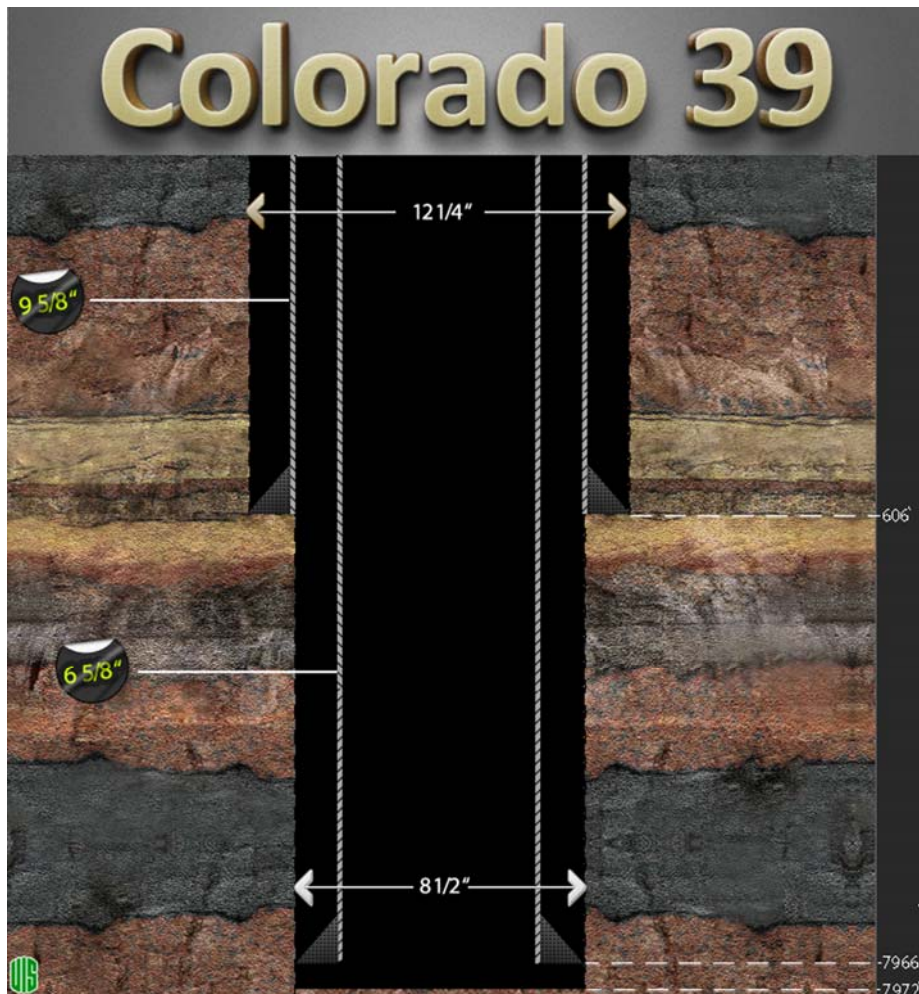
En la Tabla 7 se describe la manera de hacer el revestimiento:

Tabla 7. Revestimiento del hueco del pozo convencional

	Revestimiento					
	Top(ft)	Bottom(ft)	OD(in)	Tipo	Peso(lb/ft)	Juntas
Casing superficie	0	606	9 ⁵ / ₈	J55	40	19
Casing producción	0	3205	6 ⁵ / ₈	N80	24	77
	3205	5825	6 ⁵ / ₈	J55	20	62
	5825	7966	6 ⁵ / ₈	N80	24	52

Fuente: Autores

Figura 31. Diseño pozo Convencional Colorado 39.



Fuente: Autores

Tabla 8. Cementación pozo convencional.

Cementación del pozo convencional Colorado 39			
Revestimiento	Tamaño(in)	Profundidad del hueco (ft)	Cemento requerido (sacos)
Superficie	9 ⁵ / ₈	606	270
Producción	6 ⁵ / ₈	7966	770
# total de sacos			1040

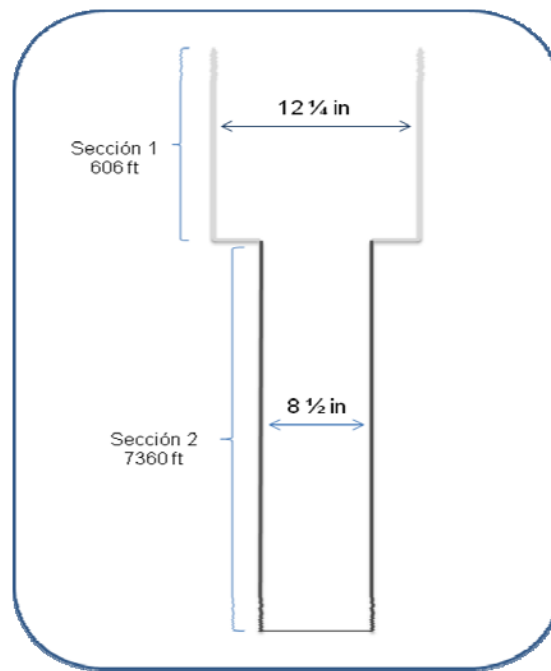
Fuente: Autores

La capacidad del hueco se determina utilizando la formula

$$\text{Capacidad del hueco} = \left(\frac{D^2}{1029.4} \right) \left(\frac{bbl}{ft} \right)$$

Siendo: D el diámetro del hueco en pulgadas

Figura 32. Esquema para capacidad de lodo en el pozo convencional



Se tienen dos secciones en el diseño (figura 32), la primera con $D=12\frac{1}{4}$ pulgadas y una longitud de 606 pies. La otra con $D=8\frac{1}{2}$ pulgadas y una longitud de 7360 pies.

En la Tabla 9 se presentan los cálculos para determinar la cantidad de lodo utilizado en cada sección del pozo, en los tanques y la cantidad total de lodo utilizado.

Tabla 9. Cantidad del lodo del pozo convencional Colorado 39.

Cantidad de lodo				
Sección	D(in)	Capacidad del hueco(bbl/ft)	Longitud de la sección (ft)	Capacidad total por sección (bbl)
1	12,25	0,145777	606	88,34
2	8,5	0,070186	7360	516,57
Capacidad total del lodo en el pozo				604,9
Lodo en los tanques= 604,9*2				1208,4
Lodo total				1813.3

Fuente: Autores

Para comparar las características de un pozo convencional con el Slimhole, se toma como base el pozo Colorado 39.

3.3.2 Diseño básico de perforación Slim Hole

Recordando por la definición que se te trato en el Capítulo 1; se llama Slimhole a todo hueco que tenga un diámetro menor al convencional, o en otras palabras Slimhole normalmente indica un pozo que está diseñado para llegar a la profundidad total (TD) con el diámetro del hueco más pequeño de lo que sería normal.

Se toma el pozo Colorado 39 y su diseño como base para realizar el respectivo sistema Slimhole.

3.3.2.1 Programa de perforación para la Tecnología Slim Hole. A continuación se plantea la manera en que se desarrollaría el programa de perforación dependiendo de las ecuaciones e información histórica correspondiente a cada caso que sea necesario.

Se analiza y compara con las condiciones del diseño convencional y se escogen dos tipos de casing:

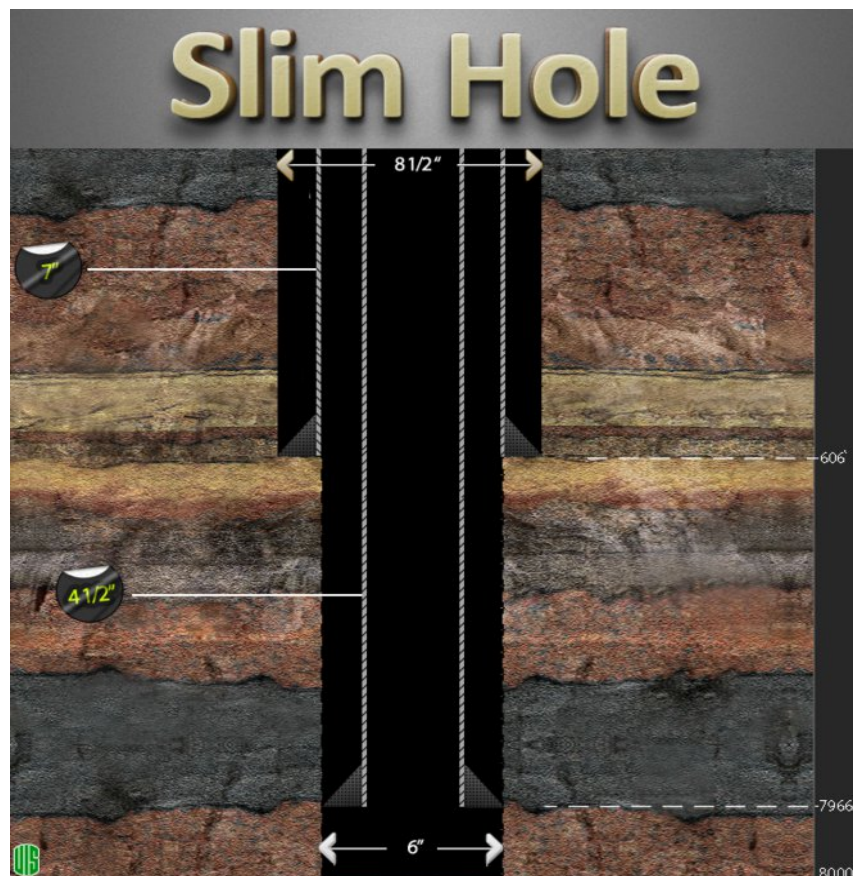
- a) casing de superficie: 7in, K55 o J55, 23lb/ft
- b) casing de producción: 4½in, N80, 11.2lb/ft

Tabla 10. Tamaño del hueco para Slimhole.

Tamaño del hueco			
Desde (ft)	Hasta (ft)	Broca (in)	Csg (in)
0	606	8½	7
606	7966	6	4½

Fuente: autores

Figura 1. Diseño pozo Slimhole



Fuente: autores

Tabla 11. Revestimiento para Slimhole

Revestimiento						
	Top (ft)	Bottom(ft)	OD (in)	Peso(lb/ft)	Tipo	Juntas
Casing superficie	0	606	7	23	J 55	15
Casing producción	0	3200	4½	11.2	N 80	75
	3200	5830	4½	11.2	N 80	61
	5830	7966	4½	11.2	N 80	46

Fuente: Autores

El cálculo de juntas se realizó con valores de casing y tubing iguales a 40 pies. Para determinar el número de sacos de cemento necesarios, se aplica la fórmula de # de sacos totales, y luego se le suma su porcentaje en exceso.

$$\# \text{ de sacos totales} = \frac{0.00319 (D_o^2 - D_i^2) * longitud}{rendimiento} + \text{exceso}$$

Se tienen dos secciones en el diseño, la primera con $D_{\text{hueco}} = 8\frac{1}{2}$ pulgadas y $D_{\text{csg}} = 7$ pulgadas, y una longitud de 606 pies. La otra con $D_{\text{hueco}} = 6$ pulgadas y $D_{\text{csg}} = 4\frac{1}{2}$ pulgadas, y una longitud de 7966 pies. Ambas secciones serán cementadas con cemento clase G que tiene un rendimiento de 1,351 y un exceso del 30%.

Se tiene en cuenta también que la densidad del cemento para el revestimiento de 7 pulgadas es de 13 lb/gal y para el revestimiento de 4½ pulgadas es de 14 lb/gal.

Tabla 12. Sacos de cemento requeridos en toda la longitud para Slim Hole.

Sección	Superficial	Producción
D(hueco)(in)	8½	6
D(csg)(in)	7	4½
Longitud (ft)	606	7360
Exceso (%)	30	30
Rendimiento del cemento G	1,351	1,351
Sacos requeridos por sección	33.3	273.7
Sacos requeridos en toda la longitud	307	
Sacos requeridos con exceso	400	

Fuente: Autores

Para el lodo repetimos el procedimiento del convencional utilizando la capacidad anular y su respectiva ecuación:

Figura 34. Esquema para capacidad de lodo en pozo Slimhole

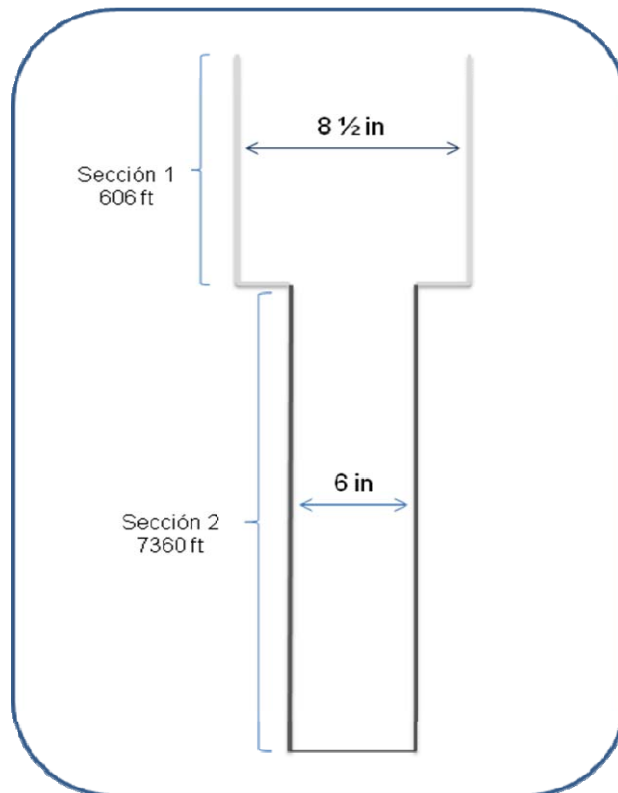


Tabla 13. Capacidad total de lodo en el pozo Slimhole.

Cantidad de lodo				
Sección	D(in)	Capacidad del hueco(bbl/ft)	Longitud de la sección (ft)	Capacidad total por sección (bbl)
1	8,5	0,070186	606	42,5
2	6	0,03497	7360	257,4
Capacidad total del lodo en el pozo				299,9
Lodo en los tanques= 604,9*2				599,8
Lodo total				899,7

Fuente: Autores

3.4 ANALISIS AMBIENTAL

3.4.1 Volumen de ripios y lodo

El volumen de ripios nunca será el volumen del hueco, el volumen de los ripios es aproximadamente de 1.5 a 3 veces el volumen del hueco.

Siempre se maneja un volumen extra que viene dado por:

- Degradación de la partícula
- Operaciones de cementación y completamiento
- Washouts del hueco
- Formaciones hinchables
- Aditivos del lodo
- Equipo deficiente de control de sólidos (ECS)

Según lo anterior, la cantidad de ripios que se debe estimar está en función del tamaño del hueco.

Observando la capacidad del hueco hallada para cada sección en la tabla 8 para el pozo convencional Colorado 39 y en la tabla 12 para el pozo Slimhole,

se realizan las relaciones para estimar el volumen de ripio estimado ya sea en un mínimo de 1,5 o un máximo de 3 en su volumen extra.

La tabla 14 muestra la cantidad de ripio para el pozo convencional Colorado 39 con un volumen extra de 1,5

Tabla 14. Volumen de ripios para Colorado 39 con 1,5 de exceso.

Volumen de ripios para el pozo convencional Colorado 39				
Sección	Diámetro (in)	Capacidad del hueco (bbl)	Exceso en volumen del hueco	Volumen de ripios (bbl)
1	12¼	88,34	1,5	132,51
2	8½	516,57	1,5	774,85
Volumen total de ripios				907,36

Fuente: Autores

La tabla 15 muestra la cantidad de ripio para el pozo Slimhole con un volumen extra de 1,5

Tabla 15. Volumen de ripio para Slim Hole con 1,5 de exceso.

Volumen de ripios para el pozo Slimhole				
Sección	Diámetro (in)	Capacidad del hueco (bbl)	Exceso en volumen del hueco	Volumen de ripios (bbl)
1	8½	42,5	1,5	63,75
2	6	257,4	1,5	386,1
Volumen total de ripios				449,85

Fuente: Autores

La tabla 16 muestra la cantidad de ripios para el pozo convencional Colorado 39 con un volumen extra de 3

Tabla 16. Volumen de ripios para Colorado 39 con 3 de exceso

Volumen de ripios para el pozo convencional Colorado 39				
Sección	Diámetro (in)	Capacidad del hueco (bbl)	Exceso en volumen del hueco	Volumen de ripios (bbl)
1	12¼	88,34	3	265,02
2	8½	516,57	3	1549,71
Volumen total de ripios				1814,73

Fuente: Autores

La tabla 17 muestra la cantidad de ripios para el pozo Slimhole con un volumen extra de 3

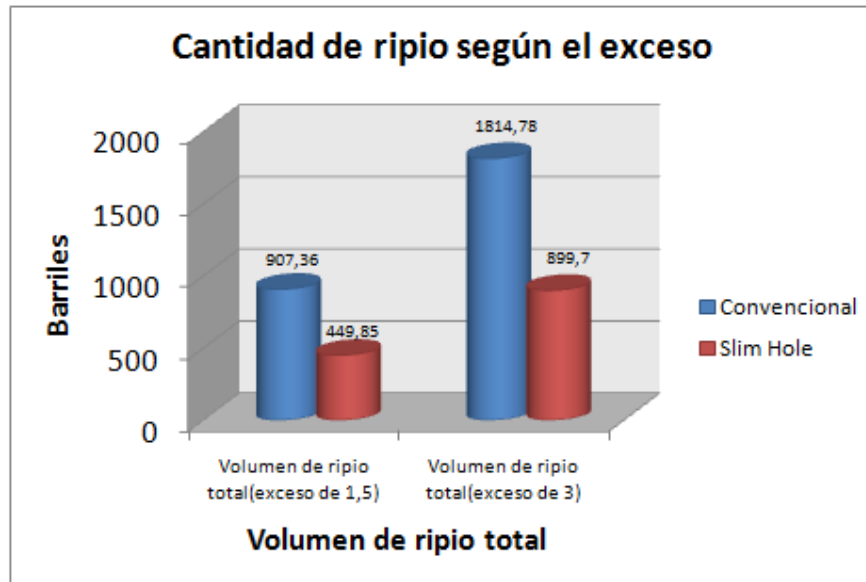
Tabla 17. Volumen de ripios para Slim Hole con 3 de exceso.

Volumen de ripios para el pozo Slimhole				
Sección	Diámetro (in)	Capacidad del hueco (bbl)	Exceso	Volumen de ripios (bbl)
1	8½	42,5	3	127,5
2	6	257,4	3	772,2
Volumen total de ripios				899,7

Fuente: Autores

En la figura 35, se ve claramente en cualquiera de los casos la disminución de los ripios de perforación en un 49,6% (casi a un 50%) con la tecnología Slimhole, en comparación con la perforación convencional del pozo Colorado 39, aumentando el ahorro generado por el tratamiento de los ripios.

Figura 35. Cantidad de ripio para cada perforación dependiendo del exceso.



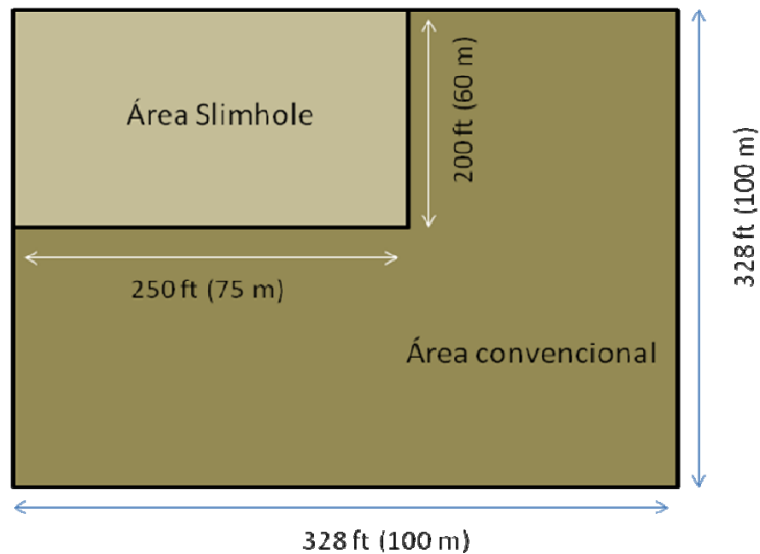
Fuente: Autores

3.4.2 Locación

Como se citó anteriormente en la perforación de pozos Slimhole se utiliza menos lodo, casing, cemento, agua, diesel, genera un menor volumen de ripios y necesita menos integrantes de operación y apoyo al sistema de perforación.

Para la implementación de la tecnología Slim Hole el área se reduce de manera significativa como se observa en la figura 36 y el porcentaje de los ahorros que esta origina se ven en la Tabla 18.

Figura 36. Reducción del area de la perforación Slim Hole respecto a la convencional



Fuente: Autores

Tabla 18. Disminución originada por la perforación Slim Hole

Función	Disminución (%)
Diámetro del hueco	49,6
Consumo de lodo	50
Generación de ripios	49,6
Cemento	38,5
Area del pozo	55

El equipo reducido hace que sus operaciones sean particulares en sitios donde se exija un bajo impacto sobre el medio ambiente. Un equipo de perforación convencional requiere por lo menos 4 veces la superficie, de las medidas y peso de cada parte de un equipo Slimhole (Tabla 19). El peso del equipo y de la sarta de perforación es mucho menor en la tecnología Slimhole que en la perforación convencional.

Tabla 19. Comparación del equipo convencional y Slimhole

Tipo de Herramienta	Convencional	Slimhole
Diámetro del hueco sección 1(in)	12¼	8½
Diámetro del hueco sección 2 (in)	8½	6
Peso de la sarta de casing (lb)	203804	95336
Peso del equipo (miles ton)	65	12
Área de perforación (ft²)	107584	50000
Generación de ripios (bbl)	907,36	449,85
Cemento (sacos)	1040	400
Capacidad de lodo en el hueco (bbl)	1813,3	899,7

Fuente: Autores

A su vez el equipo reducido permite una disminución notable en la cantidad de operarios o tripulación que se requieren en cada actividad, disminuyendo así el impacto que tendría algún accidente y el malgasto excesivo del talento humano.

3.5 ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO

La decisión de invertir y donde invertir es siempre una de las más difíciles en el momento de desarrollar un proyecto, y está fundamentada en la aplicación de un conjunto de instrumentos analíticos de tipo económico-financiero y de diversas técnicas de evaluación de proyectos.

El análisis económico es el estudio de todos los factores que afectan la economía de un proyecto, medidos en unidades monetarias. Este tipo de análisis, para este proyecto se realizó teniendo en cuenta los costos por

alquiler de equipos y materiales utilizados que estaban en función de la geometría del hueco, tales como casing de producción y superficie, cantidad de cemento, alquiler y transporte del equipo, cantidad de personal.

El objetivo principal de este análisis es ver que tan viable sería la utilización de la tecnología Slimhole para un pozo infill en Campo Escuela Colorado, teniendo en cuenta que toda la comparación se realizó con los registros del file del pozo 39 Colorado y adaptándolos a un posible pozo Slimhole estable.

Por toda la información recopilada y relacionada con los proyectos Slimhole se deduce que los factores más importantes y que más influyen en el ahorro notable de costos son la disminución casing de superficie y producción, lodo, cemento, transporte y alquiler de taladro.

Lo primero que se compara es el costo que se tiene para el consumo de cemento en cada uno de los casos de perforación Slimhole y convencional como se observa en la Tabla 20

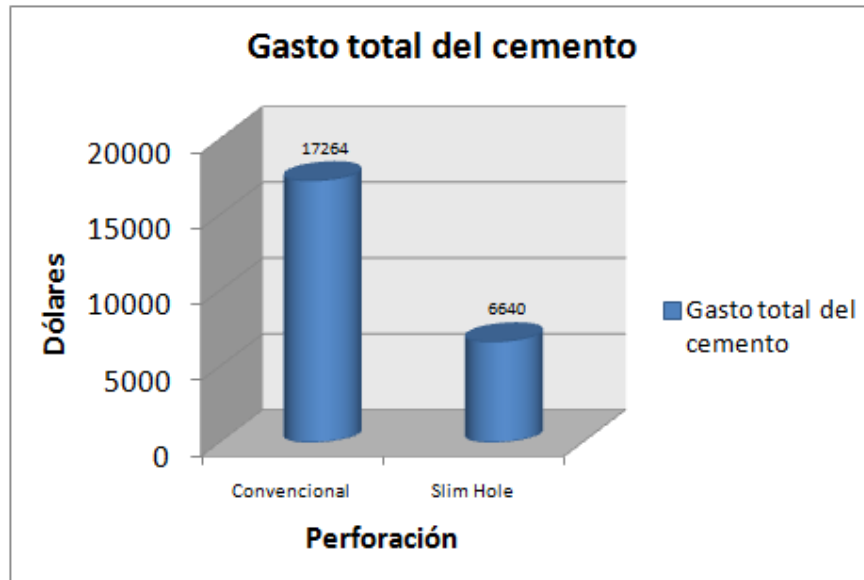
Tabla 20. Comparación en gastos de cemento.

Comparación en gastos de consumo de cemento				
Tipo de cemento		Costo del saco (USD)	Sacos	Total (USD)
Convencional	G	16.6	1040	17264
Slimhole	G	16.6	400	6640
Ahorro				10624

Fuente: autores

En la Figura 37 se muestra el ahorro en los gastos de cemento con un valor del 61,5% lo que equivale a 10624 dólares.

Figura 37. Gasto total de cemento según la perforación.



Fuente: autores

En la Tabla 21 se muestra el ahorro en los costos que se obtienen gracias a la disminución del diámetro del casing en este caso de superficie.

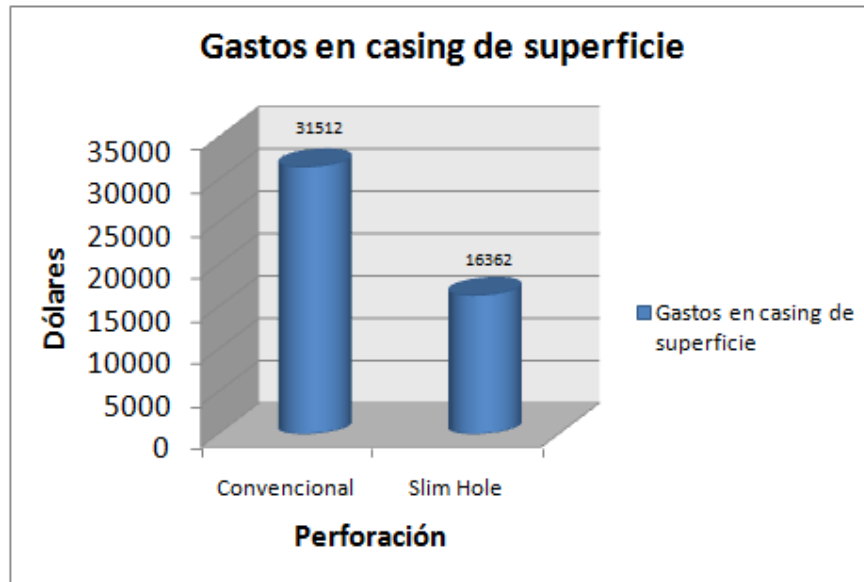
Tabla 21. Comparación en costos de casing de superficie.

Comparación en costos de casing de superficie						
	Casing (in)	Grado	Peso (lb/ft)	Costo/ft (USD)	Longitud (ft)	Total (USD)
Convencional	9½	J55	40	52	606	31512
Slimhole	7	J55	23	27	606	16362
Ahorro						15150

Fuente: Autores

En la figura (38) se muestra el ahorro en los costos de casing en un 48% del Slimhole respecto al convencional lo que equivale a 15150 dólares.

Figura 38. Gastos de casing de superficie según la perforación.



Fuente: Autores

En la Tabla 22 se muestra el ahorro en los costos que se obtienen gracias a la disminución del diámetro del casing en este caso de producción.

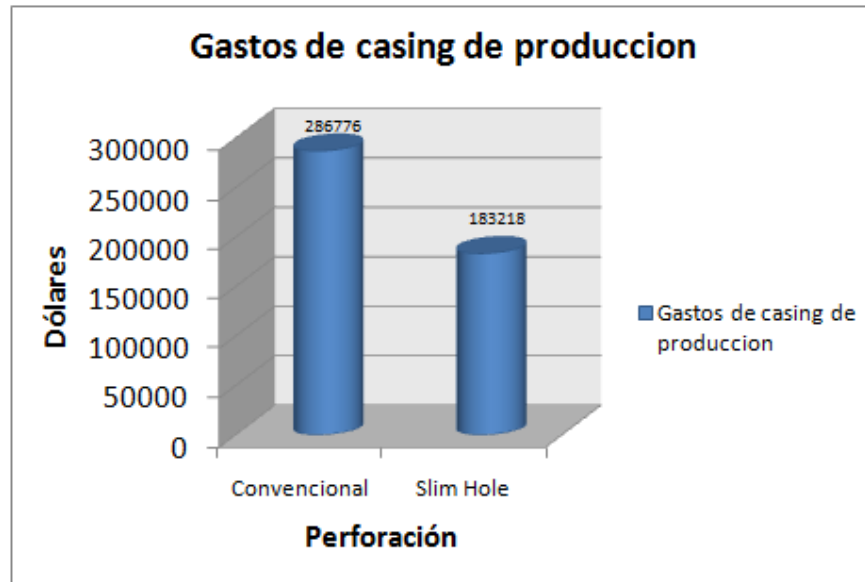
Tabla 22. Comparación en costos de casing de producción

Comparación en costos de casing de producción						
	Casing (in)	Grado	Peso (lb)	Costo/ft (USD)	Longitud (ft)	Total (USD)
Convencional	6"	N80	24	36	7966	286776
Slimhole	4½"	N80	11,2	23	7966	183218
Ahorro						103558

Fuente: Autores

En la Figura 39 se muestra el ahorro en los gastos de tubería en un 36% del Slimhole respecto al convencional lo que equivale a 103558 dólares.

Figura 39. Gastos de casing de producción según la perforación

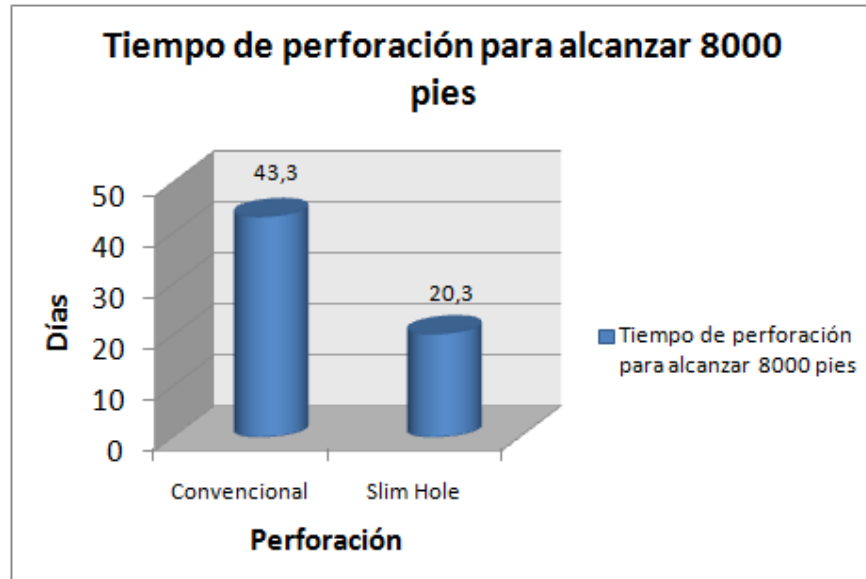


Fuente: Autores

Si se cumple la tasa estimada de la literatura a partir de los parámetros, bajo peso de sarta (2000-8000lb) y altos RPM (350-1000), utilizando broca de diamante; alcanza altas tasas de penetración 393 ft/d en el caso de la tecnología Slim Hole.

De otra parte si se cumplen las mismas condiciones de perforación reportadas en el file del pozo Colorado 39 se estima una tasa promedio de perforación de 184.8 ft/d en el caso. Haciendo la proyección para el tiempo en días de perforación para alcanzar una TD de 8000 pies se nota el ahorro reduciendo el tiempo más de la mitad del requerido para la convencional (Figura 40).

Figura 40. Tiempo de perforación requerido según cada caso para alcanzar 8000 pies.

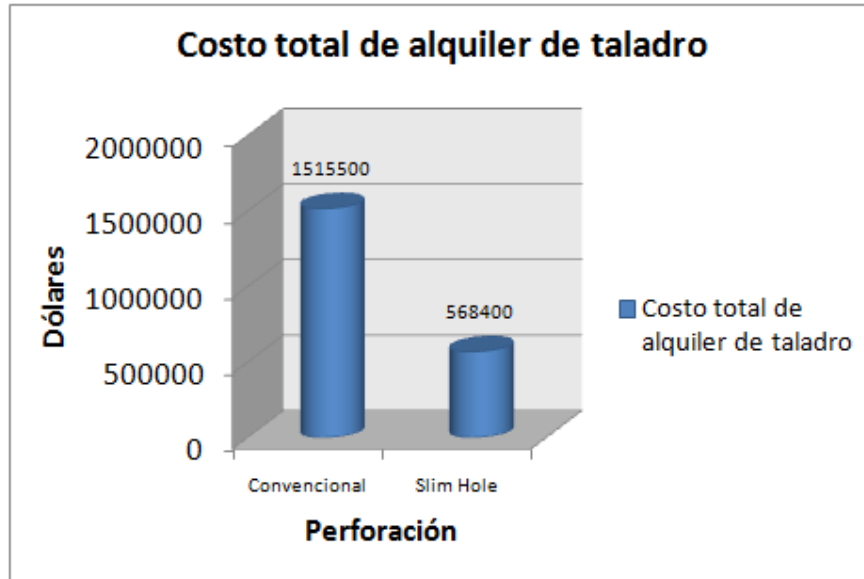


Fuente: Autores

Se nota el gran ahorro de 23 días o el 46.8% del tiempo necesario para la perforación total. Esto como tal involucra una gran disminución en la inversión en el equipo de perforación.

Teniendo en cuenta que para la perforación convencional se necesita un taladro HP-1200 que su alquiler diario tiene un valor de 35000 dólares, y para la perforación con tecnología Slimhole se utiliza un taladro de HP-1000 que su alquiler diario tiene un valor de 28000 dólares, se puede apreciar el ahorro en costo total por alquiler de taladro para cada caso en proyección a los cálculos estimados para alcanzar los 8000 pies de profundidad en la Figura 41.

Figura 41. Costo total de alquiler de taladro según la perforación.



Fuente: Autores

En la Figura 41, se observa el ahorro del 62,5% en el costo del alquiler del taladro respectivo para cada perforación, lo que equivale a un ahorro de \$947100 dólares para alcanzar una profundidad de 8000 pies con la tecnología de perforación Slim Hole.

Teniendo en cuenta y evaluando los principales factores que representan el ahorro significativo al implementar la tecnología de perforación Slimhole se puede realizar el análisis de costos total para la operación de perforación a una profundidad total de 8000ft en la Tabla 23 y la Figura 42.

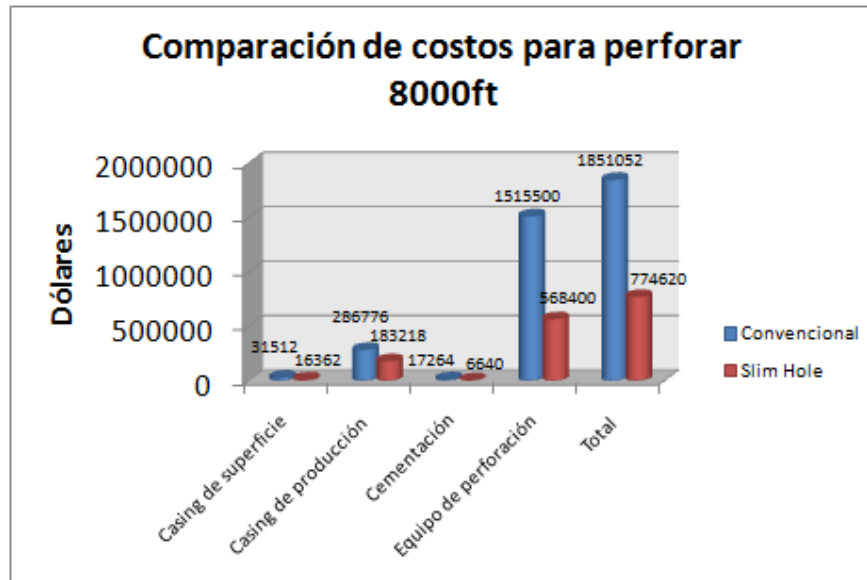
Así se puede observar la viabilidad que tiene la tecnología Slim Hole sobre la perforación convencional para ser aplicada en el campo teniendo en cuenta la gran disminución en los costos totales y la disminución en el impacto ambiental que puede generar enfocado en la disminución de las dimensiones del hueco.

Tabla 23. Análisis de costos para una perforación de 8000 pies.

Análisis de costos para una perforación de 8000 pies		
Perforación	Convencional	Slim Hole
Casing de superficie (USD)	31.512	16.362
Casing de producción(USD)	286.776	183.218
Cementación (USD)	17.264	6.640
Equipo de perforación (USD)	1'515.500	568.400
Total (USD)	1'851.052	774.620
AHORRO	1'076.432 USD o 58,2%	

Fuente: Autores

Figura 42. Comparación de costos para perforar 8000 pies.



Fuente: Autores

CONCLUSIONES

- La tecnología de perforación Slim Hole comparada con la perforación convencional bajo el punto de vista económico y técnico en operaciones desarrolladas en diferentes partes del mundo ha demostrado ahorro en los costos del proyecto en cementación entre 60% y 70%, costos del casing entre 38% y 40%, costos de perforación entre 15% y 40% y una reducción en el tiempo de perforación entre 15% y 40%. El ahorro del proyecto total se estima entre 25% y 50%.
- En la parte económica la tecnología de perforación Slim Hole para la factibilidad de aplicación en el Campo Escuela Colorado comparada con la perforación convencional brinda resultados de ahorro importantes como son; en cementación de 61,5%, en casing de superficie de 48%, en casing de producción de 36%, en perforación de 62,5% y una reducción en el tiempo de perforación de 46,8%, alcanzando un ahorro total del proyecto de 58,2%.
- La tecnología de perforación Slim Hole comparada con la convencional en operaciones realizadas a nivel mundial representa una alternativa clave desde el aspecto ambiental estimando una disminución de lodo entre 60% y 75%, disminución de la generación de ripios entre 60% y 75% y la disminución del área o locación entre 50% y 75%.
- Para la factibilidad de aplicación de la tecnología de perforación Slim Hole en el Campo Escuela Colorado comparada con la perforación convencional en el aspecto ambiental brinda un gran apoyo al tener disminuciones de un 50% en la cantidad de lodo, en un 49,6% en la generación de ripios y un 55% en el área o locación; siendo estos los

factores claves para minimizar el impacto ambiental que el proyecto podría generar.

- Desde el punto de vista operacional el Slim Hole tiene alta velocidad de flujo anular y las patadas de flujo de un amago alcanzan rápidamente la superficie dificultando su control.
- La desventaja que presenta la tecnología de perforación Slim Hole es la gran disminución del diámetro lo cual dificulta la bajada de herramienta dentro del pozo para reacondicionamiento y producción del mismo.
- Es viable implementar la tecnología de perforación Slim Hole para un proyecto futuro de perforación infill en el Campo Escuela Colorado bajo las condiciones establecidas al ser comparado con una perforación convencional viendo las ventajas en el aspecto técnico, económico y ambiental que este trabajo pudo demostrar.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda para aplicar la tecnología de perforación Slim Hole en proyectos futuros hacer un estudio detallado sobre las fallas mecánicas, la reducción del hueco y problemas operacionales de control de pozo, para evitar dificultades en su desarrollo y el incremento de costos.
- Implementar la tecnología de perforación Slim Hole en campos maduros como es el caso de Campo Escuela Colorado para búsqueda de nuevas reservas por ser económicamente viable, por disminuir la contaminación ambiental por derrame de lodo y generación de rípios.
- Desde el punto de vista académico es importante desarrollar otros trabajos relacionados con hidráulica, control de pozo y aplicación óptima de parámetros de perforación para la aplicación de la tecnología de perforación Slim Hole.
- Para un estudio posterior de la tecnología de perforación Slim Hole es necesario agregar al análisis de costos la inversión de capital para equipos de facilidades y superficie, sin olvidar el valor agregado que podría tener cualquier operación de reacondicionamiento.
- Es de vital importancia que se realicen estudios y pruebas en el Campo Escuela Colorado para tener mayor información de su litología y propiedades de sus yacimientos, lo que facilitaría trabajos futuros de implementación de la tecnología Slim Hole en el aspecto técnico de un diseño de perforación más completo y detallado teniendo en cuenta factores como las propiedades del lodo de perforación y presión de poro.

BLIBLIOGRAFIA

Ref 1. (K.K Millheim, Mining University Leoben, M. Prohaska, Mining Leoben University and B. Thompson, RDS London, Slim Hole Drilling Technology Past, Present, Future. SPE 30151).

Ref 2. Tao Zhu and Carroll B. Herbert. A Review of Slimhole Drilling, Rhonda Lindsay, Program Manager, Oklahoma, September 1994.

Ref 3. Completamiento Slimhole de BP en el Campo Plungar.

Ref 4. Scott, R.W. and Earl, J.F. 1961. Small Diameter Well Completions, Part 1: Economics and Application. World Oil, August 1, pp. 57-66.).

Ref 5. Deguillaume, J. and Johnson, B. 1990. Drilling With SemiAutomatic and Automatic Horizontal. Racking Rigs, IADC/SPE-19980, presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Houston, Texas, February 27-March 2.

Ref 6. Dachary, J. and Vighetto, R 1992. Slimhole Drilling Proven in Remote Exploration Project. Oil and Gas Journal, June.

Ref 7. Murray, P J, Spicer, P J, Jantzen, R E, Syrstad, S 0 and Taylor, M R 1993. Slimhole Exploration: A Case for Partnership in The Nineties, IADC/SPE-25724, presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Amsterdam, Neth., February 23-25.

Ref 8. Gum, K.B. 1991. Well Cored to 9.800 ft in Paraguay. Oil & Gas Journal, May 13, p51.

Ref 9. Dahl, T. 1982. Swedish Group's Small Hole Swallow-Drilling Technique Cuts Costs. Oil & Gas Journal, April 19, pp. 98-100.

Ref 10. Mehdi Azari and Mohamed Soliman, Evaluation of Slimhole Production Performance, 1997, SPE/IADC Drilling Conference held in Amsterdam, 4-6 March 1997.

Ref 11. Grove, G A and Vervloet, A W. 1993. Slimhole Drilling Saves Dollars in Thermal Injectors. Paper SPE-25780, presented at SPE Them Oper. Int. Symp., Bakersfield, CA, Feb. 8-10.

Ref 12. Pittard, F J, Weeks, R D and Wasson, M R 1992. Slimhole Horizontal Reentries Provide Alternative to New Drills. Petroleum Engineer International, Vol. 64, No. 11, November, pp. 19-30.

Ref 13. Staff 1993. BP to Survey Slimhole Tech Drilling Contactor, September 1993, p18.

Ref 14. McLaughlin, Philip L. 1959. Reassessing the Merit of Small-Diameter Drill Holes, Ninth Annual Drilling Symposium, Pennsylvania State University, University Park, PA, October 8-10.

Ref 15. Bode, D.J., No&, RB. and Nickens, H.V. 1989. Well Control Methods and Practices in Small-Diameter Wellbores. Paper SPE 19526, presented at the Annual SPE Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, October 8-11.

Ref 16. Shields, J.A. and Taylor, M.R. 1992. Slimhole Kick Detection: Options and Answers, ThirdAnnual IADC European Well Control Conference, Leeuwenhorst, The Netherlands, June 3rd4th.

Ref 17. F.E Shanks II, Mobil E&P Technical Center, and K.R Williams, Slimhole Exploration Requires Proper Technical Preparation. SPE 26337. Texas, 3-6 October 1993.

Ref 18. ADAMS, N.J. "Drilling Engineering. A Complete Well Planning Approach". PennWell Book. Tulsa, Oklahoma. 1985.

Ref 19. AFANADOR, Carlos. Y DELGADO, Luis. "Viabilidad Técnica y Económica de la Perforación Under Balance Aplicada al Campo Escuela Colorado". Trabajo de grado Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Químicas. Escuela Ingeniería de Petróleos, 2008.

Ref 20. GOULD, T. L. y SAREM A. M. S. "Infill Drilling for Incremental Recovery", JPT (Marzo 1989) p 229-237.

Ref 21. BABADAGLI, T. "Mature Field Development- A Review". SPE, (Junio 2005). SPE Paper 93884.

Ref 22. ARPS, J.J. "Analysis of Decline Curves," Trans. AIME, 1945. 228-160.

Ref 23. THAKUR, G.C. y SATTER, A. "Integrated Waterflood asset Management". Tulsa, Pennwell Book, 1998.

Ref 24. BASUNI, M.N. "Successful Infill Drilling in Raja Field Causes Ten-Fold Increase in Production", Proc., Indonesian Petroleum Assn. (Junio 1978) 277-93.

Ref 25. BLASKOVICH, F.T. "Historical Problems with Oil Field Rejuvenation". SPE, (Junio 2000). SPE 62518.

Ref 26. CALVETE, F. Información Técnica Campo Escuela Colorado (diapositivas). Bucaramanga, 2007. 39 diapositivas.

Ref 27. CAPACHO, C.A y VARGAS E. "Diseño de un Programa de Perforación en El Opón". Trabajo de grado de Ingeniero de Petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, 1975.

- Ref 28. EGBOGAH, E.O. "EOR Target Oil and Techniques of its Estimation". J.petr-Sci. and ENG, (1994). 337-349.
- Ref 29. FETKOVICH, M.J. "Decline-Curve Analysis Using Type Curves – case Histories, SPE Form, 1987.637.
- Ref 30. Gerencia de Yacimientos ECOPETROL S.A. Inyección de Agua para el Campo Lisama por la Formación Mugrosa, Arenas B y C, Análisis Financiero. Reporte interno ECOPETROL S.A. 2008.
- Ref 31. HALLIBURTON BAROID. Campaña de Perforación 2006, Bloque Las Monas. Reporte interno PetroSantander (Colombia) Inc. 2006.
- Ref 32. Gerencia Magdalena Medio, Diagnostico y Estrategias de Recobro Campo Colorado" Instituto Colombiano del Petróleo. 2003.
- Ref 33. Diagnostico y Estrategias de recobro Campo Colorado". ECOPETROL S.A., Gerencia Magdalena Medio, Instituto Colombiano del Petróleo. 2003.
- Ref 34. Schlumberger Manual. Introducción al equipo de perforación.
- Ref 35. Datos de registro del pozo, oficina Campo Escuela Colorado.
- Ref 36. BALLESTEROS Cristina, Evaluación de diferentes sistemas para el tratamiento de residuos de perforación en el Campo Tarapoa operado por la empresa Andes Petroleum S.A, mayo 2000.
- Ref 37. Presentación "Waste Management", Brandt, proporcionado en Octubre 2007.

Ref 38. PAYBACK TIME: tiempo de reembolso.

Ref 39. McCRAY, Arthur. Petroleum Evaluations and Economic Decisions. Prentice Hall, 1975.

Ref 40. Colombia. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Art. 2 de la ley de 58 (17 de Diciembre, 2003). General Tributaria Bogotá, D.C., 2003.