

**EFICIENCIA DE FLUJO EN LA GEOMETRÍA DE LA PERFORACIÓN EN
OPERACIONES DE CAÑONEO**

NATHALIA YINETH CELIS APARICIO

ANDRES FELIPE CELIS ARIAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2012

**EFICIENCIA DE FLUJO EN LA GEOMETRIA DE LA PERFORACION EN
OPERACIONES DE CAÑONEO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero de
petróleos**

NATHALIA YINETH CELIS APARICIO

ANDRES FELIPE CELIS ARIAS

DIRECTOR:

MCS. FERNANDO ENRIQUE CALVETE GONZALES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

*A Dios por ser el centro de mi vida,
A mis padres, Yolanda y Diego por su apoyo, comprensión, guía, y amor
incondicional,
A mis hermanas, Rake, Lau, Cris por tolerarme y compartir tantos
momentos hermosos,
A mi sobrinito Cristian por llenar de alegría nuestra familia
A mi novio Jonathan por llegar a mi vida en el momento indicado
llenándola de felicidad y amor,
A mis Abuelitas, Ofelia y Marina por su sabiduría,
A toda mi familia por siempre creer en mis capacidades,
A mi Gordis, Moniquiquí, Rud, Moni Arenas, Pipe, Motticos, por su
inmensa amistad
A mis amigos y compañeros de universidad Dubi, Marguis, Willi, Duity
por brindarme una amistad tan sincera en esta etapa de mi vida.*

Nathalia Celis Aparicio

DEDICATORIA

*A Magally Arias quien me ha dado la fortaleza para enfrentar toda
adversidad y ha sido el impulso para cumplir cada meta,
A mi familia, amigos y profesores por enseñarme todo lo que soy hoy en
día.*

Andrés Felipe Celis Arias

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y a todos sus maestros por hacer de nosotros buenas personas y grandes profesionales.

A la Escuela de Ingeniería de Petróleos y en especial a todos sus profesores, por compartir valiosos conocimientos y dedicar parte de sus vidas en nuestra formación profesional.

Al Ingeniero Fernando Enrique Calvete Gonzales por la confianza brindada, sus consejos y lecciones aprendidas, durante el desarrollo de este magnífico proyecto de grado.

Al la Ingeniera de la compañía Schlumberger Marcia Benavides por hacer posible la realización de este proyecto de grado brindándonos la licencia estudiantil del simulador SPAN.

Tabla de contenido

INTRODUCCION.....	18
1. GENERALIDADES DEL CAÑONEO	20
1.1. CAÑONEO.....	20
1.2. EXPLOSIVOS.....	21
1.3. TIPOS DE CARGAS EXPLOSIVAS	29
1.4. CAÑONES	30
1.5. PROCESO DE CAÑONEO	33
1.6. OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD.....	35
2. TIPOS DE CAÑONEO	44
2.1. RESEÑA HISTORICA DE LOS TIPOS DE CAÑONEO.....	44
2.2. TÉCNICAS DE CAÑONEO	55
3. PRESION DIFERENCIAL	84
3.1. DIFERENCIAL DE PRESIÓN POSITIVA (OVERBALANCE)	85
3.2. DIFERENCIAL DE PRESIÓN NEGATIVA (UNDERBALANCE)	88
3.3. PRESIÓN DIFERENCIAL DE SOBREALANCE EXTREMO	96
3.4. EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CAÑONEO SEGÚN EL MÉTODO DE DESARROLLO	97
4. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	102
4.1. ÁNGULO DE FASE O DIRECCIÓN DE TIRO.....	103
4.2. DENSIDAD DE DISPARO.....	104
4.3. LONGITUD DE PENETRACION.....	105
4.4. DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN.....	108
4.5. SEPARACIÓN ENTRE CARGAS O ESPACIO LIBRE	109
4.6. TIPOS DE COMPLETAMIENTO.....	110
4.7. EFECTO DEL DAÑO EN LA ZONA COMPACTADA	112
5. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE CAÑONEO WIRELINE (WL) Y TUBING CONVEYED PERFORATING (TCP).....	116
5.1. ELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA PARA LOS CASOS BASE WIRELINE, TCP Y TCP MEJORADO	116
5.2. DATOS DE ENTRADA CASO WIRELINE VARIANDO LOS PARÁMETROS DE LA SECCIÓN GUN SYSTEM.....	122

5.3. DATOS DE ENTRADA TCP VARIANDO LOS PARÁMETROS DE LA SECCIÓN GUN SYSTEM.....	127
5.4. DATOS DE ENTRADA CASO TCP MEJORADO VARIANDO LOS PARÁMETROS DE LA SECCIÓN GUN SYSTEM	132
5.5. ANÁLISIS DE GRÁFICAS.....	137
5.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	142
CONCLUSIONES.....	183
RECOMENDACIONES.....	185
BIBLIOGRAFIA.....	186
ANEXOS	188

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Cañoneo de pozos.....</i>	21
<i>Figura 2. Incremento en la presión asociado con la combustión, deflagración y detonación.</i>	24
<i>Figura 3. Estabilidad de los explosivos</i>	28
<i>Figura 4. Tren de componentes explosivos.....</i>	32
<i>Figura 5. Proceso de cañoneo.</i>	34
<i>Figura 6. Daño a la formación por el disparo</i>	43
<i>Figura 7. Cargas moldeadas.....</i>	54
<i>Figura 8. Técnica Wireline Convencional.</i>	57
<i>Figura 9. Completamiento con Casing Gun</i>	60
<i>Figura 10: Completamiento con Through Tubing Gun</i>	62
<i>Figura 11. Hollow Carriers de Casing Gun y Through Tubing Gun</i>	64
<i>Figura 12. Completamiento con TCP.....</i>	67
<i>Figura 13. Permeabilidad en zona virgen y zona triturada</i>	70
<i>Figura 14. La técnica PURE remueve el daño creado en la perforación</i>	71
<i>Figura 15. Enerjet</i>	77
<i>Figura 16. PIVOT Guns</i>	78
<i>Figura 17. PowerSpiral</i>	79
<i>Figura 18. High Efficiency Guns (HEGS)</i>	80
<i>Figura 19. High Shot Density</i>	81
<i>Figura 20. PURE Guns</i>	82
<i>Figura 22. Eficiencia de flujo del pozo Vs Kc/Ku para diferentes longitudes de penetración.</i>	87
<i>Figura 23. Relación de productividad Vs Kc/Ku para diferentes ángulos de fase.</i>	88
<i>Figura 24. Presión de desbalance para areniscas gasíferas y areniscas petrolíferas.</i>	92
<i>Figura 25. Cañoneo Técnica Pure.</i>	100
<i>Figura 26. Geometría de la perforación.</i>	102
<i>Figura 27. Patrón de agujeros para cañones fase 0° y 60° - 30° y 90°.....</i>	104
<i>Figura 28. Relación de productividad Vs Longitud de la penetración. Para diferentes ángulos de fase</i>	107
<i>Figura 29. Relación de la productividad Vs Longitud de penetración. Para diferentes densidades de disparo.....</i>	107
<i>Figura 30. Relación de productividad vs diámetro de la perforación. Para diferentes relaciones de Kc/Ku.....</i>	109
<i>Figura 31. Relación de productividad Vs Longitud de disparo para diferentes densidades de disparo.....</i>	113
<i>Figura 32. Cuadro Conceptual Operación de Cañoneo.....</i>	115
<i>Figura 33. Penetración de la formación Caso Base WL.....</i>	146
<i>Figura 34. Penetración de la formación caso base TCP</i>	147
<i>Figura 35. Penetración de la formación caso base TCP MEJORADO</i>	147
<i>Figura 36. Radio de Invasión Vs Penetración de la formación caso Wireline.....</i>	148

Figura 38. Radio de Invasión Vs Penetración de la formación caso TCP.....	148
Figura 37. Radio de Invasión Vs Penetración de la formación caso TCP MEJORADO.	149
Figura 39. Relación de permeabilidad en la zona compactada y en la zona virgen CRUSH ZONE Kc/K.....	150
Figura 40. Longitud de penetración total promedio (in) TOTAL PENETRATION AVERAGE (in).....	153
Figura 41. Diámetro promedio de la formación (in) FORMATION DIAMETER AVERAGE (in).....	155
Figura 42. Daño efectivo EFFECTIVE SKIN.....	157
Figura 43. Daño en la zona compactada CRUSH ZONE SKIN.....	159
Figura 44. Índice de Productividad PRODUCTIVITY INDEX.....	161
Figura 45. Relación de Productividad PRODUCTIVITY RELATION.....	163
Figura 46. Absolute Open Flow AOF.....	165
Figura 47. Relación de permeabilidad en la zona compactada y en la zona virgen CRUSH ZONE Kc/K.....	167
Figura 48. Longitud de penetración total promedio (in) TOTAL PENETRATION AVERAGE (in).....	169
Figura 49. Diámetro promedio de la formación (in) FORMATION DIAMETER AVERAGE (in).....	171
Figura 50. Daño efectivo EFFECTIVE SKIN.....	173
Figura 51. Daño en la zona compactada CRUSH ZONE SKIN.....	175
Figura 52. Índice de Productividad PRODUCTIVITY INDEX.....	177
Figura 53. Relación de Productividad PRODUCTIVITY RELATION.....	179
Figura 54. Absolute Open Flow AOF.....	181

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Parámetros asociados a la combustión deflagración y detonación.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 2. Propiedades físicas de los explosivos de alta.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3. Presión diferencial a favor de la formación cuando se cañonea.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 4. Bajo-balance óptimo según Bell.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 5. Variables de entrada Casos Bases sección Job.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 6. Variables de entrada Casos Base sección Formation Fluid.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 7. Variables de entrada Casos Base sección Well / Reservoir</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 8. Variables de entrada Casos Base sección Zones Formation</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 9. Variables de entrada Casos Base sección Well / Tubular</i>	<i>120</i>
<i>Tabla 10. Variables de entrada Casos Base sección Gun System.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabla 11. Datos de entrada técnica Wireline variando la presión diferencial de desbalance.</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 12. Datos de entrada técnica Wireline variando la Carga Jet</i>	<i>124</i>
<i>Tabla 13. Datos de entrada técnica Wireline variando el Ángulo de Fase.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 14. Datos de entrada técnica Wireline variando la Densidad de disparo.</i>	<i>126</i>
<i>Tabla 15. Datos de entrada técnica TCP variando la presión diferencial de desbalance</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 16. Datos de entrada técnica TCP variando la Carga Jet.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 18. Datos de entrada técnica TCP variando la Densidad de disparo.....</i>	<i>131</i>
<i>Tabla 19. Datos de entrada técnica TCP MEJORADO Variando la presión diferencial de desbalance</i>	<i>133</i>
<i>Tabla 20. Datos de entrada técnica TCP MEJORADO Variando la Carga Jet.</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 21. Datos de entrada técnica TCP MEJORADO Variando el Ángulo de fase.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 22. Datos de entrada técnica TCP MEJORADO Variando la Densidad de disparo</i>	<i>136</i>
<i>Tabla 23. Nomenclatura Tablas y Gráficas.</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 24. Radio de invasión para el caso WRL</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 25. Radio de invasión para el caso TCP</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 26. Radio de invasión TCP MEJORADO</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 27. Perforating Systems Performance and Mechanical Data Summary</i>	<i>154</i>

LISTA DE ANEXOS

<i>ANEXO A SIMULACIÓN SYSTEM PERFORATING ANALYSIS “SPAN” CASO BASE WIRELINE.....</i>	<i>188</i>
<i>ANEXO B SIMULACION SYSTEM PERFORATING ANALYSIS “SPAN” CASO BASE TUBING CONVEYED PERFORATING “TCP”</i>	<i>206</i>
<i>ANEXO C SIMULACIÓN SYSTEM PERFORATIING ANALYSIS “SPAN” TUBING CONVEYED PERFORATING MEJORADO “TCP MEJORADO”.....</i>	<i>223</i>

RESUMEN

TÍTULO: EFICIENCIA DE FLUJO EN LA GEOMETRÍA DE LA PERFORACIÓN EN LAS OPERACIONES DE CAÑONEO.¹

AUTORES: NATHALIA YINETH CELIS APARICIO²

ANDRES FELIPE CELIS ARIAS

PALABRAS CLAVES: Técnicas de Cañoneo, Presión de Desbalance, Eficiencia de Flujo, Parámetros Geométricos.

DESCRIPCIÓN

Este proyecto presenta los conceptos generales de la operación de cañoneo de pozos; así como el análisis de las diferentes técnicas de cañoneo que se han implementado a través del tiempo enfocado principalmente hacia las técnicas desarrolladas por Wireline y Tubing Conveyed Perforating (TCP).

El diseño de los disparos constituye una parte integral del planeamiento del completamiento del pozo en el que se tienen en cuenta las características de la formación, condiciones del yacimiento y las exigencias del pozo. Para llevar a cabo de manera integral dicho planeamiento, se desarrollan cuatro etapas de estudio: en la primera, se comparan las técnicas de cañoneo previamente conocidas considerando las características de la formación y el tipo de completamiento; posteriormente, se evalúan las técnicas de cañoneo de acuerdo a las condiciones en las que se encuentre el pozo ya sea a condiciones de presión Sobrealance, Bajobalance o Sobrealance Extremo; en la tercera etapa, se analizan los diferentes parámetros geométricos de la operación de cañoneo entre los cuales se destacan la longitud de penetración, densidad de disparo, diámetro de entrada a la formación y ángulo de fase; finalmente en la cuarta etapa, se realizan tres diseños de cañoneo por técnicas, métodos y parámetros geométricos de cañoneo diferentes, utilizando el software SPAN, todo con el fin de verificar y comparar a partir de un caso aplicado con datos obtenidos de literatura, como cada uno de estos parámetros influyen directamente en la productividad del pozo.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Química, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director; M. Sc. Fernando Enrique Calvete Gonzales.

ABSTRACT

TITLE: FLOW EFFICIENCY IN THE PERFORATION GEOMETRY IN PERFORATING OPERATIONS¹

AUTHORS: NATHALIA YINETH CELIS APARICIO

ANDRES FELIPE CELIS ARIAS²

KEYWORDS: Perforating techniques, Underbalance Pressure, Flow Efficiency, Geometric Parameters

DESCRIPTION

This thesis presents the general concepts of perforating operations in vertical, horizontal and deviated wells. The analysis of the different perforating techniques which have been implemented through time is showed. The analysis is mainly focused on the techniques developed by Wireline and Tubing Conveyed Perforating (TCP).

The shots design is part of the well completion plan in which the formation properties, reservoir conditions and well requirements are taken into account. Four steps are performed to develop this plan. The first step is the comparison of the perforating techniques which were previously showed. It was made considering the formation properties and completion type. Second, the perforating techniques are evaluated according to the well conditions, it means pressure conditions; Overbalance, Underbalance and Extreme Overbalance. Third, in this stage an analysis of the different geometrical parameters such as penetration length, shot density, hole perforating diameter and phase angle in the perforating operation is performed. Finally, the last step is the execution of three perforating designs by different techniques, methods and geometric parameters using the Schlumberger Perforating Software (SPAN). The main objective of this stage was to verify and compare using a case in the literature how the main parameters make influence in the well productivity.

¹ Thesis

² Physical Chemistry faculty, Petroleum Engineering School, Director; M. Sc. Fernando Enrique Calvete Gonzales.

INTRODUCCION

La evaluación de cualquier proyecto de exploración y explotación de hidrocarburos siempre estará de la mano con la rentabilidad del mismo y para esto se debe siempre estimar unas reservas y calcular una producción diaria, por lo cual es de gran importancia conocer que parámetros influyen en la vida productiva de un pozo, con el fin de resolver cualquier problema que se presente, evitando que genere gastos innecesarios que hacen de un proyecto no atractivo para su desarrollo.

Existen gran variedad de parámetros que pueden influir de manera representativa en la producción de un pozo como son los referidos al yacimiento: permeabilidad, porosidad, saturación, presión capilar, presión de formación, temperatura del yacimiento, gradiente geotérmico, etc. Y también encontramos los atribuidos al fluido: viscosidad, gravedad API, punto de burbuja, punto de fluidez, salinidad o contenido de sal, composición del fluido, entre otros. Aunque son de gran importancia no es posible llegar a tener un control total de cada uno de ellos, lo contrario sucede con los parámetros relacionados en las operaciones como: perforación, completamiento, cañoneo.

Debido a lo anterior este trabajo de grado se enfoca en el estudio de la eficiencia de flujo teniendo en cuenta factores del cañoneo tales como: tipo y resistencia de la formación, espesor y resistencia del revestimiento, soporte del revestimiento por el cemento, espesor y resistencia del cemento, gradiente geotérmico y temperatura de fondo, comparando las diferentes técnicas de cañoneo: cañones mecánicos, cañones a bala, cañones a chorro o cargas moldeadas y cañones a chorro hidráulico, y su

método de desarrollo: sobre balance, bajo balance y bajo balance extremo, para así analizar la geometría del cañoneo tales como: el ángulo de fase, la densidad de disparo, la longitud de penetración, el diámetro de la perforación, la separación entre cargas o espacio libre, rendimiento de la perforación, factores de efectividad y explosivos, lo anterior como una alternativa viable que genere un cambio positivo en la producción.

1. GENERALIDADES DEL CAÑONEO

1.1. CAÑONEO

Método que consiste en crear orificios en el revestimiento mediante disparos que pasan a través de la capa de cemento y se extienden dentro de la formación para establecer una comunicación efectiva entre la zona productora y el pozo. El cañoneo permite evaluar zonas productoras, mejorar la producción, recuperar e inyectar y efectuar trabajos de inyección de cemento. Estas perforaciones deben ser limpias, de tamaño y profundidad uniformes y no deben dañar el revestimiento ni la adherencia del cemento.³

Cualquiera que sea el sistema utilizado, como parte de un completamiento el objetivo principal de una operación de cañoneo es crear la mejor comunicación posible entre el pozo y el yacimiento para optimizar la producción del pozo⁴.

Entre muchos de los beneficios que la operación de cañoneo puede ofrecer en un proyecto de completamiento están: evaluar las zonas productoras, mejorar la producción por inyección y efectuar trabajos de cementación⁵. Ver figura 1.

³ BUSTOS, Edna. Estudio de Pozos Candidatos a Recañoneo y Apertura de Nuevas Zonas de Las Arenas De la Formación Barco del Área A del Campo Tibú. 2010.

⁴ SIMANCAS, Frank. Manual teórico practico de ingeniería de completación y rehabilitación de pozos. Caracas. Universidad central de Venezuela. 2005.

⁵ RODRIGUEZ, Luis. ESP OIL completación y reacondicionamiento de pozos. Perú. 2006

Figura 1 Cañoneo de pozos



Fuente: ESP OIL completación y reacondicionamiento de pozos. LUIS. RODRIGUEZ.

1.2. EXPLOSIVOS

Las cargas perforadoras dependen de los explosivos que suministran la energía necesaria para una efectiva penetración del revestimiento, cemento y formación. Por lo tanto, el rendimiento de la carga está directamente relacionado con el del explosivo.

Debido a su gran potencial de energía en relación a su peso. Los explosivos son preferidos sobre otras fuentes de energía. Estos actúan prontamente, son confiables y pueden ser almacenados por largos períodos de tiempo, Además de ser seguros y manejables.

Un explosivo es una mezcla de componentes químicos que reaccionan y liberan energía tan rápidamente que originan una explosión. Los explosivos generalmente contienen carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Por ejemplo, la nitroglicerina ($C_3H_5(NO_3)$).

Una explosión es un evento caracterizado por la generación de ondas de choque cuyas velocidades exceden la velocidad del sonido en el medio que lo rodea. Fuerzas químicas, mecánicas y nucleares pueden causar una explosión. Por ejemplo, incrementar la presión en un tanque que contenga aire hasta que este se rompa resultara en una explosión mecánica; también se tiene, la ignición de un petardo causada por una mezcla de pólvora la cual produce una reacción química. Finalmente el proceso de fisión en una bomba atómica nos dará una explosión nuclear⁶.

El proceso por el cual las reacciones químicas permiten que una explosión pueda ser originada se denomina iniciación. Estos procesos incluyen calor, presión y corriente eléctrica.

La explosión produce gases, productos sólidos, calor y presión. Los gases resultantes incluyen monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogeno (H₂), nitrógeno (N₂) y vapor de agua. La cantidad de vapor generado por una explosión es llamado “calor de la explosión” y es expresado en calorías de calor por gramo de explosivo. Esta es una medida de la cantidad de energía disponible en un explosivo y es muy útil en la determinación de que tanto trabajo puede ser hecho por el explosivo.

Para describir los explosivos se define los siguientes términos: detonación, deflagración, combustión, estabilidad, sensibilidad, explosivos de baja y alta, explosivos primarios y secundarios.

⁶ RODRIGUEZ, Álirio Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1991.

1.2.1. Combustión, Deflagración y Detonación

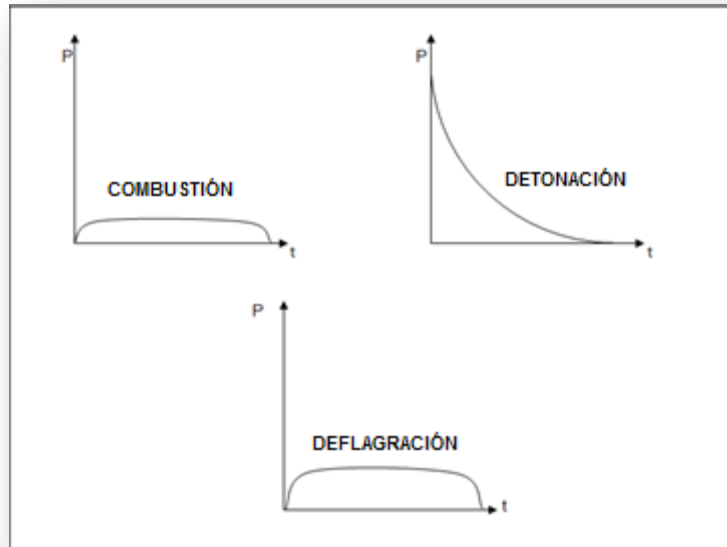
Combustión, deflagración y detonación son reacciones de oxidación y todas pueden conducir a generar explosiones. Sin embargo, ellas difieren en las velocidades de reacción, tasa de reacción, energía producida y presión generada.

La velocidad de reacción, es la velocidad a la cual el producto de la reacción atraviesa el medio reactante; mientras la tasa de reacción es la tasa a la cual el medio reactante es consumado⁷

Como se observa en la figura 2. Las reacciones de combustión y deflagración son lentas y de baja presión. La velocidad de la reacción es menor que la velocidad del sonido en el medio reactante. La diferencia principal entre la combustión y deflagración es que tanto la velocidad como la tasa de reacción son menores en la combustión. En ambos casos la reacción es propagada a través del medio reactante por el calor de conducción. La detonación es una reacción muy rápida y de gran presión. Esta es un tipo especial de explosión en la cual la velocidad de reacción excede la velocidad del sonido en el material reactante. De este modo, con la detonación la reacción es propagada por un choque de ondas supersónicas viajando a través del medio reactante.

⁷ RODRIGUEZ, Álirio Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1991.

Figura 2. Incremento en la presión asociado con la combustión, deflagración y detonación.



Fuente: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S.

Después de la iniciación la onda de choque acelera rápidamente hasta que esta alcance una velocidad máxima que se denomina “velocidad de detonación del explosivo.” La velocidad de detonación depende de su naturaleza química así como de su sin número de otras propiedades. Un ejemplo de una reacción de detonación es la explosión de la nitroglicerina.

La tabla 1. Enumera algunos de los parámetros asociados con la combustión, deflagración y detonación. Es interesante notar que la energía liberada durante la combustión, deflagración o una reacción de detonación es la misma y es del orden de 1000 calorías por cada gramo de reactante. Similarmente, la cantidad de gas producido durante algunas de estas reacciones es aproximadamente la misma, y es del orden de 1

litro por gramo de reactante. Sin embargo, la diferencia en las velocidades de reacción es apreciable y directamente reflejada en la energía producida⁸.

Tabla 1. Parámetros asociados a la combustión deflagración y detonación

	Combustión	Deflagración	Detonación
Velocidad (m/s)	0,01	1	>1000
Energía (cal/gr)	1000	1000	1000
Volumen de gas (L/gr)	1	1	1
Potencia / area (cal/s)/cm²	1	100	>100000

Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S. Incremento en la presión asociado con la combustión, deflagración y detonación.

El explosivo en una carga detonadora debe activarse para que realice una perforación efectiva. Sin embargo, si la carga es expuesta a temperaturas más altas que aquéllas para las que fueron diseñadas estas se degradarán y puede ocurrir una combustión o deflagración instantánea, lo cual no producirá una perforación.

⁸ Ibíd.

1.2.2. Explosivos de alta y baja

Los explosivos pueden clasificarse de acuerdo a su velocidad de reacción como explosivos de alta y baja velocidad. Los explosivos de baja (explosivos de deflagración) no son detonantes; ellos encienden muy rápidamente, teniendo una velocidad de reacción entre 1100 ft/s y 5000 ft/s y generalmente deben ser confinados sin no vas a ser usados, son sensibles al calor y consecuentemente son iniciados por llama, chispa u otra fuente de calor. Los explosivos de alta son de tipo detonante iniciados por calor o percusión; ellos tienen una velocidad de reacción que excede los 5000 ft/s. Mientras la presión producida por un explosivo de baja velocidad puede tardarse varios segundos, la presión producida por un explosivo de alta demora solamente unos pocos microsegundos, entonces la energía liberada por un explosivo de alta es mucho mayor que la de los explosivos de baja⁹.

1.2.3. Sensibilidad y Estabilidad

Sensibilidad se refiere a la facilidad con la cual un explosivo puede ser iniciado esta es una medida de la mínima energía, presión o potencia requerida para la inicialización. Se tienen dos tipos de sensibilidades: sensibilidad al impacto que indica la mínima altura a partir de la cual un peso puede dejarse caer dentro de un explosivo con el fin de detonarlo y la sensibilidad de chispa indica la cantidad de energía que debe ser suministrada por una chispa para detonar la carga. Los explosivos se clasifican como primarios (sensibles)

⁹ *Ibíd.*

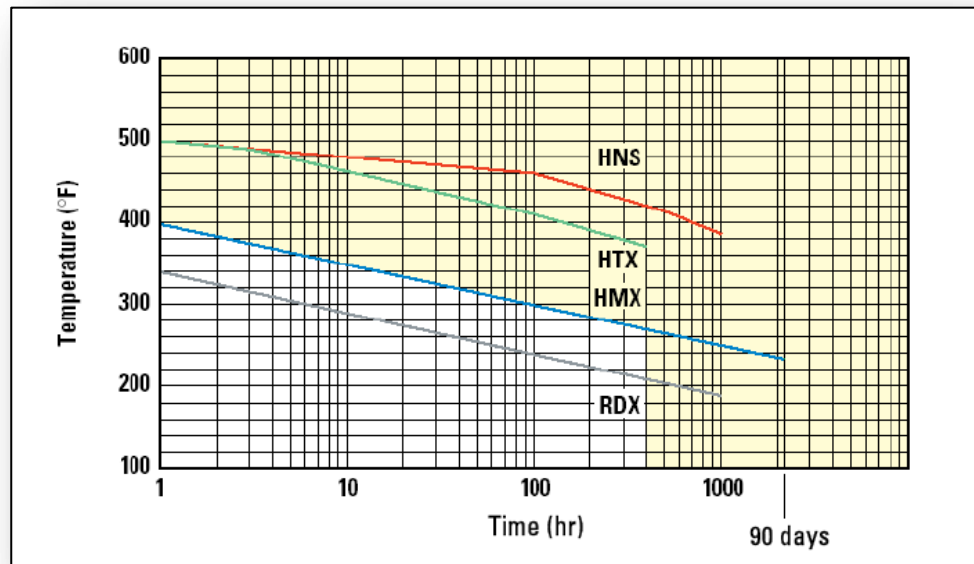
y secundarios (insensibles) debido a la facilidad con la que ocurre la inicialización de la detonación

La estabilidad se refiere a la capacidad de un explosivo de permanecer por largos períodos de tiempo o resistir a altas temperaturas sin descomponerse. Los explosivos usados en el cañoneo deberán tener una gran estabilidad y de esta forma pueden ser almacenados por razonables periodos de tiempo y operar efectivamente después de una exposición a las temperaturas del pozo.

En la figura 3. Se ilustra la estabilidad para el RDX, HMX, HNS y HTX como una función de la temperatura y el tiempo. En el diagrama, un punto (t, T) para una curva de un explosivo en particular indica que el explosivo puede sobrevivir para un tiempo t horas a una temperatura T, sin que su descomposición sea significativa. Por ejemplo, la curva de RDX indica que una carga perforadora RDX podría ser expuesta en el pozo a temperaturas tan altas como 300 °F por aproximadamente 5 horas y aun así esperar un buen rendimiento. Como se observa en las curvas, los explosivos en orden creciente de estabilidad son: RDX, HMX, HTX, HNS¹⁰.

¹⁰ Ibid.

Figura 3. Estabilidad de los explosivos



Fuente: BENAVIDES, Marcia, Schlumberger. "Basic Perforating Principles". Bucaramanga, Santander. 2008.

1.2.4. Explosivos primarios y secundarios

De acuerdo a su sensibilidad, los explosivos de alta pueden ser subdivididos en explosivos primarios y secundarios.

Los explosivos primarios son más sensibles a un estímulo externo tal como el calor, la fricción, choque y corriente eléctrica. Estos explosivos son capaces de desarrollar a partir de la deflagración una detonación en un muy corto tiempo y sobre una distancia muy reducida. De este modo, las ondas de detonación pueden propagarse en columnas de diámetro extremadamente pequeñas. Los explosivos primarios son normalmente usados para iniciar los secundarios. Explosivos menos sensibles pero más poderosos. Ejemplos de explosivos primarios son el Lead azide y el lead styphnate.

Los explosivos secundarios son relativamente insensibles a la iniciación. Cuando son iniciados por una flama, los explosivos secundarios en un estado de confinamiento deflagran sin detonar. Para una detonación, un explosivo secundario usualmente requiere de un choque suministrado por un explosivo primario. RDX, HMX, HTX, HNS son ejemplos de explosivos secundarios.

Los explosivos de alta usados en cañoneo son suministrados en forma granular o cristalina. Cuando el tamaño de la partícula disminuye, la sensibilidad del explosivo secundario tiende a aumentar, para explosivos primarios es totalmente lo contrario. Los explosivos secundarios exhibirán un punto de fusión claramente definido, mientras los explosivos primarios generalmente explotan antes del punto de fusión¹¹.

1.3. TIPOS DE CARGAS EXPLOSIVAS

1.3.1. Cargas de alta penetración (DP).

Las cargas de alta penetración (DP), son realizadas con una mezcla de metales, cobre y tungsteno principalmente, su diseño geométrico permite obtener perforaciones profundas y muy delgadas, creando agujeros de diámetros muy pequeños, su revestimiento es alargado y fino lo que produce un chorro estrecho pero de muy alta velocidad. Se utilizan en zonas de alta dureza y con alta anisotropía de la formación¹².

¹¹ *Ibíd.*

¹² DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007.

1.3.2. Cargas de hoyo grande (BH).

Las cargas de hoyo grande (BH), son fabricadas con laminas compuestas normalmente se utilizan aleaciones de Cobre + Zinc, pero otros materiales están siendo analizados. La penetración de este tipo de cargas es relativamente somera, pero un gran agujero es creado en el revestimiento, su forma geométrica es de tipo parabólico, lo que crea un chorro de alta velocidad, se aplican en formaciones no consolidadas específicamente para el control de arena¹³.

1.4. CAÑONES

Un cañón consiste en un conjunto de cargas perforadas, un detonador, un cordón detonante, y una carga explosiva moldeada como se observa en la figura 4. Esto es en sí un tren de componentes de explosivos en serie.

1.4.1. Tren de componentes explosivos

- **Detonador o iniciador:** El detonador es el encargado de iniciar el proceso explosivo, por medio del cordón explosivo que deberá estar en contacto con el explosivo del detonador, este iniciador puede estar localizado encima o debajo de los cañones. Existen dos tipos aplicados en la industria petrolera: detonadores eléctricos, utilizados para cañones transportados por cable, manejan un amperaje de 0,8 amperios y estos a su vez se dividen en: sensibles y no sensibles al fluido. Detonadores de

¹³ DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproduccion. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007.

percusión, utilizados para cañones transportados con tubería, el causante de la detonación es un impacto causado de 5 a 7 ft-lb y no son sensibles a la corriente eléctrica.

- **Cordón detonante:** Consiste en un sistema de conexiones que permite la transmisión del iniciador a las cargas huecas, generando la detonación a lo largo del cañón, este cordón es plástico o metálico y cubre el núcleo, este es un explosivo secundario. Los explosivos usados actualmente son RDX, HMX¹⁴.

Las velocidades de detonación son importantes:

Los RDX y HMX son los más rápidos, hasta 26.000 ft/s.

Los HNS y PYX son los más lentos, cerca de 20.000 ft/s¹⁵.

- **Carga explosiva moldeada:** Está conformada por una carcasa, un forro o cubierta, carga de un explosivo principal, una carga primaria y una muesca de cordón detonante.

La carcasa permite alojar los otros componentes de la carga, están fabricadas generalmente de zinc o aceros suaves y debe soportar altas presiones y temperaturas.

El forro o cubierta es un material presionado o sólido, este puede tener forma cónica o parabólica, la forma cónica es usada para obtener perforaciones más profundas o largas y la forma parabólica es usada en cargas para producir hoyos más grandes es decir perforaciones de diámetros más grandes.

El explosivo principal es el que provee de energía para producir el chorro o explosión. El rendimiento de la carga depende en gran proporción de la clase, forma, masa, distribución y velocidad de detonación del explosivo principal. Están

¹⁴ RODRIGUEZ, Álirio Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. Cit.

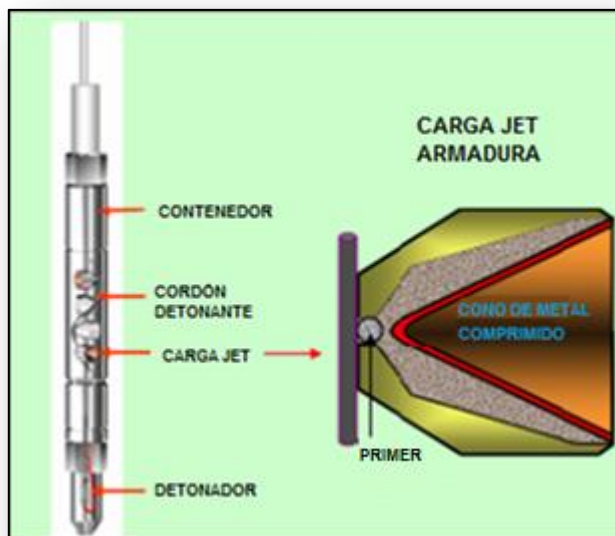
¹⁵ RODRIGUEZ, Luis., Op. Cit.

compuestos generalmente por explosivos secundarios tales como RDX, HMX, HNS y HTX.

El explosivo es usualmente suplido con una cera sobre los granos, la cual, reduce la sensibilidad del explosivo y lo hace más seguro de manejar.

Los explosivos de alta comúnmente usados en operaciones de cañoneo son el lead azide, lead styphnate, PETN, RDX, HMX y HTX. El lead azide y lead styphnate son usados en detonadores mientras que el PETN es usado como cordón detonante¹⁶. El RDX, HMX, HTX, HNS, y PYX son usados en detonadores. Cordones detonantes y cargas perforadoras varias propiedades de algunos de estos explosivos son dados en la tabla 2.

Figura 4. Tren de componentes explosivos



Fuente: WILEY, John. Halliburton-Petroleum well construction. Julio 1997.

¹⁶ RODRIGUEZ, Álvaro Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. Cit.

Tabla 2. Propiedades físicas de los explosivos de alta.

Nombre común	PETN	RDX	HMX	HNS	PYX
Formula Química	$C_5H_8(NO_3)_4$	$C_3H_6N_6(NO_2)_4$	$C_4H_8N_4(NO_2)_4$	$C_{14}H_6(NO_2)_6$	$C_{17}H_7N_3(NO_2)_8$
Peso Molecular	316,2	221,1	296,2	450	621,3
Punto de Fusión °C	141	204	273	319	360
Densidad (gr/cm ³)	1,77	1,82	1,9	1,74	1,77
Presión de detonación (psi)	4.500.000	5.000.000	5.700.000	3.500.000	3.700.000
Velocidad de detonación (ft/s)	27600	28700	29800	23000	24500
Calor de explosión (cal/gr)	1385	1280	1365	1000	N/A
Volumen de gas (cm ³ /gr)	790	908	908	N/A	N/A

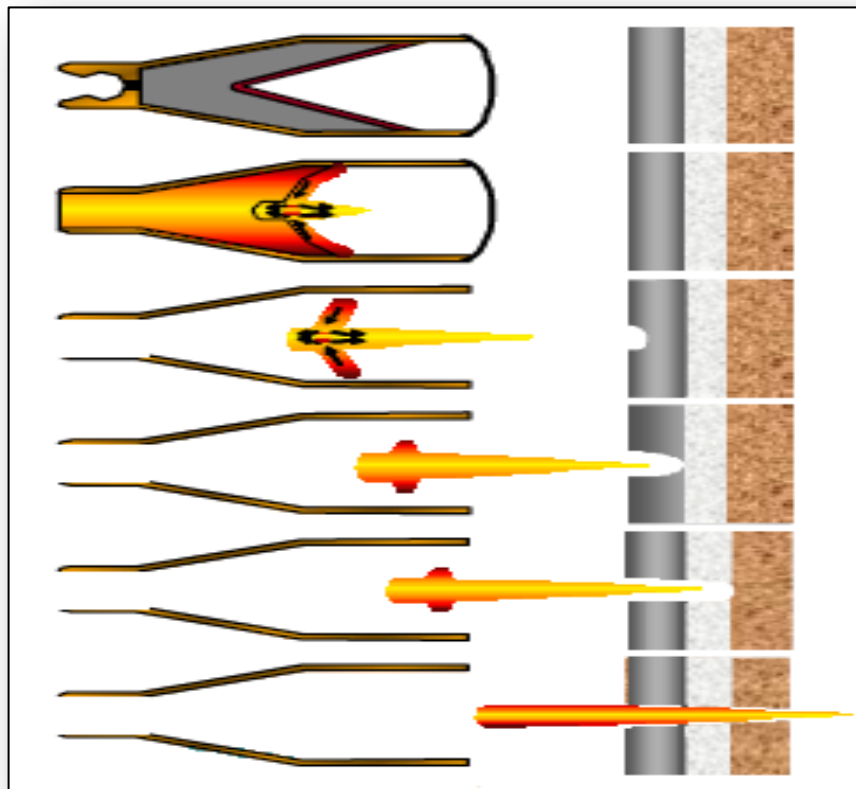
Modificado de: WILEY, John. Halliburton petroleum well construction. Jul 1997.

1.5. PROCESO DE CAÑONEO

- Carga sin detonar.
- La carga se detona, la carcasa se expande y el forro o cubierta comienza a colapsarse.
- Se forma un chorro de alta presión de partículas de metal fluidizado, la onda de presión viaja a 8.000 pies/segundo y 7.000.000 psi.

- El chorro se desarrolla más y la presión hace que la velocidad aumente a 23.000 pies/segundo.
- El chorro se elonga porque la parte posterior viaja a una velocidad menor (3.000 pies/segundo.).
- La penetración se logra mediante una presión de impacto elevada; 3 - 5 millones de psi en el revestimiento y cerca de 300.000 psi en la formación¹⁷.

Figura 5. Proceso de cañoneo.



Fuente: ESP oil completación y reacondicionamiento de pozos. LUIS. RODRIGUEZ.

¹⁷ RODRIGUEZ, Luis., Op. Cit.

1.6. OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD

Cuando se piensa en el cañoneo de un pozo es frecuente que los cañones reciban la mayor atención, sin embargo se debe recordar que el objetivo principal es establecer una comunicación efectiva entre el pozo y la formación, para lo cual se analizan los factores más importantes que influyen en el flujo de fluidos a través de las perforaciones. Estos incluyen los parámetros geométricos del cañoneo, las zonas dañadas alrededor del pozo, las zonas compactadas alrededor de las perforaciones, las heterogeneidades de la formación y la presión diferencial que se tiene al cañonear¹⁸.

1.6.1. Factores que afectan los resultados de los disparos.

- **Taponamiento de los disparos**

El taponamiento de los disparos con residuos del recubrimiento metálico puede ser muy severo. Mediante el empleo de recubrimientos cónicos elaborados con metal pulverizado, los residuos mayores han sido eliminados en varias de las cargas especiales. Los residuos del recubrimiento también se forman, pero son arrastrados al fondo del hueco abierto por el disparo en forma de partículas del tamaño de arena o más pequeñas. Las pruebas superficiales a presión atmosférica, no son confiables para evaluar este tipo de taponamiento de los disparos, debido a que los residuos frecuentemente son desviados de los disparos a la presión atmosférica.

Los disparos tienden a llenarse con roca triturada de la formación, con sólidos de lodo, y residuos de las cargas cuando se dispara en lodo. Estos tapones no son fácilmente removidos por el contra flujo. La presencia de partículas compactadas y trituradas de la

¹⁸ RODRIGUEZ, Álirio Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. Cit.

formación alrededor de los disparos reduce aún más la probabilidad de limpiar los disparos. Los lodos con alta densidad mezclados con sólidos pesados, provocan la formación de tapones densos en los disparos. Cuando se abren algunos disparos que requieren una presión diferencial baja, el flujo a través de estos disparos dificulta la creación de la mayor caída de presión requerida para abrir más disparos. En formaciones estratificadas, como las constituidas por secuencias de lutita y arena, un gran número de disparos permanecen taponados y pueden evitar que se drenen algunas zonas específicas. Cuando están taponadas, o parcialmente obturadas, una o más zonas en un yacimiento estratificado, las pruebas de formación, las de producción y las mediciones del índice de productividad, pueden proporcionar una evaluación errónea sobre el daño del pozo, su productividad y su recuperación.

- **Efecto de la presión diferencial**

Cuando se dispara en lodo, con una presión diferencial hacia la formación, los disparos se llenan con partículas sólidas de lodo de la formación y residuos de las cargas. Los tapones del lodo son difíciles de remover, produciendo en algunos disparos un taponamiento permanente y reduciendo la productividad del pozo.

Aún cuando se dispare en fluidos limpios tales como aceite o agua que tienen altos ritmos de filtrado, las partículas procedentes de las arcillas, residuos de las cargas, o de otro tipo, pueden originar algún taponamiento de los disparos y un daño profundo en la formación. Las formaciones con permeabilidad de 250 md o mayores, permiten que las partículas de tamaño de las arcillas se desplacen hacia los poros de la formación o por las fracturas ocasionando un daño muy severo.

Para formaciones de carbonato es aconsejable cañonear con HCl o ácido acético, para obtener una alta productividad, pero generalmente se cañonea con fluidos limpios, las

recomendaciones de la tabla 3 son una modificación de los estudios de campo hechos por King, Anderson y Bingham.

Cuando los disparos se efectúan con una presión diferencial desde el pozo y con fluidos limpios, se ayuda a obtener una buena limpieza de los disparos. Este es el método preferido de areniscas y carbonatadas¹⁹.

Tabla 3. Presión diferencial a favor de la formación cuando se cañonea

CONDICIONES DEL YACIMIENTO		PRESIÓN DIFERENCIAL	
		POZO PETROLEO	POZO GAS
ARENAS CONSOLIDADAS ARENAS CONSOLIDADAS	NO	300-500	300-500
	Permeabilidad formación		
	Mayor que 100 md	500	1000
	Entre 100 y 10 md	500-1000	2000
	Menor que 10 md	1000-2000	2000
CARBONATOS	Permeabilidad de formación		
	Mayor a 250 md	500	500
	Entre 100 y 250 md	750	1000
	Menor que 100 md	1000	2000
	Menor que 10 md	2000	2000

Modificado de: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007.

¹⁹ DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Op. Cit.

- **Efecto de usar fluidos limpios**

La productividad del pozo, en todos los pozos de arena y carbonato, será maximizada por el cañoneo en aceite o salmuera limpios con una presión diferencial a favor de la formación, además, es necesario tener un período de limpieza de los disparos. Si el pozo está cerrado hay que recuperar los cañones antes de completar la limpieza de todos los disparos; muchos de estos podrán permanecer taponados debido a un asentamiento de sólidos en el pozo durante el período de cierre.

- **Efecto de la resistencia a la compresión**

La penetración y tamaño del hueco hechos por los cañones son reducidos cuando aumenta la resistencia de compresión del revestimiento, cemento y roca de formación.

- **Limitaciones de presión y temperatura**

Existen especificaciones sobre las presiones y temperaturas de operación para todos los cañones. Las presiones en el fondo del pozo pueden limitar el uso de algunos cañones con cargas expuestas.

Como regla general, las cargas de alta temperatura no deben ser empleadas en pozos con un rango de temperatura entre 300 - 400 °F. Esta recomendación está basada en lo siguiente:

- Algunas cargas de alta temperatura proveen baja penetración.
- Son menos sensibles, lo que puede provocar un incremento en las fallas.
- Estas cargas son más costosas.
- Hay menos opción de selección.

Cuando se usa cargas de baja temperatura y estamos operando en los límites máximos de operación de temperatura las siguientes opciones pueden ser consideradas:

- Los pozos pueden ser circulados con fluidos que tengan baja temperatura, esto se realiza para bajar la temperatura de la formación y zona circundante; es aplicable para cañones through tubing, los cuales pueden ser corridos inmediatamente después de que el fluido ha sido parado²⁰.
- Si existe alguna duda en cuanto a si el límite de temperatura de los cañones puede ser alcanzado antes de disparar los cañones, los detonadores de alta temperatura pueden ser empleados en cañones equipados con cargas convencionales de baja temperatura. Esta opción prevendrá disparos accidentales en un intervalo erróneo debido a la alta temperatura del fondo del pozo. Las cargas expuestas a una alta temperatura quemaran sin perforar el revestimiento, a menos que se disparen con un cañón con detonador.

Para pozos de excesiva temperatura, lo que se hace es emplear todo un paquete de componentes de alta temperatura; esto incluye un detonador, cordón detonante, la carga primaria y la carga de potencia principal; generalmente, el detonador es la clave de todo el sistema, ya que si este no es disparado, tampoco lo harán las cargas.

- **Medición de la profundidad de la arena productora**

El método aceptado para asegurar un control preciso en la profundidad de los disparos consiste en correr un registro localizador de collares (CCL) con los cañones, y medir la

²⁰ Ibid.

profundidad de los collares que han sido localizados, respecto a las formaciones, usando registros radioactivos.

Pastillas radioactivas pueden ser insertadas dentro de la sarta de cañoneo para ayudar en la localización exacta de profundidad del cañoneo con un registro de rayos gamma. Los registros del collar pueden mostrar viejos cañoneos hechos con cargas expuestas, estos se muestran a manera de hinchamientos o abultamientos en el revestimiento debido a la detonación de las cargas²¹.

1.6.2. Factores que afectan la productividad de un pozo.

El índice de productividad nos permite evaluar la potencialidad de un pozo y está representado matemáticamente por:

$$J = \frac{q}{pws - pwf}$$

El índice de productividad de una zona puede ser difícil de determinar, por lo tanto el efecto del diseño del sistema de cañoneo como son la penetración, fase, densidad, diámetro del agujero, daño del lodo, etc., pueden ser evaluados usando la Relación de Productividad.

$$PR = \frac{\text{Prod}_{\text{zona}_{\text{disparada}}}}{\text{Prod}_{\text{zona}_{\text{en}_{\text{agujero}_{\text{abierto}}}}}}$$

²¹ *Ibíd.*

- **Principales factores que afectan la productividad del pozo son:**

1. Factores geométricos del disparo.
 - Determinación de la densidad de disparo
 - Penetración contra tamaño de agujero
 - Efecto de la penetración y densidad de carga en la relación de la productividad (RP)
 - Efecto de la fase de disparo en la relación de la productividad.
2. Presión diferencial al momento del disparo
 - Sobre balance $P. \text{ hidrostática} > P. \text{ formación}$
 - Bajo balance $P. \text{ hidrostática} < P. \text{ formación}$
 - Bajo balance extremo
3. Tipo de cañones y cargas
 - Cañones bajados con cable (wireline)
 - Casing gun
 - Through-tubing gun
 - Cañones bajados con tubería (Tubing Conveyed Perforating, TCP.)
4. Daño generado por el disparo
5. Daño causado por el fluido de la perforación

Como se puede observar, los cuatro primeros factores que afectan la productividad pueden ser manipulados durante el diseño del disparo. Por lo tanto con el análisis de las

condiciones del pozo y la selección del sistema de disparo adecuado, se obtendrá la máxima producción del pozo, además los tres primeros factores se explicaran con más detalle en los capítulos 2, 3, 4.

- **Daño generado por el disparo**

El proceso de perforación de formaciones permeables y porosas con las cargas moldeadas crea una "película" que se opone al flujo en el agujero. El jet o carga penetra la formación a alta velocidad, desplazando radialmente el material de formación, creándose una zona compactada alrededor del agujero y reduciendo la permeabilidad original.

Para disminuir el efecto pelicular deberá incrementarse la penetración para librar la zona de daño.

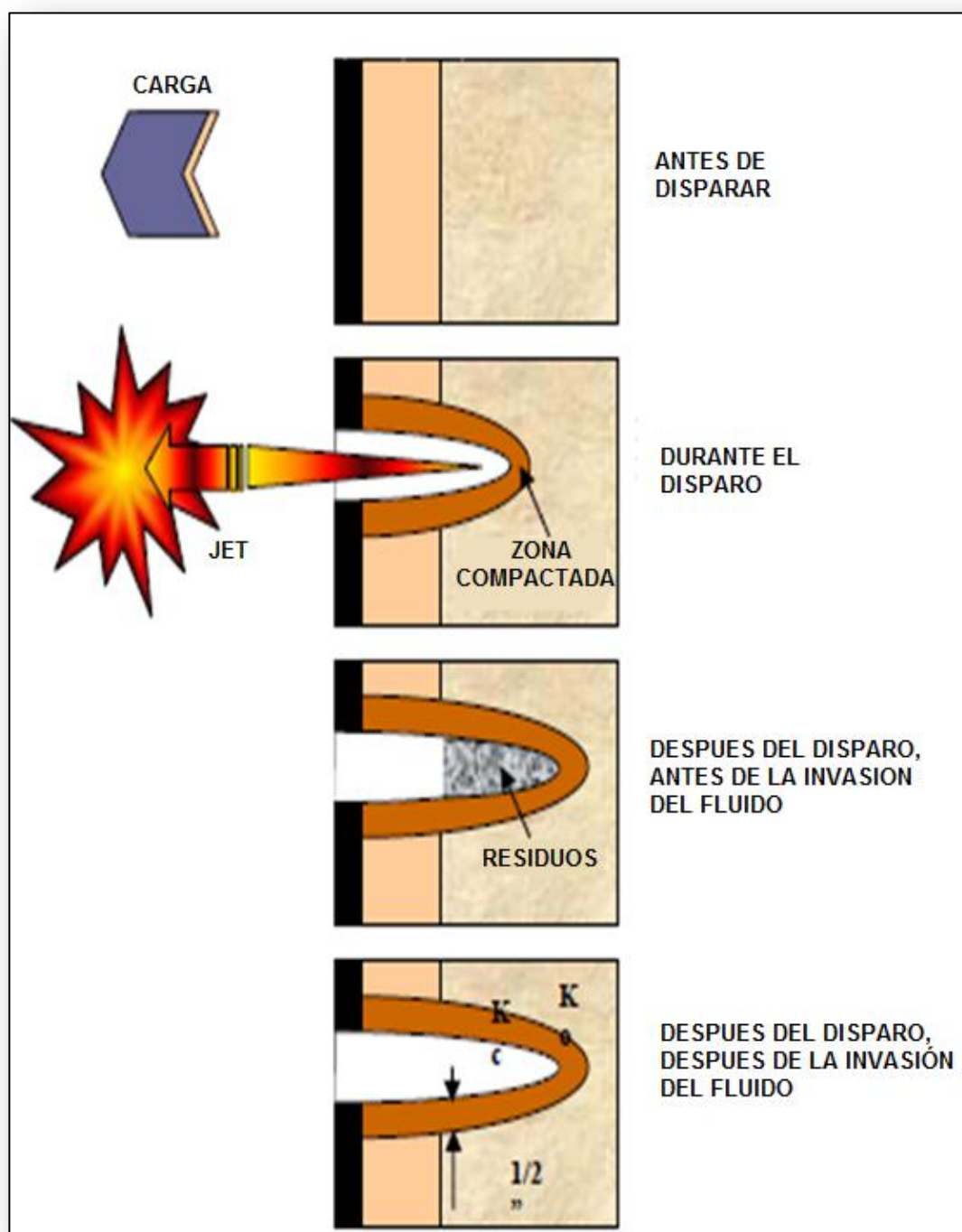
- **Daño generado por el fluido de la perforación**

Durante el proceso de perforación del pozo se causa un daño a la formación debido al lodo de perforación. Este daño se asocia al taponamiento de los poros alrededor del pozo.

Existe la tendencia de usar lodos que cumplan con el propósito inmediato de perforar segura y económicamente un pozo, pero no siempre se piensa en los efectos del fluido sobre la productividad del pozo²².

²² Ibid.

Figura 6. Daño a la formación por el disparo.



Fuente: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007.

2. TIPOS DE CAÑONEO

2.1. RESEÑA HISTORICA DE LOS TIPOS DE CAÑONEO

La operación de cañoneo es un factor primordial en el proceso por medio del cual se completa un pozo.

Antes de 1930 el revestimiento era perforado por medios totalmente mecánicos (sacabocados, punzones, cortadores circulares, etc.), diseñados especialmente para ello, pero estos procedimientos fueron generalmente complicados e inseguros. En 1932 fue desarrollado en California el cañón a bala y desde entonces su uso se ha extendido continuamente por las grandes ventajas que tiene sobre los métodos mecánicos. El cañón a bala, es un cañón con varias cámaras donde se inserta la bala con el explosivo que se encarga de impulsarla al ser detonada; está diseñado para bajarlo dentro del pozo, posicionarlo frente al intervalo y dispararlo controlado eléctricamente desde superficie.

Las cargas moldeadas o a chorro fueron desarrolladas en 1946, durante la segunda guerra mundial. Originalmente este tipo de cargas se emplearon para la bazuca y luego se utilizó en la industria petrolera debido a sus características y las ventajas que presentaba sobre el cañoneo a bala. El cañoneo con cargas moldeadas es similar al que se hace con las balas excepto que estas son reemplazadas por cargas de explosivos moldeados²³. Hoy en día las cargas moldeadas son las más utilizadas en el cañoneo de pozos, aunque el cañoneo a bala tiene muchas aplicaciones en casos especiales.

Existen cuatro formas de establecer comunicación entre el pozo y la formación productora.

²³ BARAJAS, Gonzalo Efrén. LOZANO, Luis Gerardo. Nuevas técnicas de cañoneo. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. 1982.

2.1.1. CAÑONEO POR MEDIOS MECANICOS

Consiste en perforar el revestimiento, cemento y formación por medio de punzones, sacabocados, cortadores circulares, etc.

Este método es muy dispendioso, produce graves daños al revestimiento y hoy está prácticamente desechado pues ha sido reemplazado por muchos medios más versátiles y menos costosos²⁴.

2.1.2. CAÑONEO A BALA

En este método las balas son disparadas hacia el revestimiento atravesando el cemento hasta llegar a la formación, el desempeño disminuye sustancialmente al incrementar la dureza de la formación, del revestimiento y cemento de alta consistencia²⁵.

Las partes principales del arreglo de una bala son: mecha, detonante, carga explosiva, proyectil o bala.

Los cañones utilizados para perforación a bala son cilindros de acero que pueden ser enterizos o armados por secciones de diferentes longitudes con boquillas para cuatro balas por pie. Estás pueden estar dispuestas en espiral o en línea y pueden ser disparadas selectivamente o simultáneamente.

Los cañones a bala no dejan escombros en el pozo, ni causan taponamientos a la formación. Las balas causan pequeños daños al revestimiento y al cemento; producen un hueco de entrada liso, redondo y uniforme; característicamente la bala también produce agrietamientos al final de la perforación.

²⁴ Ibid.

²⁵ ARRIETA, Mario. Daño de la formación y cañoneo. Venezuela. Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Bolivariana.

La penetración a bala es más efectiva o su penetración es mayor en rocas de bajo esfuerzo de compresión. Una de las mayores aplicaciones que se puede hacer de la perforación a bala se halla en los pozos donde es necesario controlar la arena ya que puede obtener huecos muy uniformes en el revestimiento.

2.1.3. CAÑONES A CHORRO HIDRAULICO

Este método apareció alrededor de 1960 como medio para perforar el revestimiento, cemento y formación; no se utiliza como método de perforación por el tiempo y el costo que requiere la operación, también es usado para inducir o fracturar la formación²⁶.

El equipo utilizado para los cañones a chorro hidráulico son: bombas en superficie, sarta de tubería, fluido y abrasivo (arena), boquillas.

Utiliza altas presiones de fluido (algunas veces con arena) para realizar agujeros, los fluidos son bombeados a través de la tubería con un arreglo de orificios direccionados hacia la pared del revestimiento.

La tubería es manejada para realizar agujeros, canales e inclusive cortes completos circunferenciales del revestimiento, el chorro presurizado lanzado hacia la formación, deja túneles limpios con muy poco daño, los agujeros son creados uno a la vez pero tiene la desventaja de ser un sistema muy lento y costoso.

2.1.4. CAÑONEO A CHORRO

Es el método más ampliamente usado hoy en día por su efectividad, su variedad de aplicaciones y su gran adaptabilidad a las diferentes condiciones que pueden presentarse

²⁶ BARAJAS, Gonzalo Efrén. LOZANO, Luis Gerardo. Op. Cit.

en un pozo los procedimientos de perforación a chorro producen máxima penetración en rocas con alto esfuerzo de compresión.

Las cargas a chorro o cargas moldeadas producen entradas de huecos satisfactorias pero no tan uniformes algunas cargas o chorro causan una deformación en el anillo del cemento.

Las cargas de explosivos para perforación a chorro se presentan en dos formas:

- A. Alojadas dentro del cilindro de acero o cañones que poseen determinado número de huecos o portadores cóncavos por pie de longitud y dentro de los cuales se introduce la carga moldeada o explosivo.
 - B. Ensamblajes destapados por tuberías, este tipo de cargas se presentan en forma de barras, capsulas, eslabones, etc. Estos generalmente dejan apreciable cantidad de desechos en el pozo después del disparo; también el daño que le puede producir al revestimiento llega hasta su ruptura, como consecuencia de que la mayor parte de la energía de la explosión tiene que soportar este²⁷.
-
- **Cargas moldeadas o perforador Jet:** El componente más importante de un cañón es la carga perforadora. La carga utiliza un explosivo secundario de alta para impulsar una corriente o chorro de partículas metálicas a alta velocidad que penetran en el revestimiento, cemento y formación. aunque las cargas a chorro también llamadas cargas perforadoras, son sencillas en apariencia, ellas son realmente mecanismos de presión y deben ser cuidadosamente diseñadas y

²⁷ Ibid.

manufacturadas para asegurar que se obtenga los parámetros de perforación deseados.

Componentes de una carga moldeada: Como se muestra en la figura 7 una carga moldeada tiene 4 componentes: la carcasa, el revestimiento, forro o cubierta (liner), el explosivo principal, y el explosivo primario o primer²⁸.

La carcasa: Es la cámara que contiene los otros componentes de la carga, debe resistir altas temperaturas y presiones, y si no está protegida del medio ambiente del pozo por el cañón, debe ser resistente a la abrasión. Comúnmente el material de la carcasa es zinc o aceros suaves.

Revestimiento de la carga (liner, forro o cubierta): El revestimiento de la carga suministra la masa requerida para que el chorro penetre el revestimiento del pozo, cemento y formación. La presión percibida en el revestimiento (liner) cuando el explosivo principal detona causa que este se colapse y forme el chorro. La forma de este revestimiento su espesor y composición influyen sustancialmente en la profundidad, diámetro y efectividad de la perforación.

El revestimiento usualmente es de forma cónica o parabólica, como se muestra en la figura 7. La forma cónica es usada en carga para penetración más profunda y la parabólica para generar perforaciones de grandes diámetros. En ambos casos, el revestimiento es referido con frecuencia como el cono, la punta del cono es llamado “ápice” y el ancho “base.”

Los revestimientos de las cargas generalmente son fabricados en cobre, o una mezcla de este con algún otro material. La alta densidad del cobre es

²⁸ RODRIGUEZ, Álirio Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. Cit.

importante para proveer al chorro de la masa necesaria para penetrar el blanco, además el material del liner puede ser prensado o solido²⁹.

Los revestimientos prensados son frecuentemente usados en cargas de profundidad y son usualmente una mezcla de cobre y plomo pulverizado, el plomo ayuda a mantener la forma del revestimiento.

Cuando la carga es detonada, el revestimiento prensado se desintegra para formar un chorro de partículas finas, estas partículas tienden a dispararse uniformemente a lo largo de la perforación de diámetro relativamente pequeño, de este modo ellas no serán un obstáculo apreciable para el flujo de fluidos a través de la perforación.

Los revestimientos sólidos son fabricados de cobre o una aleación cobre/plata. La alta ductilidad del cobre permite a este fluir justamente a lo largo del chorro sin dispersarse. Los revestimientos sólidos son muy usados en cargas para diámetro grande y forman una masa sólida que arrastra la parte posterior del chorro. Sin embargo, la carga es diseñada de tal forma que la masa es relativamente pequeña comparada con el diámetro de la perforación y así este no bloquea la perforación. La figura 7 ilustra el chorro formado por el revestimiento en material pulverizado y el revestimiento en material solido (compacto).

Explosivo principal: El explosivo principal suministra la energía necesaria para producir el chorro. La masa, distribución y velocidad de detonación del explosivo principal son factores que afectan significativamente el comportamiento de la carga³⁰.

²⁹ Ibid.

³⁰ Ibid.

Los explosivos secundarios granulares de alto grado tales como RDX, HMX, HNS, y PYX. Son utilizados. Una cantidad adecuada del explosivo es medido en la carcasa de la carga; el revestimiento es colocado en el tope del explosivo, luego se aplica presión a la cubierta y al revestimiento para compactar el explosivo. El tipo de explosivo determina la velocidad de detonación.

En el caso del RDX y otros explosivos usados en rangos de temperaturas normales, les son suministrados usualmente una película de parafina. La parafina reduce la sensibilidad del explosivo y lo hace más seguro y manejable, esta también sirve como un blindaje permitiendo al explosivo su forma hasta después de presionado.

Los explosivos tales como HNS y PYX que se utilizan en aplicación a altas temperaturas son relativamente sensibles y no se necesita agregar la película de parafina.

El rango de la cantidad de explosivo principal está entre 2 gramos en cargas colocadas en cañones de diámetro pequeño utilizados para atravesar tubería de producción, hasta más de 30 gramos en cargas colocadas en cañones hollow carrier de grande diámetros usadas para aplicaciones en el revestimiento del pozo.

Explosivo primario: El explosivo primario, está compuesto por una pequeña cantidad de explosivo que es más sensible que el explosivo principal. El explosivo primario es referido como la carga transmisora, cuyo propósito central es transferir el choque desde el cordón detonante al explosivo principal.

La onda de choque originada en el cordón detonante genera una onda de choque en el explosivo primario el cual detona el explosivo principal.

Éste frecuentemente consiste en un gramo de explosivo del mismo tipo del explosivo principal, excepto en la parte que no tiene película de parafina y forma finamente granulada. Éste por lo tanto es más sensible a la detonación que el explosivo principal. De esta manera, por ejemplo, si el explosivo principal es el RDX, entonces el primario usualmente será RDX³¹.

Generalidades de operación de la carga a chorro

Realmente el proceso ocurre de una forma muy rápida, con una completa secuencia de eventos a partir de la detonación de la carga hasta completar la penetración del blanco, para lo cual requiere de unos pocos microsegundos.

- **Formación del chorro:** La onda de choque generada en el explosivo primario por el cordón detonante rápidamente alcanza y detona el explosivo principal. En una carga normal, la onda de la detonación en el explosivo principal va hacia el revestimiento de la misma a una velocidad de unos 28700 ft/s y una presión cerca de $5 \cdot 10^6$ psi³².

Como se muestra en la figura 7, el revestimiento se colapsa empezando el ápice. Las partículas empiezan a converger a lo largo del eje axial del cono formando una lengüeta puntiaguda, en las altas velocidades del chorro. El disparo del chorro proveniente del cono de la carga y en contacto con el blanco inicial, puede tener presiones de hasta de $5.8 \cdot 10^6$ psi.

Las mayores velocidades son encontradas en la parte delantera del chorro estas partículas han sido originadas en el ápice del revestimiento. Las velocidades decrecen hacia la parte posterior del chorro, con las partículas más lentas originadas en la base del

³¹ Ibid.

³² BARAJAS, Gonzalo Efrén. LOZANO, Luis Gerardo. Op. Cit.

revestimiento. Este decrecimiento en la velocidad a lo largo del chorro es referido como el gradiente de velocidad y es el que causa el alargamiento del chorro a medida que éste viaja desde la carga. Este alargamiento es un factor importante en la penetración de blanco.

El chorro es seguido por la masa, la cual está viajando lentamente para hacer parte en el proceso de penetración. Ésta es formada por la superficie externa del cono (superficie cercana al explosivo), contrario al chorro, el cual es formado de la superficie interior del cono³³.

- **Penetración del blanco:** La penetración del blanco es llevada a cabo por el chorro de partículas metálicas que desplazan radialmente el material del blanco impactado, como se aprecia en la figura. Aunque el jet o carga tengan un diámetro muy pequeño, éste puede producir una perforación de diámetro relativamente grande. Por ejemplo, un chorro de 3 mm de diámetro puede producir un hueco de 13 mm de diámetro en el revestimiento del pozo. La inercia transmitida a las partículas del blanco por las del chorro, causa que éstas se desplacen lejos del chorro después de que él ha avanzado. Debido al esfuerzo compresivo del material que conforma el blanco, las partículas del mismo pronto retardarán y alcanzarán el reposo.

En la formación, el material inmediatamente en los alrededores de la perforación es triturado y compactado. Esta región es llamada zona triturada. Desde luego la zona triturada exhibe una permeabilidad reducida si se compara con la permeabilidad de la formación en la zona virgen, y puede tener un efecto significativo en la productividad del pozo. Así, una buena técnica de cañoneo demanda la selección de un proceso que altere la permeabilidad de la formación lo menos posible.

³³ Ibid.

La energía del chorro es rápidamente consumida y el proceso de penetración termina. La longitud y el diámetro de la perforación dependen del material del blanco y de la distribución de energía en el chorro³⁴.

- **Distribución de la energía cinética:** La distribución de la energía en el chorro es determinada por el diseño de la carga para una cantidad y tipo explosivo dado. Una carga perforadora tiene una cantidad de energía disponible para realizar el trabajo. El diseño de la carga determina que tanta energía es transferida al chorro y como esa energía es distribuida en él. Esto es de gran importancia en el cañoneo, pues la cantidad de energía cinética gastada por el chorro por unidad de longitud del blanco determina la geometría de la perforación. (diámetro del hueco y profundidad de la penetración).

Para penetración profunda, la energía cinética del chorro debe ser disipada sobre la longitud de la distancia relativa al blanco. Para grandes diámetros de perforación, la energía debe ser gastada sobre una distancia relativamente corta al blanco. Como la cantidad de energía disponible es constante, una selección debe ser hecha teniendo en cuenta lo siguiente cuando se esté diseñando la carga:

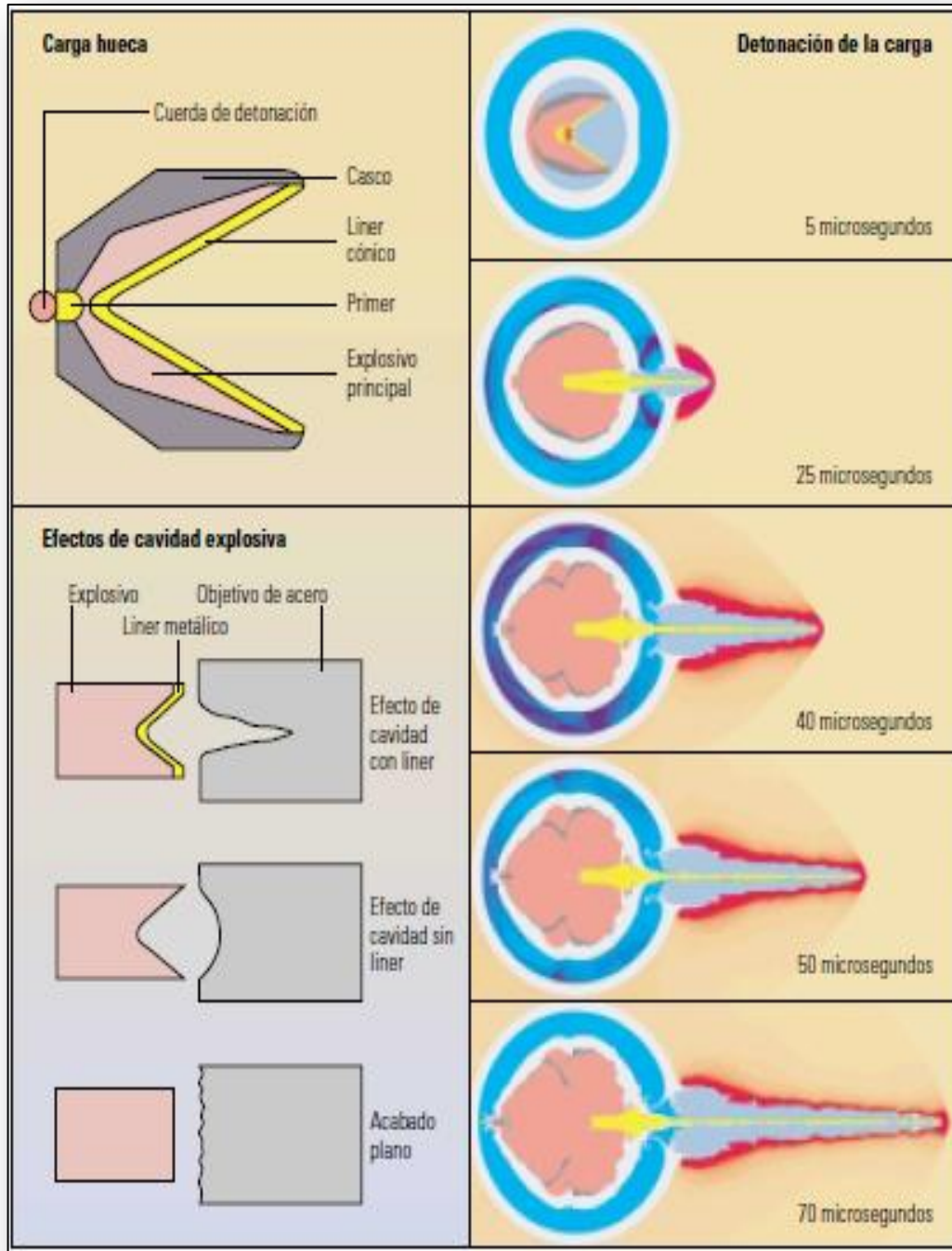
- Profundidad de penetración.
- Tamaño del diámetro de perforación.
- Penetración moderada y diámetro moderado de perforación.

La cantidad y distribución de energía cinética en el chorro depende de la velocidad, masa y gradiente de velocidad del mismo. A medida que la masa y la velocidad se incrementen, la energía es distribuida sobre una distancia mayor³⁵.

³⁴ Ibíd.

³⁵ Ibíd.

Figura 7. Cargas moldeadas



Fuente: Behrman, Larry. Brooks, James. Técnica de diseño de los disparos para optimizar la productividad. Oilfield Review, Verano 2000.

2.2. TÉCNICAS DE CAÑONEO

Existen dos técnicas básicas de cañoneo de pozos, basadas principalmente en el tipo de transportadores de carga y el área de aplicación, como lo son Wireline convencional o transportados por cable, que a su vez se subdivide en cañones bajados a través de la tubería de producción (Through-Tubing Gun) y cañones bajados a través del casing (Casing Gun) y Tubing Conveyed Perforating (TCP), cañones transportados con tubería.

Los componentes explosivos son montados en un portacargas, el cuál puede ser un tubo, una lámina ó un alambre. Los portacargas se clasifican en:

- Recuperables (no expuestas)
- Semi-desechables (expuestas)
- Desechables (expuestas)

Recuperables: En los sistemas recuperables (no expuestas), los residuos de los explosivos y lámina portadora son recuperados y prácticamente no queda basura en el pozo. En este sistema no están expuestos los explosivos a la presión y ambiente del pozo, lo cual lo hace más adecuado para ambientes hostiles.

Desechables: En los cañones desechables, los residuos de las cargas, cordón, estopín y el sistema portador (Lámina, alambre, uniones de cargas) se quedan dentro del pozo dejando una considerable cantidad de basura. Una ventaja es que al no estar contenidas las cargas dentro de un tubo, pueden ser de mayor tamaño con lo que se obtiene una mayor penetración. La principal desventaja es que los componentes explosivos están

expuestos a la presión y fluido del pozo, por lo que, normalmente, este sistema está limitado por estas condiciones.

Semi-desechable: Este sistema es similar al desechable con la ventaja de que la cantidad de residuos dejados en el pozo es menor, ya que se recupera el portacargas.

2.2.1. Técnica de Wireline Convencional

Este sistema de cañoneo se realiza utilizando una unidad de cable eléctrico, el equipo necesario para realizar el cañoneo se muestra en la figura 8, los portadores de carga jet son los dispositivos más usados. El cañoneo debe ser realizado en condiciones de sobrebalance (overbalance) hacia la formación, es decir, que la presión hidrostática necesaria del pozo es mayor o igual que la presión de formación, esto se hace con el fin de evitar el soplado de los cañones hacia arriba, altas presiones en el espacio anular y en la superficie.

El sistema de Disparo Bajado con Cable (Wireline) puede usarse antes de introducir la tubería de producción, o después de introducir la tubería de producción.

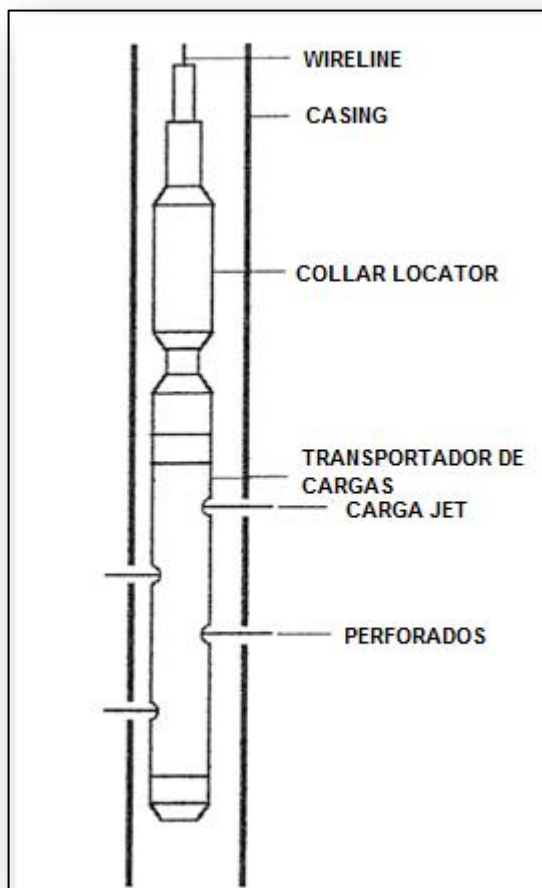
La ventaja de efectuar el disparo previo a la introducción del aparejo es que se pueden emplear cañones de diámetro más grande, generando un disparo más profundo³⁶.

Los cañones y transportadores de carga, son agrupados en dos categorías, basados principalmente en el área de aplicación: Casing Guns y Through-Tubing Guns. Los Casing Guns son usados para perforar revestimientos de grandes diámetros. Todos son recuperables, y algunos reusables. Los Through-Tubing Guns son usados para perforar

³⁶ DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Op. cit.

revestimientos que estén ubicados más abajo de la tubería de producción, el revestimiento contiene restricciones que podrían impedir el paso de los cañones de grandes diámetros, y la tubería de producción podría tener también curvaturas pronunciadas que obliguen al uso de cañones de pequeños diámetros y de mayor flexibilidad.

Figura 8. Técnica Wireline Convencional.



Fuente: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007.

- **Casing Guns:** Un Casing Gun está compuesto de un transportador con pared tubular gruesa, en la cual los explosivos son cargados y posicionados. Los extremos del transportador son sellados y así las cargas son protegidas de los fluidos y la presión del pozo. Las cargas son accionadas a través de los screwports y/o machined ports.

Los screwports son huecos que han sido perforados en la pared del transportador y los cuales son sellados por un fino tapón metálico ajustado mediante empaques. Los machined ports son pequeñas áreas que han sido maquinadas dentro de las paredes del transportador. Los screwports y los machined ports, Casing Guns son mostrados en la figura 11.

El rendimiento de la carga es mejorado mediante la reducción en la cantidad de metal en el tapón metálico o porta tapón. Además, las pequeñas limaduras producidas por el chorro en la parte externa del porta tapón es mínima debido a lo delgado del tapón. Con el machined port gun, los portadores están bastante separados de la parte externa de la superficie del cañón, así que las limaduras no se extienden más allá de la parte externa del contorno del cañón. El cañón puede ser recuperado después de cañonear y, si se usó porta tapones, éste puede ser cambiado cargando nuevos explosivos y se puede volver a utilizar.

El diámetro de los Casing Guns permite la flexibilidad en el tamaño de las cargas que pueden ser usadas. Desde luego, los factores de diseño tales como el diámetro del revestimiento, altura de cabeza, peso de explosivo y el stand-off o espacio libre entre el cañón y la pared del revestimiento, pueden ser ajustados para tener un rendimiento óptimo.

El desecho de la carga es retenido en el transportador y removido del pozo ya que se puede producir taponamiento de los choques, válvulas y líneas de flujo.

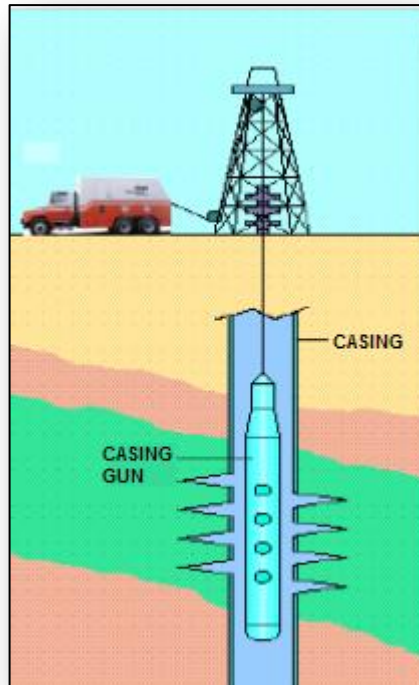
Desde luego las paredes de los transportadores absorben la mayor parte del choque originado por la detonación de la carga, el revestimiento y el cemento son protegidos. Los cañones se dilatan ligeramente debido a las presiones generadas durante la detonación de la carga: entonces los diámetros de los cañones reusables deben revisarse después de cada corrida para asegurar que estos no hayan excedido las tolerancias recomendadas. Si las tolerancias son excedidas el cañón es descartado.

Para suministrar un patrón efectivo de cañoneo, una gran variedad de Casing Guns están disponibles para una amplia gama de ángulos de fase y densidades de disparo. Los ángulos de fase más comunes en la industria son: 0°, 60°, 90°, 120°, y 180° grados respectivamente. Comúnmente el rango de densidad de disparo es de 16 tiros por pie.

Los Casing Guns están disponibles en secciones de diferentes longitudes, estas secciones pueden ser combinadas para cañonear grandes intervalos con una simple sección del cañón. La mayor limitación de los Casing Gun está relacionada al tamaño del cañón y su rigidez. Ellos son incapaces de atravesar pequeñas restricciones, revestimientos colapsados o de tuberías curvadas³⁷.

³⁷ RODRIGUEZ, Álirio Martin. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. Cit.

Figura 9. Completamiento con Casing Gun



Fuente: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007. Figura 9. Completación con Casing Gun

➤ **Ventajas del sistema Casing Gun.**

Las principales ventajas de este sistema son las siguientes:

- Opción para cargas de alta Penetración.
- Opción para cargas de gran diámetro de entrada.
- En caso de falla tiene pérdida de tiempo mínimo.
- Servicio más económico con respecto a TCP
- (cañones transportados por tuberías de producción).
- Operación rápida aumentando el rango de temperatura para las cargas usadas.
- Hasta 16 tiros por pie.

- Permite selección del tamaño del cañón compatible con diámetro de la tubería de revestimiento.
- Puede disparar en zonas de alta presión.
- Tiempo de operación de 4 a 8 horas.

➤ **Desventajas del sistema Casing Gun.**

Las principales limitaciones del método son:

- Daño severo por dispararse en condiciones de sobre-balance. Los Build ups (pruebas de restauración de presión) han indicado un factor de daño alto.
- Punto débil del cable eléctrico.
- Se dispara con pozo lleno de fluido de matado.
- Reducción de la permeabilidad en un 70 a 80%.
- Durante el trabajo se debe interrumpir las comunicaciones de radio, operaciones de suelda pues interfieren en el disparo³⁸.

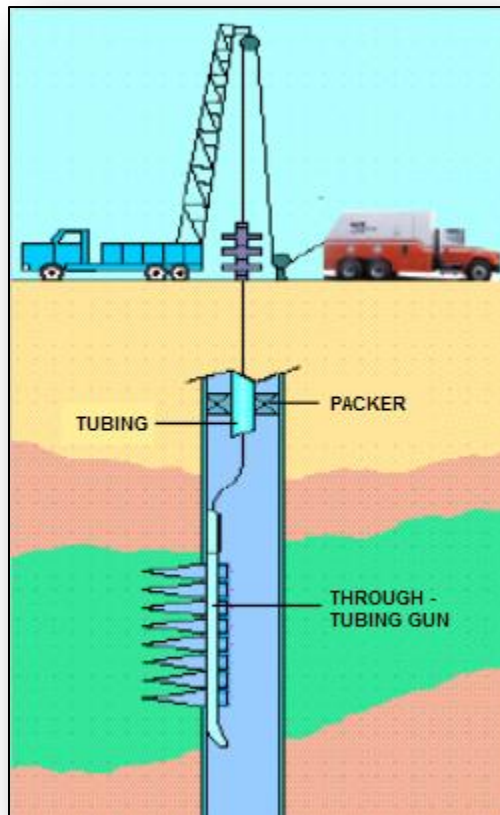
• **Through-tubing guns**

Los Through-Tubing Guns utilizan varios tipos de transportadores, unos de los cuales es el hollow-carrier through-tubing gun, mostrado en la figura 11. Esta herramienta tiene muchas ventajas tales como: protección de las cargas de los fluidos y presiones del pozo, absorción del choque producido por la detonación de la carga, y remoción de los desechos de las cargas del pozo. Sin embargo, debido a su tamaño pequeñas cargas deben ser utilizadas. Como consecuencia, los diámetros de entrada de los huecos y la profundidad de penetración se reducen respecto a las que se pueden lograr con Casing Guns.

³⁸ DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Op. cit.

Este tipo de cañón no es reusable, los ángulos de fase están limitados generalmente a 0° y 180° grados; su densidad de tiro oscila entre 1 y 6 disparos por pie. Ya que el cañón tiene diámetros muy pequeños, se puede utilizar para realizar corridas a través de pequeños diámetros y restricciones, además de suministrar la suficiente flexibilidad para pasar a través de tubería de producción curvada³⁹.

Figura 10: Completamiento con Through Tubing Gun



Fuente: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007.

³⁹ RODRIGUEZ, Álirio Martin. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. cit.

➤ **Ventajas del sistema Through tubing Gun**

Las principales ventajas de esta técnica son las siguientes:

- Los pozos pueden ser perforados con un pequeño bajo balance, lo cual permite que los fluidos de formación limpien las perforaciones efectuadas.
- Para el completamiento de una nueva zona o reacondicionamiento de una zona existente no se requiere el uso de taladro⁴⁰.

➤ **Desventajas del sistema Through tubing Gun**

La principal limitación de este método es:

- Debido a que el cañón es bajado a través del tubing, pequeñas cargas son utilizadas, obteniendo reducidas penetraciones, para lograr penetraciones mayores con este sistema, el cañón usualmente es posicionado contra el revestimiento para eliminar la pérdida de rendimiento cuando se perfora a través de líquido en el pozo. Este arreglo requiere una fase del cañón a 0 grados⁴¹.

Dentro de ésta técnica de cañoneo se encuentra los siguientes sistemas:

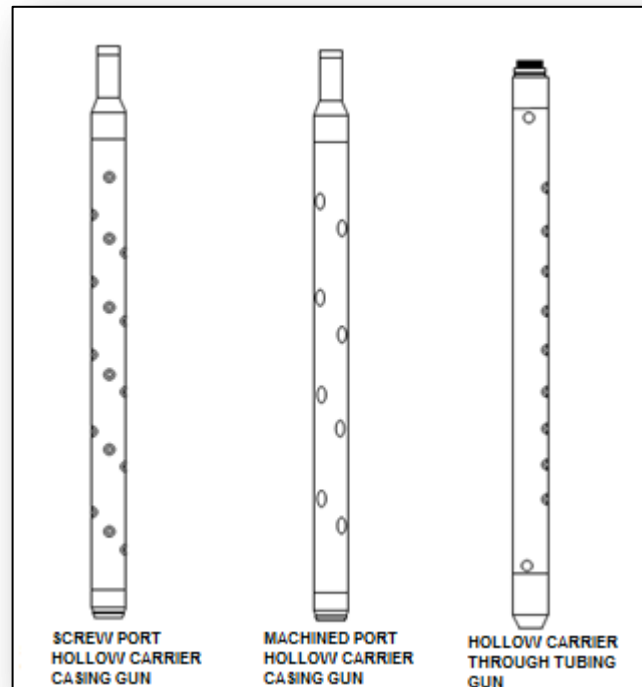
- ❖ **Strip carrier:** Este tipo de cañón consiste en una tira metálica en la cual los huecos han sido taladrados para colocar las cargas. Los transportadores son manufacturados en diferentes longitudes, pero pueden ser cortados o combinados para lograr la longitud que se desee.

El ángulo de fase para estos cañones es de 0° y 180° grados, y el rango de densidad de disparo es de 1 a 6 disparos por pie.

⁴⁰ DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Op. cit.

⁴¹ Ibid.

Figura 11. Hollow Carriers de Casing Gun y Through Tubing Gun



Fuente: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S. Figura 11. Hollow carriers de casing gun y through tubing gun

- ❖ **Wire carrier:** Este cañón está compuesto de varias piezas rígidas de formas ahormadas de un hilo metálico de gran diámetro, el cual está ensamblado como toda una unidad. El alambre metálico es colocado en largas secciones y se corta a la longitud que se requiere para un caso dado. Tanto los Strip como los Wire guns son muy livianos y de este modo pueden ser usados en extensas longitudes para cañonear largos intervalos en zonas múltiples.

La máxima longitud es determinada por la altura del equipo de superficie o por el equipo de control de presión en la cabeza del pozo. Además, tanto los Strips como los Wire se pueden utilizar grandes cargas⁴².

En estos casos se debe tener en cuenta el estado en que se encuentre el revestimiento, ya que éste absorbe el choque y la presión generada por la detonación de las cargas.

Como las cargas van a estar expuestas a los fluidos, temperatura y presión de pozo, deben escogerse cargas especiales clasificadas para resistir altas presiones y temperaturas⁴³.

- **Procedimiento con Wireline Convencional**

El cañoneo con cable eléctrico permite disparar utilizando una conexión eléctrica desde superficie por medio de un cable de acero (wireline).

- Los intervalos a ser disparados se eligen de registros eléctricos, luego que el pozo ha sido revestido o cuando se realiza el reacondicionamiento respectivo.
- El tipo de cañón y la densidad de disparo son establecidos por un programa de computación.
- La longitud real y la longitud efectiva (recorrido de los cañones), lo mismo que sus combinaciones, dependen del espesor y la distancia de los intervalos a ser perforados, lo más alejado del contacto Agua - Petróleo (WOC).
- Los disparos se efectúan luego de haberse ubicado a la profundidad correcta en base a un punto de referencia (profundidad total para señales en el cable) y después de haber correlacionado los registros del CCL con otros corridos⁴⁴.

⁴² RODRIGUEZ, Álirio Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. cit.

⁴³ *Ibid.*

⁴⁴ DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Op. cit.

- Se debe cañonear las zonas más profundas por problemas de atascamiento que pueden darse debido a la deformación que sufre la superficie de la tubería a la entrada de los orificios por la acción explosiva de la carga.
- Cuando las cargas no accionan por fallas imprevistas y no se cañonea los intervalos programados, los cañones son sacados, revisados, armados nuevamente y bajados con una posición que permite corregir la falla⁴⁵.

2.2.2. Cañones transportados con tubería (TCP)

Aunque varias opciones fueron realizadas para transportar los cañones de perforación dentro del pozo a través del tubing, esto no sucedió hasta el año de 1980 cuando el extenso uso de este servicio comenzó. En el sistema de Disparo Bajado con Tubería (TCP), el cañón es bajado al intervalo de interés con tubería de trabajo. A diferencia de las cañones bajados con cable, en este sistema sólo se utilizan portacargas entubados, además la operación de disparos puede ser efectuada en una sola corrida, lo cual favorece la técnica de disparos bajo balance.

El objetivo fundamental de este sistema es crear agujeros profundos y grandes favoreciendo la productividad del pozo. También este sistema es recomendado (si las condiciones mecánicas lo permiten) cuando se dispara en doble tubería de revestimiento, esto con la finalidad de generar una penetración adecuada del disparo.

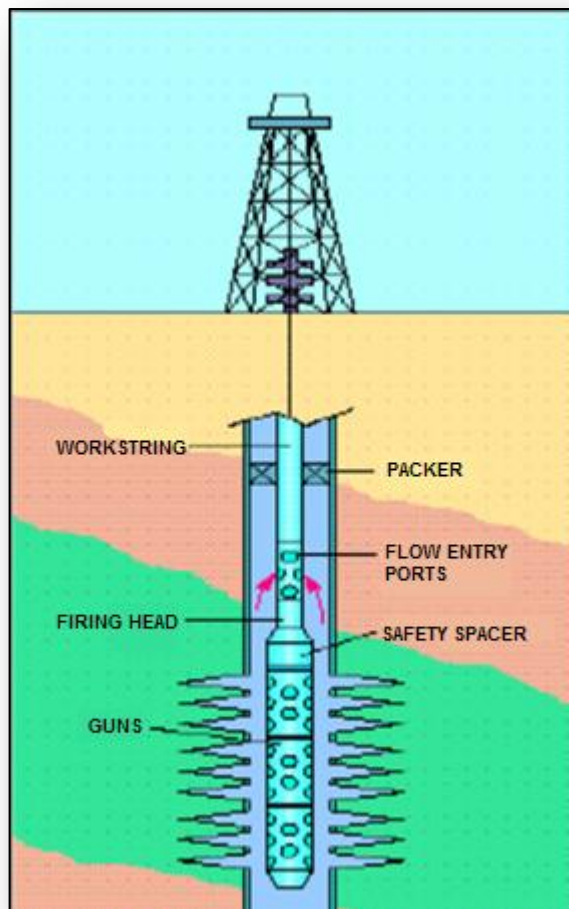
Se logran orificios limpios, profundos y simétricos, ya que permiten utilizar cañones de mayor diámetro, cargas de alta penetración, alta densidad de disparo, sin límites de

⁴⁵ Ibid.

longitud en los intervalos a cañonear en un mismo viaje, todo esto combinado con un diferencial óptimo a favor de la formación.

La mayor seguridad del pozo, cuando se emplea este método de cañoneo, se debe a que cuando se baja el cañón adaptado a la tubería también se usa el equipo de control de presiones en el cabezal del pozo. Este equipo está instalado todo el tiempo para lograr máxima seguridad.

Figura 12. Completamiento con TCP



Fuente: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007. Figura 12. Completación con TCP.

➤ **Ventajas del sistema de cañones transportados con tubería (TCP)**

Las principales ventajas de esta técnica son las siguientes:

- Técnica combinada (through tubing gun / casing gun) lo que garantiza el cañoneo del pozo en condiciones de bajo balance mediante el uso de cañones “tipo casing gun”.
- Brinda seguridad durante las operaciones por tener tubería en el pozo al igual que tener instalado el cabezal del pozo.
- Capacidad de cañonear 100% los intervalos propuestos en una sola corrida.
- El diseño permite cañonear los pozos, bien sea por taladro ó por plataforma. Pudiendo soltar los cañones, enviarlos al fondo del pozo y dejarlo listo para trabajos futuros through tubing.
- Cañones diseñados de acuerdo al diámetro interno del revestimiento con penetración de hasta 49” y con densidades de disparo de 4 a 27 tiros por pie.
- Permite el cañoneo de pozos altamente inclinados por ser transportados con tubería a la zona de interés.

➤ **Desventajas del sistema de cañones transportados con tubería (TCP)**

Las principales limitaciones del método son:

- Probabilidad de tener que controlar el pozo después de haber efectuado el cañoneo.
- Mayor tiempo de ejecución de la actividad de cañoneo en comparación con otras técnicas.

- Requiere de suficiente bolsillo (hueco de rata) para soltar los cañones al momento del disparo con el de reducir la posibilidad de atascamiento de la tubería al momento de sacarla del pozo⁴⁶.

2.2.3. NUEVAS TECNOLOGIAS

- **PURE (Perforating for Ultimate Reservoir Exploitation).**

Los científicos han analizado las presiones transitorias de operaciones de disparos mediante pruebas de laboratorio y descubrieron que el bajo-balance estático (desbalance) no solo garantiza la obtención de disparos limpios. Los resultados indicaron que lo que realmente rige la limpieza de los disparos son las fluctuaciones producidas en la presión del pozo inmediatamente después de la detonación de las cargas huecas antes ignoradas y no la diferencia de presión inicial como se pensaba anteriormente⁴⁷.

Los investigadores aplicaron este mayor conocimiento de las presiones dinámicas de pozo para desarrollar el proceso de Operaciones de Disparos para la Explotación Total del Yacimiento PURE (Perforating for Ultimate Reservoir Exploitation).

El sistema de perforación PURE de perforaciones limpias garantiza el apropiado grado de bajo-balance dinámico se puede lograr usando hardware y software especiales para la optimización de la producción, en diseños de trabajos de perforación específicos.

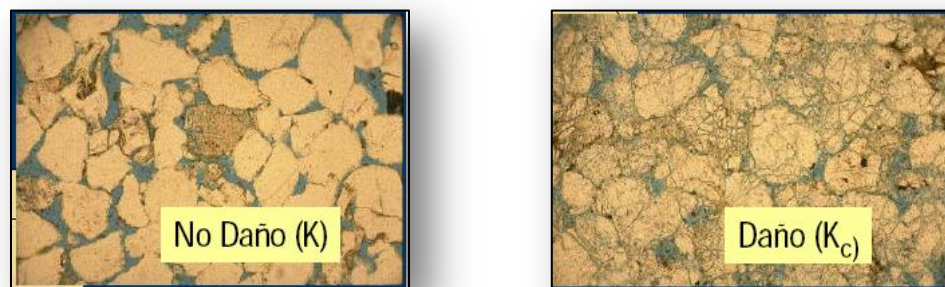
El sistema PURE de perforaciones limpias es mucho más efectivo que los métodos convencionales de perforación con bajo-balance, logrando perforaciones limpias, incrementado productividad e inyectividad en los pozos.

⁴⁶ Ibid.

⁴⁷ Behrman, Larry. Brooks, James. Técnica de diseño de los disparos para optimizar la productividad. Oilfield Review, Verano 2000; 27.

El sistema de perforación PURE optimiza el bajo-balance dinámico (el bajo-balance justo después de crearse las perforaciones). Con el sistema PURE la permeabilidad de la zona triturada comparada con la permeabilidad de la zona virgen (K_c/K) puede llegar a 1, en contraste con los rangos típicos de 0,05 a 0,3 obtenidos con métodos convencionales de perforaciones de bajo-balance.

Figura 13. Permeabilidad en zona virgen y zona triturada



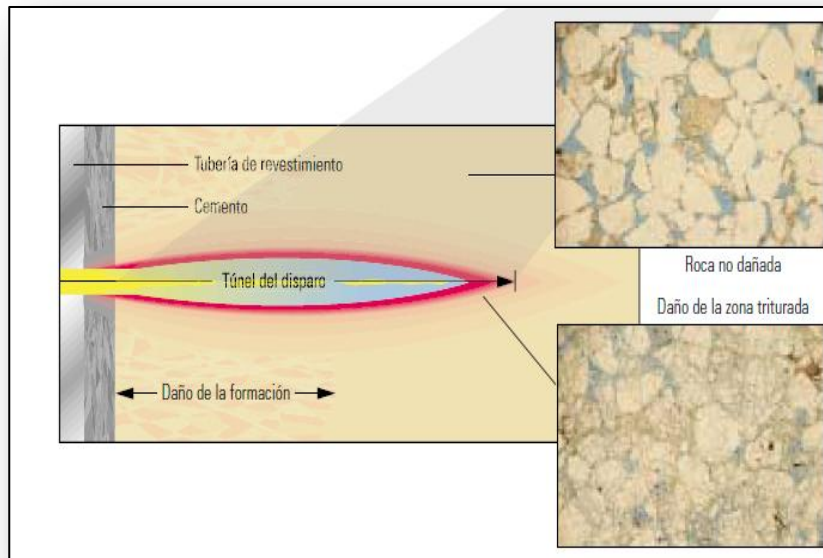
Fuente: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de politécnica. 2007.

El proceso PURE utiliza operaciones de disparos diseñadas a la medida de las necesidades, cargas huecas especiales y configuraciones de cañones diseñados con un fin específico, para generar un alto nivel de bajo-balance dinámico, partiendo de bajos-balances o sobre-balances de presión modestos. Esta técnica mejora sustancialmente la productividad o la inyectividad del pozo

La eliminación de grandes diferencias de presión estática, simplifica los preparativos realizados en el pozo antes de llevar a cabo las operaciones de disparos en condiciones de bajo-balance. El control de la oleada inicial limita los volúmenes de fluido producidos durante la limpieza de los disparos, lo que a la vez reduce el riesgo de influjo de arena

que puede provocar el atascamiento de los cañones. Además, es probable que no se requieran los pequeños trabajos de acidificación, o lavados de los disparos, que a menudo son necesarios para remediar el daño que estos producen⁴⁸.

Figura 14. La técnica PURE remueve el daño creado en la perforación.



Fuente: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007

Por otra parte, las operaciones de disparos con bajo-balance dinámico aumentan en número de disparos abiertos, lo que incrementa la efectividad de los tratamientos de acidificación y fracturamiento hidráulico más extensos. Una mayor densidad de disparos, o cantidad de disparos por pie (TPP), también optimiza las operaciones de bombeo porque reduce los requerimientos en términos de potencia hidráulica en superficie. Otro beneficio es la reducción de la intensidad de las vibraciones producidas por los disparos,

⁴⁸ DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Op. cit.

lo que minimiza el deterioro de la adherencia hidráulica entre el cemento y la formación, y ayuda a garantizar el aislamiento por zonas después de los disparos.

Ahora, la limpieza del daño de los disparos parece estar directamente relacionada tanto un bajo-balance dinámico como con la velocidad de la oleada inicial instantánea, no con la presión estática inicial del pozo, ya sea en condiciones de bajo-balance, balance o sobre-balance de presión. Este concepto ayuda a explicar los pobres resultados ocasionados de las operaciones de disparos con bajo-balance de presión y los buenos resultados inesperados de las operaciones de disparos en condiciones de balance y sobre-balance de presión.

En esto último se debe tener cuidado ya que si bien es cierto que se puede realizar PURE con TCP o Wireline, al realizarlo con TCP podemos controlar que el fluido de matado ingrese al yacimiento a través de las perforaciones apenas abiertas al momento del disparo evitando un daño posterior por invasión de fluidos extraños al yacimiento. Para realizar PURE y luego evitar por completo la entrada de fluidos extraños al yacimiento se puede disparar usando una herramienta llamada MAXR que es un ancla usada para colgar los cañones en el casing y luego bajar realizar el completamiento total, luego disparar los cañones, el ancla se suelta al fondo del pozo y el pozo se pone en producción.

➤ **Ventajas del Sistema PURE**

- Induce un bajo-balance dinámico en los primeros 100 milisegundos después del disparo.
- Permite control independiente de la dinámica post-disparo (Flujo por unos segundos después del disparo).

- No requiere un bajo-balance inicial (estático) alto. Pero es deseable tener bajo-balance estático para evitar luego la invasión de fluidos al yacimiento.
- Puede ser sobre-balance cuando dispara TCP debajo de un empacador.
- Reduce presión dinámica en el pozo: reduce la onda de choque en el pozo.
- Se puede usar con Wireline, TCP, Coiled Tubing, Slickline.
- Aumenta la productividad o inyectividad: maximiza la limpieza de las perforaciones.
- Es efectivo para todos los intervalos perforados: Limpia un amplio rango de permeabilidades en un intervalo y aumenta la efectividad de la densidad de disparos
- Reduce la carga de presión en los equipos.
- Reduce los requisitos de bajo-balance inicial, ahorrando costos de N₂, fluidos, etc.
- Minimiza la tendencia al arenamiento controlando la dinámica post-disparo
- Puede eliminar la necesidad de perforación ácida (wash clean-up) en formaciones de baja permeabilidad
- Provee alternativas entre profundidad de penetración, densidad de disparo, y daño del disparo (un sistema solución versus datos API solamente): La productividad o inyectividad del pozo es el objetivo principal en el diseño del programa de disparos.

Selección de Candidatos para la aplicación de la técnica PURE

Todos los pozos, tanto productores como inyectores, deberían ser considerados potenciales candidatos para la aplicación de la técnica PURE. La evaluación del tipo de roca, tipos de fluidos, porosidad y permeabilidad de la formación, y la ejecución de simulaciones utilizando el programa de computación SPAN, ayudan a determinar si la

técnica PURE resultaría útil a un pozo. En la mayoría de las áreas, el completamiento de pozos nuevos y existentes se beneficiará con la aplicación de operaciones de disparo con bajo-balance dinámico PURE.

La mayoría de los pozos de inyección son excelentes candidatos para la aplicación de la técnica PURE, porque los túneles dejados por los disparos limpios son esenciales para lograr una inyectividad óptima. El logro de un bajo-balance dinámico adecuado asegura la presencia de suficiente oleada inicial para eliminar el material suelto de los túneles de los disparos antes de comenzar la inyección. Además, impide que los detritos y las partículas finas de la formación sean inyectadas y obturen las gargantas de los poros de la formación.

La técnica PURE ha resultado particularmente efectiva en formaciones de baja permeabilidad que requieren un bajo-balance de presión extremadamente alto para la limpieza de los disparos. Tales diferencias de presión suelen ser difíciles de lograr durante las operaciones de disparos convencionales en condiciones de bajo-balance estático.

En pozos horizontales o desviados, suele ser difícil desplazar los fluidos de perforación o completamiento para obtener un bajo-balance estático requerido. Las operaciones de disparos con un bajo-balance dinámico ayudan a evitar el desplazamiento costoso e inconveniente de los fluidos de pozo con un líquido más liviano o un gas inerte para lograr un bajo-balance de presión requerido. Las operaciones de disparos con sobre-balance de presión estático convencionales, con fluidos potencialmente dañinos en un pozo, pueden causar daños que solo serán eliminados con tratamientos ácidos en la zona vecina al pozo. Usando TCP se puede obtener cualquier nivel de bajo-balance⁴⁹.

⁴⁹ Ibid.

- **Técnica de cañoneo con Coiled Tubing o Tubería Flexible.**

El proceso de cañoneo se emplea a condiciones de bajo balance, comúnmente no se los emplea, porque el diámetro de sus cañones es menor con respecto a otros sistemas, disminuyendo la profundidad de penetración en algunos casos, los cañones más utilizados por esta técnica son los de tipo Through Tubing.

Anteriormente se consideraba un dispositivo de alto riesgo y aplicable exclusivamente en trabajos especiales, por el contrario en la actualidad se ha transformado en una herramienta vital para operaciones con reacondicionamiento con tratamiento químico.

La tubería se halla formada por secciones de acero, para facilitar su transporte y almacenamiento se enrolla en un carrete su longitud es de alrededor 31000 pies o superior dependiendo del carrete y los diámetros fluctúan entre 1 y 4 ¹/₂ de pulgada.

- **Técnica de cañoneo con Slickline.**

Es una técnica similar al sistema de cañoneo con cable eléctrico o Wireline, pero con diámetros de cable menor en comparación al anteriormente mencionado. Una cualidad es poseer diversos diámetros utilizando según sea requerido.

El procedimiento a seguir en operaciones con Slickline es análogo al método empleado con la técnica de cable eléctrico o Wireline, se recomiendan intervalos de interés cortos.

No se aconseja utilizar en pozos desviados u horizontales debido a que estos presentan ángulos de inclinación que podrían derivar en inconvenientes generando perdidas en el tiempo de duración de la operación.⁵⁰

⁵⁰ BENAVIDES, Carlos. Estudio técnico económico de la utilización de los diferentes sistemas de cañoneo a las arenas U y T en el área cuyabeno. Quito, Escuela Politécnica Nacional. 2012.

Sistemas de cañoneo.

- **Through - Tubing:** son sistemas que atraviesan el tubing y pueden ser utilizados con presión underbalance.
- **Casing Guns:** se utilizan cañones en el casing conteniendo cargas muy grandes que usualmente se disparan en pozos con presión overbalance.
- **High Shot Density:** emplea cañones grandes con una mayor densidad de disparos por pie.

Otra clasificación de los sistemas de cañoneo es:

- **Capsule Charge:**
 - Enerjet (1 11/16", 2 – 1/8", & 2 1/2")
 - Pivot Gun (1 11/16")
 - PowerSpiral (1 – 11/16", 2 – 1/8" & 2 1/2")
- **Hollow Carrier:**
 - HEGS (3 1/8" & 4")
 - Port Plug Guns (3 3/8" 6 4")
 - Frac Guns
 - High Shot Density (1.56" a 7")
 - High Shot Density Liquid (2.88", 3.5", 4 1/2 ")
 - PerfoXpress (2.88", 3.5 ", & 4 1/2 ")
 - PURE (2" A 7")
 - OrientXACT (3 3/8" & 4 1/2 ")

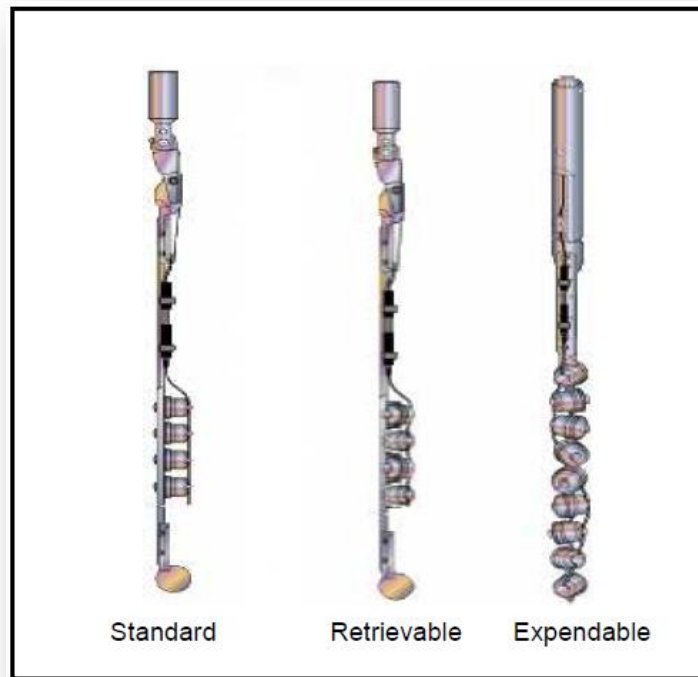
Especificaciones de los sistemas de Cañones empleados

- **Enerjet**

El Enerjet Gun es un sistema de cañón que atraviesa el tubing y viene en tamaños de 1.63", 1 – 11/16", 2 – 1/8 " y 2 – 1/2". El Enerjet Standard está disponible con una densidad de tiros por pie de 4 y 6 spf (shots per foot) y una desfase del cañón de 0°, tienen una capacidad de penetración entre 10" & 27.52", el diámetro del hueco varía entre 0.3" & 0.57" y el diámetro del cañón es de 2.125".

Pueden ser utilizadas en ambientes oxidantes con precauciones especiales. Esta herramienta puede ser transportada dentro del pozo con wireline o Slickline.

Figura 15. Enerjet

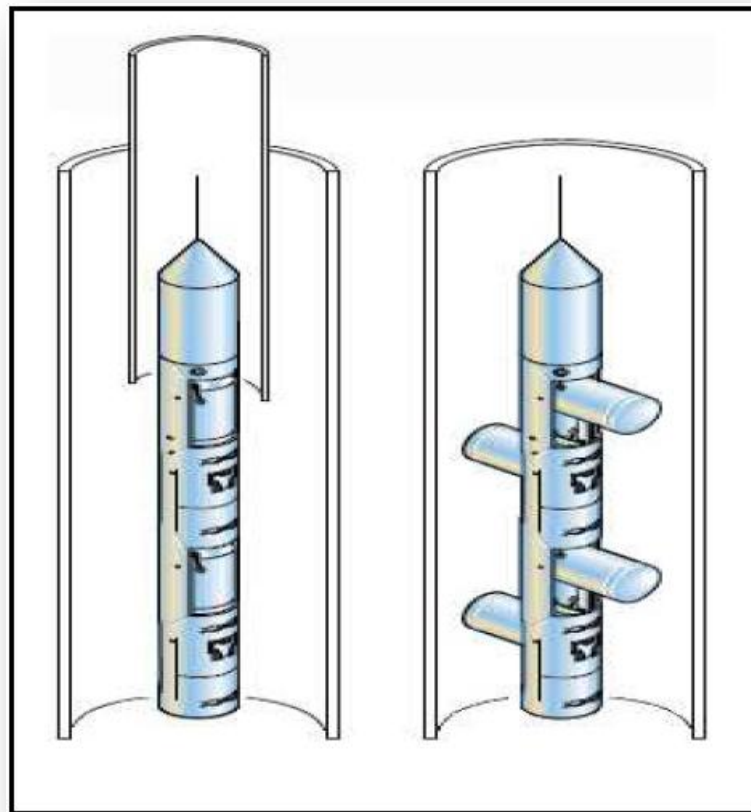


Fuente: Behrmann Larry & Brooks James; "Técnicas de Diseño de los disparos para optimizar la Productividad"; Schlumberger, 2001.

- **PIVOT Guns**

La herramienta PIVOT Gun es un sistema Through – Tubing el cual tiene un comportamiento de la carga comparable con un Casing Gun, este puede atravesar restricciones tan pequeñas como de un 1.78". Tiene una densidad de 4 spf (tiros por pie), su longitud de penetración varía entre 27.78" & 28.4", el diámetro del hueco en la entrada es de 0.35" y 0.38", y el diámetro del cañón es de 0.08". Esta herramienta es bajada dentro del pozo con wireline.

Figura 16. PIVOT Guns

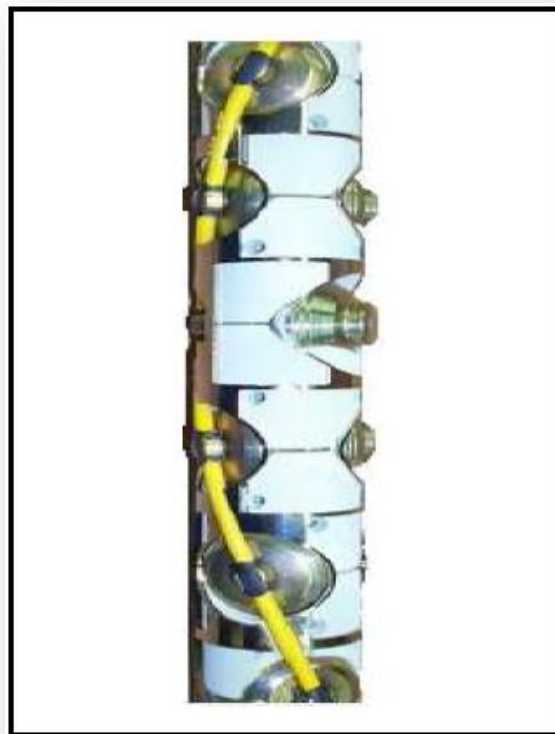


Fuente: Behrmann Larry & Broks James; "Técnicas de Diseño de los disparos para optimizar la Productividad"; Schlumberger, 2001.

- **Power Spiral**

El sistema PowerSpiral Retrievable Enerjet es diseñado para operaciones de cañoneo con wireline a través del tubing. Este material atenúa el choque de las ondas durante la detonación, lo cual reduce la interferencia carga a carga y minimiza el choque de las ondas en el wellbore. Es de gran importancia debido a que incrementa el comportamiento de las cargas a través del wellbore, 16 Tiene una densidad de tiro por pie de 6 y 7.5 spf (tiros por pie), su longitud de penetración de 19.5" & 27.2", el diámetro del hueco en la entrada es de 0.22" & 0.32" y el diámetro del cañón varía entre 1.6825" & 2.125". Se puede bajar dentro del pozo por medio de Slickline o Wireline.

Figura 17. PowerSpiral

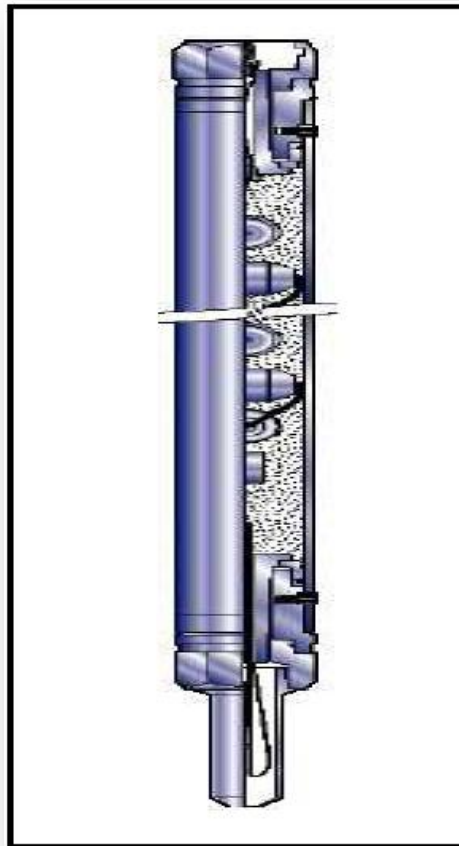


Fuente: Behrmann Larry & Broks James; "Técnicas de Diseño de los disparos para optimizar la Productividad"; Schlumberger, 2001.

- **High Efficiency Guns (HEGS)**

Esta herramienta puede ser utilizada en cualquier tipo de fluido (líquido o gas) y se aplica a bajas presiones y temperaturas de 4000 psi y 210 °F respectivamente. Se puede graduar la dirección de la bala entre 60°, 90° y 120°. Tiene una densidad de disparo de 4 y 6 spf (tiros por pie), su longitud de penetración varía entre 6.5" y 21.67", el diámetro del hueco a la entrada varía entre 0.41" y 0.69", y el diámetro del cañón varía entre 3.125" y 4". La herramienta puede ser bajada en el pozo por medio de wireline.

Figura 18. High Efficiency Guns (HEGS)

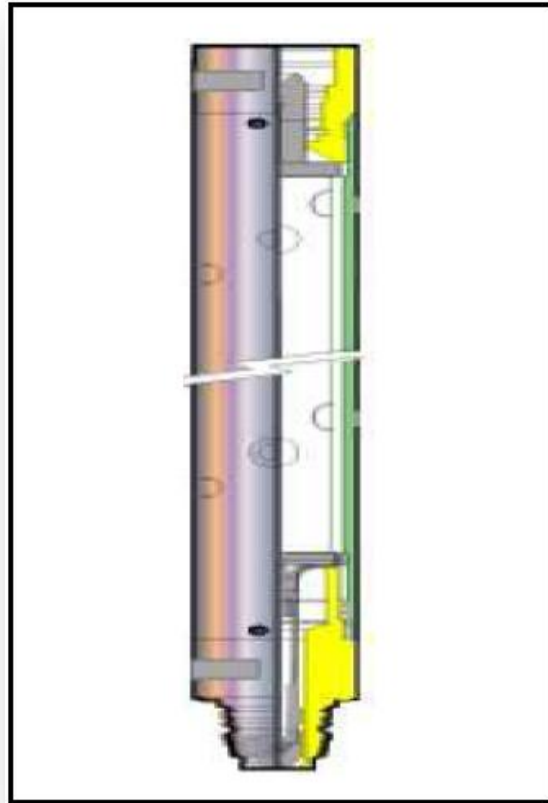


Fuente: Behrmann Larry & Broks James; "Técnicas de Diseño de los disparos para optimizar la Productividad"; Schlumberger, 2001.

- **High Shot Density (HSD)**

Esta herramienta tiene altas densidades de disparo que varían entre 4 spf (tiros por pie) a 7 spf (tiros por pie), se aplica a pozos con altas presiones y altas temperaturas, el cañón tiene un diámetro de 1.56" y 7". La herramienta puede ser bajada en el pozo por medio de wireline, coiled tubing, slickline y TCP.

Figura 19. High Shot Density

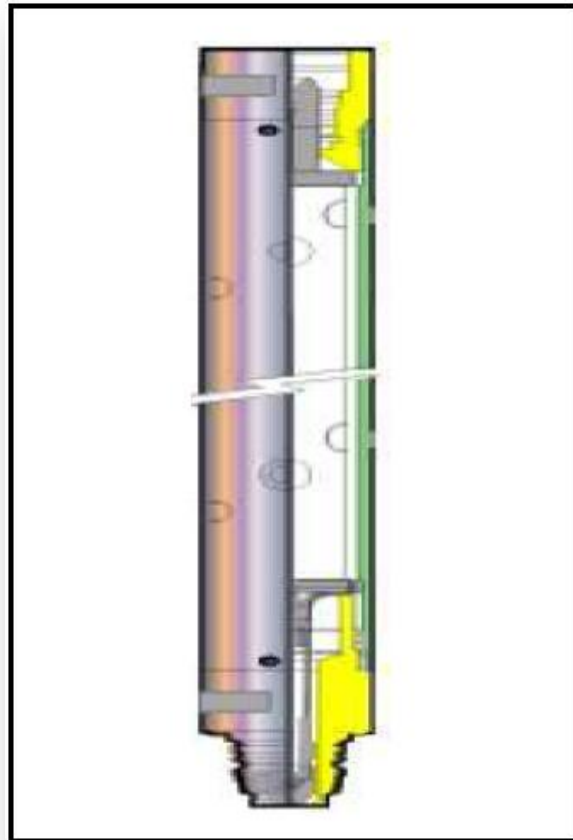


Fuente: Behrmann Larry & Broks James; "Técnicas de Diseño de los disparos para optimizar la Productividad"; Schlumberger, 2001.

- **PURE Guns**

Tiene altas densidades de disparo de 4, 5, 6, y 12 spf (tiros por pie), se aplica a pozos con altas temperaturas y presiones, el diámetro del cañón varía entre 2" a 7", tiene cargas con gran penetración. Se puede bajar dentro del pozo por medio de wireline, coiled tubing, slickline, y TCP.

Figura 20. PURE Guns

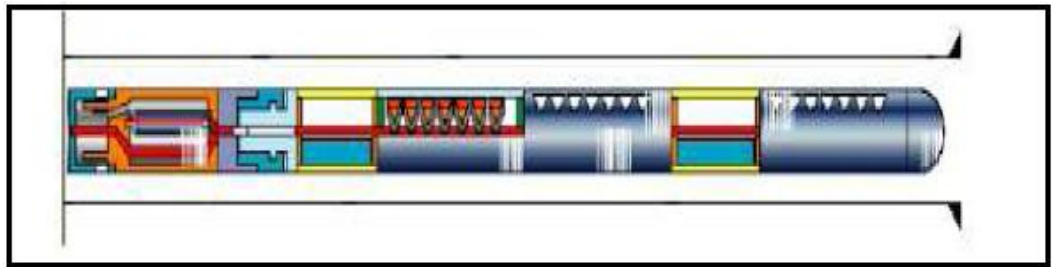


Fuente: Behrmann Larry & Broks James; "Técnicas de Diseño de los disparos para optimizar la Productividad"; Schlumberger, 2001.

- **OrientXACT Guns**

Se utiliza en pozos desviados o horizontales, se transporta a través del pozos por medio de TCP, con densidades de disparo entre 4 y 5 spf (tiros por pie), alta penetración de las cargas.⁵¹

Figura 21. OrientXACT Guns



Fuente: Behrmann Larry & Broks James; “Técnicas de Diseño de los disparos para optimizar la Productividad”; Schlumberger, 2001.

⁵¹ DE LA HOZ, Maty María y ORTIZ, Diana. Metodología para la selección, diseño y ejecución del cañoneo y recañoneo de pozos de bajo potencial aplicación al campo Colorado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. 2009.

3. PRESION DIFERENCIAL

En el capítulo anterior se estudiaron las técnicas de cañoneo que se han implementado a través del tiempo, en este capítulo se evaluarán las técnicas de cañoneo que han sido aplicadas de acuerdo al método de desarrollo o condiciones de presión en las que se debe encontrar el pozo, ya sean de Sobre-Balance, Bajo-Balance (Bajo-Balance Estático, Bajo-Balance Dinámico), Sobre-Balance extremo.

- **Condiciones de presión del pozo.**

Un factor muy importante que afecta significativamente la relación de productividad es la presión diferencial; La presión diferencial, es la presión del pozo menos la presión de la formación. Si las dos presiones son iguales, la presión diferencial es cero y las condiciones de perforación estarán balanceadas. Cuando la presión del pozo excede la presión de formación, la presión diferencial es positiva y las condiciones estarán sobre balanceadas y de lo contrario las condiciones son de desbalance.

Desde el punto de vista de la productividad final del pozo y limpieza de las perforaciones el mejor método para cañonear es hacerlo con una presión a favor de la formación (Desbalance). Sin embargo, muchos factores externos influyen en la selección del método de cañoneo⁵².

- **Factores que influyen en la selección del método de cañoneo.**

- Conocimiento de las presiones de la zona y rangos esperados.
- Facilidades de instalación del equipo de control de presión de cabeza de pozo.
- Tamaño del revestimiento o tubería y del cañón a utilizar.

⁵² Ibid.

- Costos de operación.
- Entrenamiento del personal en la relación de la operación.

3.1. DIFERENCIAL DE PRESIÓN POSITIVA (OVERBALANCE)

El diferencial de presión se define como la diferencia de la presión que ejerce la columna hidrostática a la profundidad de la arena cañoneada; menos la presión de formación de esa arena. En operaciones de cañoneo, la columna puede ser: lodo, salmuera, diesel o fluidos especiales. Cuando la presión de la columna es mayor que la presión de la formación se obtiene un diferencial de presión positivo (Sobre Balance). Cuando se cañonea con un diferencial de presión positiva y con una columna de lodo, usualmente se producen taponamientos de algunas de las perforaciones. Esto se debe a que el lodo es fundamentalmente un fluido de control de perforación y, por lo tanto, causa obstrucción del flujo.

Generalmente, el daño causado por el lodo es parcialmente irreversible. Es decir, aún cuando se realizan operaciones para reducir la columna hidrostática (suabeo), es prácticamente, imposible obtener una limpieza completa de las perforaciones.

Los taponamientos de las perforaciones contribuyen a los siguientes problemas:

- La productividad del pozo es apreciablemente reducida.
- Dependiendo del tipo de empuje del yacimiento y de más trabajos de completamiento, el recobro de aceite o gas puede reducirse considerablemente.
- La eficiencia de barrido por agua u otros métodos de recobro pueden ser reducidas apreciablemente.

- La probabilidad de que el agua o el gas se conifiquen o se canalicen se incrementa si un alto porcentaje de las perforaciones están taponadas.
- Problemas de arenamiento en el pozo resultan de la creación de altas ratas de flujo a través de pocas perforaciones si el resto están taponadas.
- La efectividad de la cementación forzada, del empaquetamiento con grava, y la consolidación de arenas puede ser bastante reducidas y problemáticas.
- Pozos exploratorios pueden ser abandonados como resultado de indicaciones erróneas de las pruebas iniciales de presión y productividad del yacimiento.

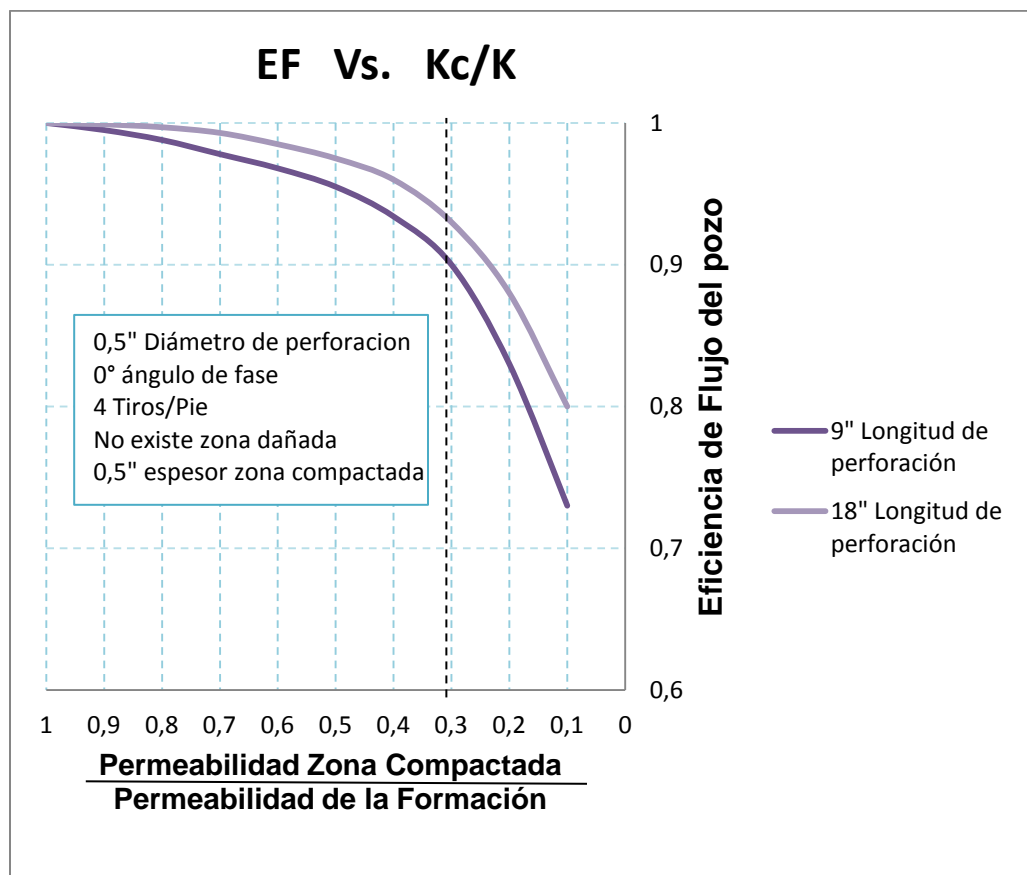
En condiciones de sobrebalance la remoción de la zona compactada y de otros desechos dejados al cañonear, se logra mediante operaciones de lavado o acidificación de las perforaciones; No obstante una limpieza más efectiva de las perforaciones se logra utilizando una presión diferencial negativa (Desbalanceada). Sin embargo no siempre en el campo se presenta en un momento dado una situación técnico-económica para la aplicación de esta última técnica⁵³.

El hecho de que la técnica de sobrebalance no logre una limpieza de las perforaciones tan óptima como la otra técnica, no implica que no sea efectiva, ya que como se observa en las figuras 22 y 23 si se logra obtener una relación de K_c/K_u con valores mayores de 0.3 para determinadas características y longitudes de perforación como es el caso de la figura 22. La eficiencia de flujo es ligeramente menor a la obtenida con la otra técnica; lo mismo si se analiza la figura 23, para valores de K_c/K_u mayores de 0.3 con características y ángulos de fase determinados se observa que a pesar de obtener una relación de productividad menor, este valor es aproximadamente al obtenido con el desbalance.

⁵³ RODRIGUEZ, Álirio Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. cit.

Para lograr que los valores de K_c/K_u sean mayores de 0.3, se deben utilizar fluidos de completamiento libres de sólidos, tanques de almacenamiento limpios y tuberías limpias. Es fundamental también que las perforaciones permanezcan expuestas al fluido de completamiento el menor tiempo posible, ya que la dureza de la zona compactada y los desechos aumentan con el tiempo de exposición al fluido. Por lo tanto, el proceso debe ser cuidadosamente planeado y monitoreado⁵⁴.

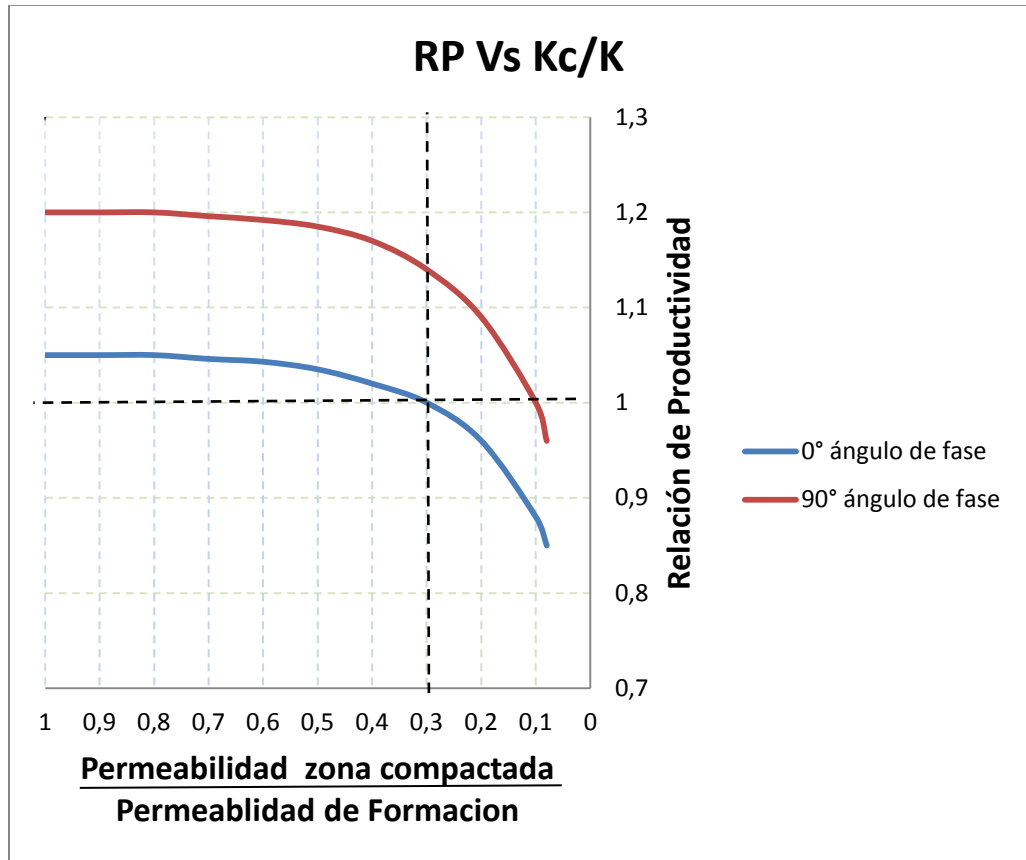
Figura 22. Eficiencia de flujo del pozo Vs K_c/K_u para diferentes longitudes de penetración.



Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S.

⁵⁴ Ibid.

Figura 23. Relación de productividad Vs K_c/K_u para diferentes ángulos de fase.



Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S.

3.2. DIFERENCIAL DE PRESIÓN NEGATIVA (UNDERBALANCE)

Cuando la presión de la columna hidrostática a la profundidad de la arena cañoneada es menor que la presión de la formación, se obtiene un diferencial negativa (Bajo balance). El cañoneo óptimo se obtiene con un diferencial de presión negativa y con fluidos libres de sólidos y limpios. Es muy importante tomar las precauciones de seguridad necesarias, cuando se cañonea con un diferencial de presión negativa ya que las altas presiones de la formación se manifiestan muy rápidamente en la superficie. Por lo tanto, es necesario controlar el pozo de una manera segura.

Los estudios han demostrado que el flujo radial inmediatamente posterior al disparo (laminar o turbulento) limpian los túneles de los disparos, un flujo inicial erosiona las zonas trituradas y arrastra los detritos resultantes. El flujo instantáneo minimiza la invasión del fluido proveniente del pozo, afloja la roca dañada y barre los detritos de la roca que se encuentran en los túneles de los disparos; al brote de alta velocidad le sigue un flujo pseudo-estable, que resulta menos efectivo porque las tasas y las fuerzas de arrastre asociadas son menores que las generadas durante la oleada transitoria inicial. El volumen del fluido y el flujo que le sucede más adelante se consideran secundarios.

La remoción del material triturado en la zona compactada y otros desechos que quedan después de cañonear, facilitaran el paso de los fluidos a través de las perforaciones. Para lograrlo, una presión diferencial de desbalance (Negativa) es el factor importante para llevar a cabo esta limpieza.

Con este método de cañoneo se obtienen los mayores índices de flujo ya que los daños o taponamientos que sufren las perforaciones y la formación por parte del fluido dentro del pozo son mínimos debido a que tan pronto se cañonea, la formación fluye a través de ellas evitando la invasión del fluido del pozo.

3.2.1. Criterios de desbalance

La mayor incertidumbre en el cañoneo con desbalance, ha sido que magnitud se debe usar. La presión de desbalance es necesaria para maximizar la limpieza de la perforación, pero un excesivo desbalance causaría un colapso en el revestimiento, disgregación en la formación, o un daño en la permeabilidad debido al movimiento de finos.

Se han desarrollado diferentes métodos prácticos para solucionar este problema por medio de pruebas de campo controlado o de laboratorio, realizadas mediante cañoneo con desbalance en formaciones de arena.

- **Observaciones de campo realizadas por King Anderson**

En un estudio realizado por Amoco en 1985 se evaluaron 90 pozos que fueron acidificados después de ser perforados con cañones bajados con la tubería de producción en condiciones de desbalance y se estableció una correlación entre la productividad y la permeabilidad para fijar criterios mínimos de desbalance.

Los resultados mostraron una relación entre la permeabilidad y la presión de desbalance, la figura 24 en donde la línea continua representa el desbalance mínimo para limpiar las perforaciones.

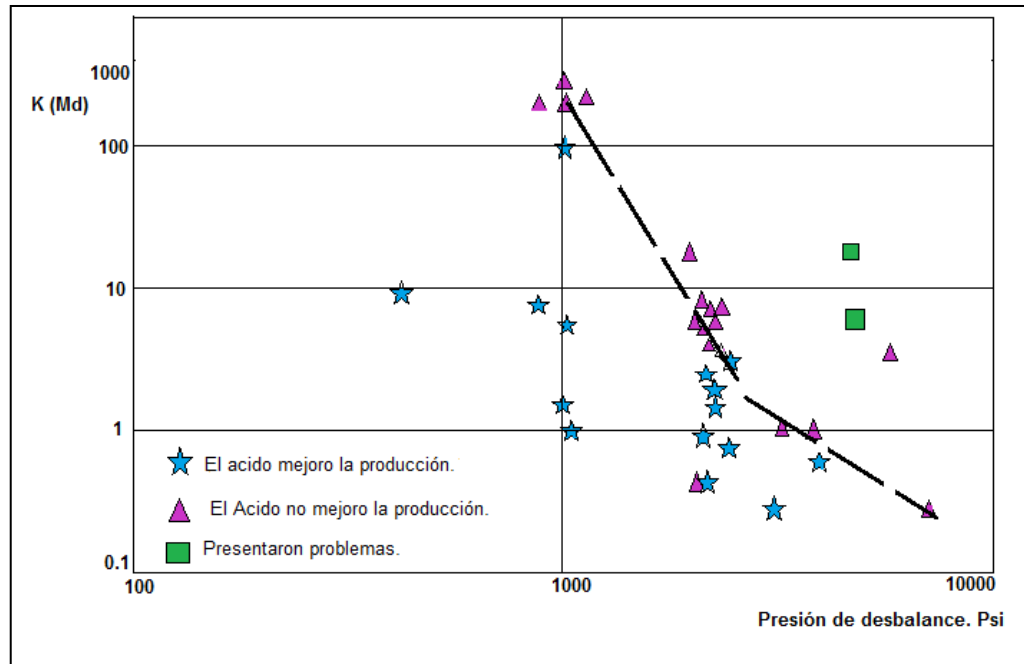
En este estudio no se tuvieron en cuenta las formaciones de caliza ni de dolomita, ya que su comportamiento estaría influenciado por el tratamiento con ácido que se llevo a cabo para realizar las pruebas. En todos y cada uno de los pozos se realizó un ensayo de flujo, se extrajo el ensamblaje de los pozos y se llevó a cabo el tratamiento con ácidos: Si después del tratamiento el pozo aumentaba su producción en más del 10%, era evidente que no se utilizó un desbalance como para superar el daño totalmente. En las gráficas se señalan con una (x) estos pozos, y con una triangulo los pozos cuya presión diferencial de desbalance supero el daño de formación. Este estudio fue la fuente principal de datos de campo para correlacionar el desbalance con la permeabilidad del yacimiento y el rendimiento de los disparos.

A partir de estos datos, en 1989 se calcularon las presiones de desbalance mínimas y máximas basadas en la producción potencial de arena a partir de las velocidades sónicas para los pozos de gas. El estudio original de Amoco se volvió a analizar junto con los nuevos datos. A los efectos de considerar la permeabilidad, la viscosidad y la densidad del fluido, las ecuaciones de desbalance mínimo se basaban en la velocidad del fluido y en el flujo turbulento a través de los disparos. La desventaja era que el modelo requería conocer el espesor de la zona dañada, el diámetro el túnel en la roca y la viscosidad del fluido, los resultados de las pruebas recientemente no demuestran que el desbalance depende de la viscosidad del fluido.

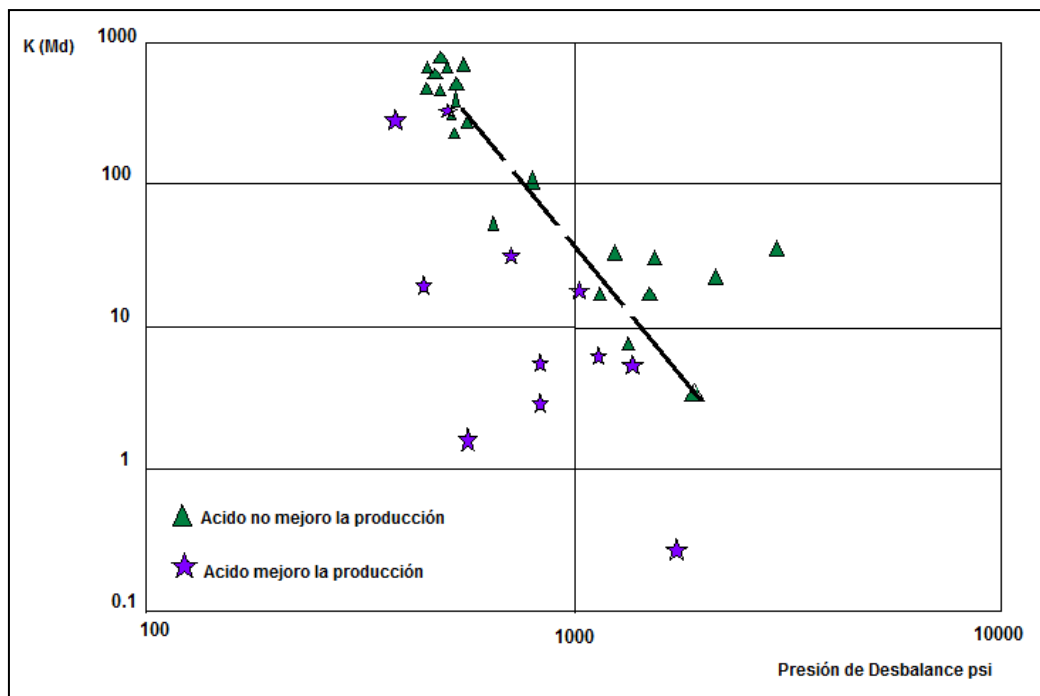
Estos modelos implican que el flujo después de un brote temprano y transitorio, incluyendo el flujo en un estado pseudo-estable o los pozos fluyentes después de los disparos, es menos importante con respecto a la limpieza del túnel. Sin embargo, el flujo posterior al disparo puede transportar algunos finos hacia el pozo y limpiar mejor los disparos. Se cree que la magnitud y duración de la oleada inicial de presión determina la limpieza del daño de la zona triturada⁵⁵.

⁵⁵ Ibid.

Figura 24. Presión de desbalance para areniscas gasíferas y areniscas petrolíferas.



Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S.



Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S.

- **Estudios realizados por Behrmann**

Behrmann en 1995 publico su trabajo de investigación referido a los factores que pueden afectar la productividad de un pozo cuando se usa la técnica de cañoneo bajo balance.

El trabajo de Behrmann estaba enfocado en la determinación del diferencial de presión mínimo de bajo balance para obtener una perforación limpia, además provee ecuaciones para calcular el daño por cañoneo esperado cuando es usado un mínimo diferencial de presión bajo balance.

Basado en los experimentos de flujo por disparo de cañón. Behrmann suministra un entendimiento básico del daño por cañoneo y el diferencial de presión mínimo requerido⁵⁶.

Pruebas de laboratorio de un solo disparo se desarrollaron para cuantificar la presión necesaria para producir disparos limpios y reducir el daño de la permeabilidad. Se determinó que Inmediatamente después de disparar en condiciones de desbalance se produce una descompresión instantánea de los fluidos del yacimiento alrededor del disparo. En este momento, las fuerzas dinámicas (diferencial de presión y arrastre) que reducen el daño de la permeabilidad erosionando y removiendo los granos de la formación fracturada de las paredes de los túneles son más pronunciadas. La velocidad de la oleada transitoria depende del desbalance y de la permeabilidad de la formación⁵⁷.

El diferencial de presión necesario para crear orificios limpios y efectivos depende de la permeabilidad, la porosidad y la resistencia de la roca además del tipo y el tamaño de la carga. Por ejemplo, las cargas de penetración profunda causan menos daños que las cargas que producen grandes orificios. Cuando el desbalance se encuentra por debajo del

⁵⁶ Ibid.

⁵⁷ Behrman, Larry. Brooks, James. Técnica de diseño de los disparos para optimizar la productividad. Op. cit.

nivel óptimo, el daño de los disparos y la tasa de flujo por disparos resultan variables, y la mayor parte de los datos sugiere que para poder minimizar o eliminar el daño provocado por los disparos las presiones de desbalance deben ser superiores a las que se utilizan habitualmente en los campos petroleros.

Si bien en un primer momento se produce un flujo turbulento con los fluidos de baja viscosidad, los resultados de las pruebas indican que la turbulencia no es una condición necesaria para la limpieza del orificio, por lo que los datos no están apoyados en las teorías originales donde se requería flujo turbulento para la limpieza de las perforaciones. En cambio, la limpieza del daño de la permeabilidad alrededor del disparo, hoy se relaciona con el arrastre viscoso⁵⁸.

3.2.2. Guía para la obtención de un Bajo-balance óptimo

Experiencia de campo ha sugerido que las perforaciones realizadas en condiciones de bajo-balance (presión del pozo inferior a la presión de formación) es un método efectivo para crear aberturas y perforaciones sin daño. La selección de la presión de bajo-balance deber ser suficiente para expulsar los residuos o escombros en el interior de las perforaciones, para mejorar la productividad y al mismo tiempo evitar fallas mecánicas de la formación.

Basados en experiencias alrededor del mundo, Bell (1984) sugieren el siguiente criterio para la selección de un bajo-balance óptimo.

⁵⁸ RODRIGUEZ, Álirio Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. cit.

Tabla 4. Bajo-balance óptimo según Bell

PERMEABILIDAD	BAJO BALANCE REQUERIDO (PSI)	
	PETROLEO	GAS
> 100 md	200-500	1000-2000
< 100 md	1000-2000	2000-5000

Modificado de: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproduccion. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007

La metodología permite calcular la presión de desbalance necesaria, para obtener una buena limpieza de las perforaciones sí que se presenten problemas mecánicos o posibles arenamientos en el pozo.

Las pruebas de un solo disparo y pruebas de flujo también se han utilizado para calcular el desbalance de presión necesario para obtener disparos limpios. El factor de daño provocado por un solo disparo se puede utilizar en simuladores de flujo para obtener el factor de daño total del disparo y evaluar o comparar las diferentes opciones de disparo. Esta es la metodología que hoy en día constituye el criterio más ampliamente aceptado para calcular el desbalance necesario para obtener orificios con factor de daño cero, surge como resultado de más de una década de investigaciones en aras de la optimización de la limpieza de los disparos. Cuando se calculan con este método los valores de desbalance necesarios son de dos a cuatro veces más grandes que los que resultan de los criterios utilizados previamente.

3.3. PRESIÓN DIFERENCIAL DE SOBREALANCE EXTREMO

El Sobrebalance extremo consiste en realizar el cañoneo con presiones superiores a la presión de fractura de la formación, creando de esta manera un canal de flujo más allá de la zona de daño, hacia la zona de mayores esfuerzos de la formación. El método que se basa es utilizar una columna de líquido directamente contra el intervalo a disparar, hasta un determinado nivel y sobre este nivel colocar una columna de gas para proveer la presión adicional requerida para lograr el gradiente deseado. Se puede reducir inclusive la presión de superficie utilizando nitrógeno.⁵⁹

Se requiere que el pozo permanezca cerrado y controlado durante las operaciones de cañoneo, al disparar los cañones se genera un incremento de presión en la formación menor que la resistencia compresiva de la roca. Produciendo fracturas en la formación, también requiere taladro para efectuar la operación de cañoneo y posteriormente la bajada de la completación del pozo.

En muchas formaciones de baja permeabilidad, las presiones remanentes son insuficientes para una limpieza efectiva de las perforaciones. En otras instancias el aporte de la formación es cuestionable y el riesgo que los cañones se adhieran al casing debido a los altos niveles de sobrebalance es alto, lo que hace de esta operación de disparos en sobrebalance extremo muy riesgosa.

Esta es una técnica de estimulación en la cercanía del pozo, usada en conjunto con operaciones de cañoneo, este método ha ido ganando popularidad en los últimos años debido a que muchos pozos no han podido ser cañoneados efectivamente con técnicas de disparo en Bajobalance.

⁵⁹ BUSTOS, Edna. Estudio de Pozos Candidatos a Recañoneo y Apertura de Nuevas Zonas de Las Arenas De la Formación Barco del Área A del Campo Tibú.

3.4. EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CAÑONEO SEGÚN EL MÉTODO DE DESARROLLO

Cuando se piensa en escoger la técnica más adecuada para llevar a cabo el cañoneo del pozo se debe determinar primero las condiciones de presión a la cual va a ser cañoneado el pozo; como se explicó en el capítulo anterior, existen dos técnicas básicas de cañoneo de pozos, basadas principalmente en el tipo de transportadores de carga y el área de aplicación, como lo son wireline convencional o transportados por cable, que a su vez se subdivide en cañones bajados a través de la tubería de producción (through-tubing gun) y cañones bajados a través del casing (casing gun) y tubing conveyed perforating (TCP), cañones transportados con tubería.

- **Técnica Wireline Convencional**

Para esta técnica el cañoneo debe ser realizado en condiciones de sobre-balance (overbalance) hacia la formación, es decir, que la presión hidrostática necesaria del pozo es mayor o igual que la presión de formación, esto se hace con el fin de evitar el soplado de los cañones hacia arriba, altas presiones en el espacio anular y en la superficie.

- **Casing Gun:** Los cañones convencionales bajados con cable eléctrico, producen orificios de gran penetración que atraviesen la zona dañada por el lodo de perforación. Sin embargo, el cañoneo debe ser realizado con el pozo en condiciones de sobre-balance, con el fin de evitar el soplado de los cañones hacia arriba, altas presiones en el espacio anular y en la superficie.

Esta condición de sobre-balance deja los orificios perforados taponados por los restos de las cargas, aún si el intervalo cañoneado es achicado o el pozo puesto a producción; es muy raro que se pueda generar un diferencial de presión que limpie

la mayoría de los orificios perforados, creándose con esta condición altas velocidades de flujo y turbulencia en el frente productor. La zona compactada alrededor de los orificios perforados y los restos de las cargas, son muy difíciles de remover acidificando o achicando; tan solo la zona compactada reduce la permeabilidad original hasta un 80%. Esto se hace más crítico en campos con alto índice de agotamiento.

- **Through Tubing Gun:** Los cañones bajados a través de la tubería de producción con cable eléctrico, son utilizados ampliamente para cañonear pozos productores o inyectores, porque se puede aplicar un diferencial pequeño de presión estático a favor de la formación (Desbalance pequeño) que puede ser usada sin soplar las herramientas hacia arriba, no es suficiente para remover y eliminar los restos de las cargas y la zona compactada creada alrededor del orificio perforado.

Es igualmente preocupante la penetración de las pequeñas cargas utilizadas y la fase de disparos de este sistema. Estas cargas no pueden penetrar en la formación y, frecuentemente tampoco atraviesan la zona dañada por el lodo de perforación. Otra desventaja es que el pequeño diferencial de presión a favor de la formación, solo se puede aplicar en la primera zona o intervalo a cañonear, por limitaciones en el lubricador, punto débil del cable eléctrico o en la tubería de producción.

- **Técnica TCP Bajo-balance**

Este método de cañoneo, emplea TUBING CONVEYED PERFORATING (TCP), y cañones del tipo casing gun. El método de TCP debe ser operado en fluido limpio con una presión de bajo-balance (underbalance), es decir, que la presión de la formación es mayor que la presión de la columna hidrostática; Lo que permite eliminar el daño creado por la

perforación, la cementación y el cañoneo, utilizando para ello la misma energía del yacimiento.

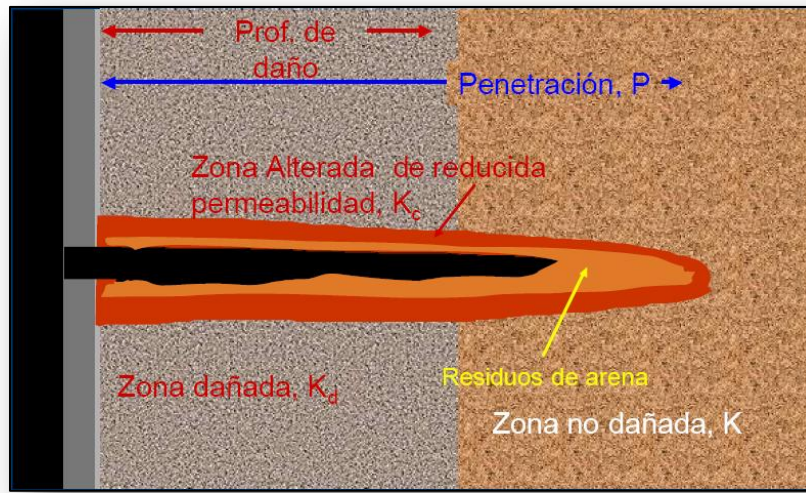
El poder combinar una buena penetración en la formación, alta densidad y fase de disparos y un diferencial de presión a favor de la formación, permite obtener una relación de productividad óptima (producción real vs. producción teórica), aún después de haberse taponado la mitad o las terceras partes de los orificios cañoneados

- **Técnica PURE (Perforating for Ultimate Reservoir Exploitation).**

La detonación controlada de cargas huecas (moldeadas), especialmente diseñadas y fabricadas para pozos entubados, produce agujeros, disparos, perforaciones, cañoneos en la tubería de revestimiento de acero, el cemento y la formación adyacente. La optimización de la producción o de la inyección demanda diseños cuidadosos, planeación previa a los trabajos e implementación en el campo, para obtener disparos conductores limpios que se extiendan más allá del daño de la formación, penetrando en la roca yacimiento inalterado.

Lamentablemente, los disparos con explosivos también pulverizan los granos de la roca de la formación generando una zona triturada de baja permeabilidad en la formación alrededor de las cavidades de los disparos, y facilitando la posibilidad de la migración de partículas finas. Este proceso también deja algunos detritos residuales de la detonación dentro de los túneles de los disparos. El rebote elástico de la formación alrededor de los túneles recién creados genera daño por las vibraciones adicionales de los disparos y materiales sueltos.

Figura 25. Cañoneo Técnica Pure.



Fuente: DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproducción. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007.

La minimización del deterioro del flujo y las restricciones de la conductividad causadas por este daño inducido por los disparos, resultan cruciales para la obtención de disparos efectivos. Durante 25 años los procedimientos de completamiento estándar utilizaron una diferencia de presión estática relativamente grande, o un bajo-balance de presión para eliminar o minimizar el daño provocado por los disparos.

La técnica de disparar con una presión Bajo-balance es la técnica más difundida para la optimización de los pozos perforados con disparos. Este método establece una presión estática de pozo antes de los disparos, que es inferior a la presión de la formación adyacente. Según la teoría convencional, la oleada (flujo instantáneo) originada por una reducción de la presión de poro en la región vecina al pozo mitiga el daño de la zona triturada y barre la totalidad o parte de los detritos que se encuentran en los túneles de los disparos.

Los científicos han analizado las presiones transitorias de operaciones de disparos mediante pruebas de laboratorio y descubrieron que el bajo-balance estático solo no garantiza la obtención de disparos limpios. Los resultados indicaron que lo que realmente rige la limpieza de los disparos son las fluctuaciones producidas en la presión del pozo inmediatamente después de la detonación de las cargas huecas antes ignoradas y no la diferencia de presión inicial como se pensaba anteriormente.

Los investigadores aplicaron este mayor conocimiento de las presiones dinámicas de pozo para desarrollar el proceso de Operaciones de Disparos para la Explotación Total del Yacimiento PURE (Perforating for Ultimate Reservoir Exploitation). Esta nueva técnica es aplicable a portacargas, o pistolas, operados con cable o con línea de acero, y a sistemas de cañones bajados con tubería flexible o con la tubería de producción TCP, y sea en completamiento de pozos verticales o muy inclinados, incluyendo los pozos horizontales⁶⁰.

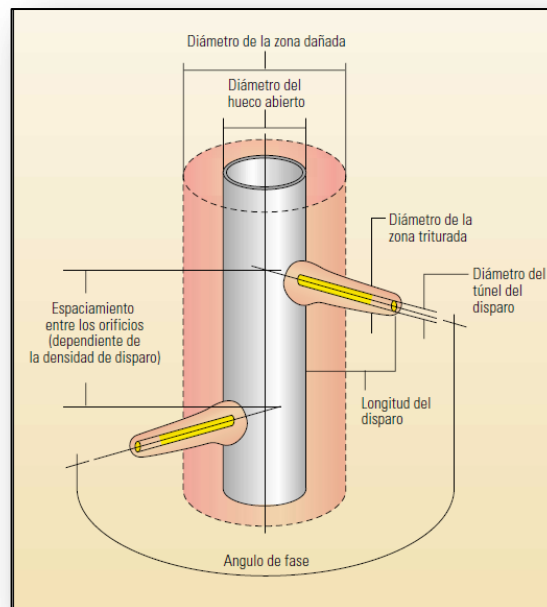
⁶⁰ DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Op. cit.

4. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Los parámetros geométricos son uno de los aspectos sobre los cuales se puede ejercer un control directo. Como se ilustra en la figura 19, los parámetros geométricos comprenden: el ángulo de fase, densidad de disparo, diámetro de la perforación y longitud de penetración. Cambios significativos en el flujo se pueden observar al variar los parámetros geométricos; la geometría que sea seleccionada para una labor en particular será determinada por las condiciones del pozo, el daño a la formación y el tipo de completamiento que se vaya a realizar.

Otros factores geométricos que pueden ser importantes en casos especiales son: Penetración parcial, desviación del pozo y radio de drenaje.

Figura 26. Geometría de la perforación.



Fuente: Oilfield review Schlumberger summer 2000 vol. 12

4.1. ÁNGULO DE FASE O DIRECCIÓN DE TIRO

Indica el ángulo entre cargas, por ejemplo, las cargas pueden estar disparadas en una o varias direcciones de acuerdo con el ángulo. (0° , 60° , 90° , 120° y 180°). El ángulo de fase tiene un efecto significativo sobre la relación de productividad, la figura 28 es una gráfica de la penetración vs relación de productividad (Stanley. L. 1981). Para diferentes ángulos de fase. Para la elaboración de esta gráfica no se tuvo en cuenta ni la zona dañada ni la zona compactada. Todas las perforaciones se asumen que tienen la misma longitud y con un diámetro de 0,5 pulgadas.

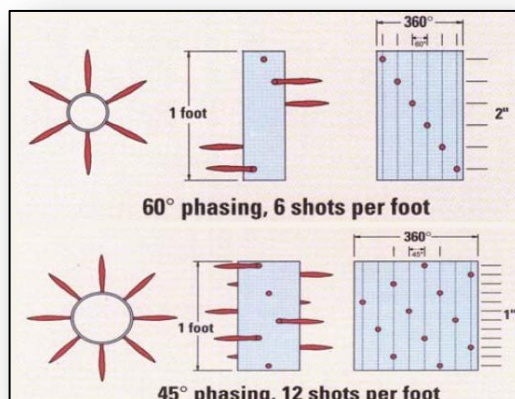
Es claro a partir de la figura que para cualquier longitud de perforación. Un ángulo de fase cero grados dará una relación de productividad apreciablemente menor que la obtenida para cualquiera de los otros ángulos de fase. Se observa que los mejores resultados se obtienen para 90° grados. Sin embargo la diferencia con los valores para 120° y 180° grados es de poca magnitud.

La fase angular entre perforaciones sucesivas es un factor importante. La figura 28 muestra una reducción de un 10 - 12 % en la PR para sistemas de 0° y 90° con una misma penetración.

Suponiendo que se use un sistema de 0° de fase, con una penetración de 6 pulgadas, se obtiene una PR de 0.9 de la gráfica, mientras que para un sistema de 90° se obtiene una PR de 1.02; esto representa una diferencia del 11% en la PR⁶¹.

⁶¹ RODRIGUEZ, Álvaro Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo, Op. cit.

Figura 27. Patrón de agujeros para cañones fase 0° y 60° - 30° y 90°



Fuente: Oilfield review Schlumberger summer 2000 vol. 12

4.2. DENSIDAD DE DISPARO

Se define como el número de cargas por unidad de longitud. Las más comunes son las de 2 a 4 tiros por pie (TPP). Con dispositivos especiales esta densidad se puede elevar a 8 y 14 TPP. En la figura 29 se observa el comportamiento de la penetración respecto a la relación de productividad para diferentes densidades de disparo. Además en esta gráfica se asume que no existe zona dañada ni zona compactada, y que todas las perforaciones son de la misma longitud y tienen un diámetro de 0,5 pulgadas⁶².

La densidad de los disparos generalmente depende del ritmo de producción requerido, la permeabilidad de la formación y la longitud del intervalo disparado. Para pozos con alta producción de aceite y gas, la densidad de los disparos debe permitir la producción deseada con una caída de presión razonable. Generalmente son adecuados 4 disparos por pie de 0.5 pulgadas, siendo satisfactorio uno o dos disparos por pie para la mayoría

⁶² Ibíd.

de los pozos con producción baja. En los pozos que serán fracturados, los disparos se planean para permitir la comunicación con todas las zonas deseadas. Para operaciones en arenas consolidadas, generalmente se prefieren 4 disparos por pie de diámetro grande. Para terminaciones con empaque de grava se prefieren de 4 a 8 disparos por pie de 0.75 pulgadas, de diámetro o mayores.

Los disparos de 4 o más cargas por pie en tuberías de revestimiento de diámetro pequeño y de baja resistencia, con cañones con cargas expuestas, pueden agrietar la tubería de revestimiento. También el cemento puede fracturarse severamente, siendo necesario efectuar cementaciones forzadas para controlar la producción indeseable de agua o gas. Los acoples de las tuberías de revestimiento de alta resistencia pueden dañarse al efectuar múltiples disparos sobre ellos.

Observando que para una densidad de 4 tiros por pies es necesaria una penetración de 13 pulgadas para obtener una PR de 1.0 mientras que para una densidad de 6 tiros por pie se necesitan 10 pulgadas.

4.3. LONGITUD DE PENETRACION

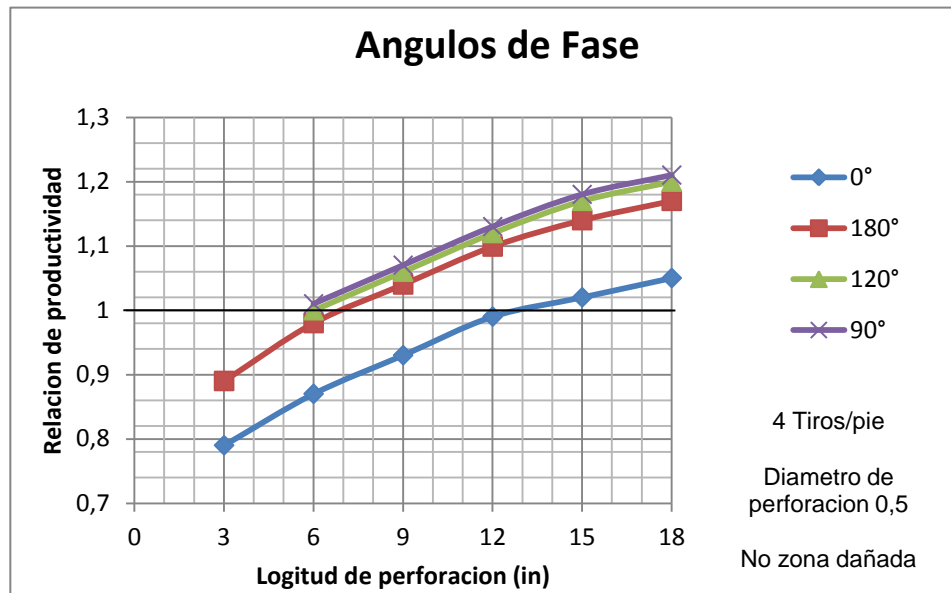
Es la longitud de la perforación realizada por una carga. Este es otro de los parámetros que afecta la relación de productividad y dependiendo del tipo de completamiento requerido tomara mayor o menor importancia dentro el diseño. Analizando su relación con los otros parámetros y la productividad, se tienen las figuras 28 y 29 que comparan la penetración con la relación de productividad para diferentes valores de ángulo de fase y

densidad de disparo, se observa que la relación de productividad aumenta apreciablemente al aumentar la longitud de penetración.

Al diseñar cualquier carga moldeada puede obtenerse una mayor penetración sacrificando el tamaño del agujero. Debido a que una máxima penetración parece ser más importante, con fundamento en los cálculos teóricos de flujo, se han solicitado frecuentemente a la industria petrolera, y se han recibido a menudo, cargas de mayor penetración sacrificando el tamaño del agujero. Cuando se perforan tuberías de revestimiento de alta resistencia y de pared gruesa, o formaciones densas de alta resistencia, probablemente se requiera una penetración máxima aún cuando el tamaño del agujero sea reducido hasta 0.4 pulgadas.

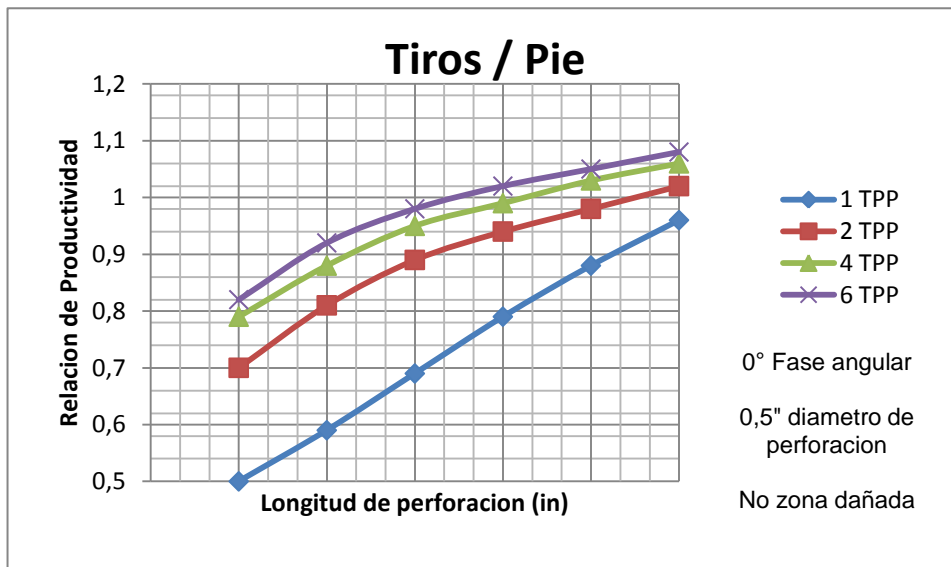
Sin embargo, en situaciones normales, debido a la dificultad en remover el lodo, los residuos de las cargas, la arena y las partículas calcáreas de un disparo del diámetro y la formación, deberá normalmente tener un diámetro mínimo de entrada de 0.5 pulgadas., con un agujero liso y de tamaño uniforme de máxima penetración.

Figura 28. Relación de productividad Vs Longitud de la penetración. Para diferentes ángulos de fase



Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S.

Figura 29. Relación de la productividad Vs Longitud de penetración. Para diferentes densidades de disparo



Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ

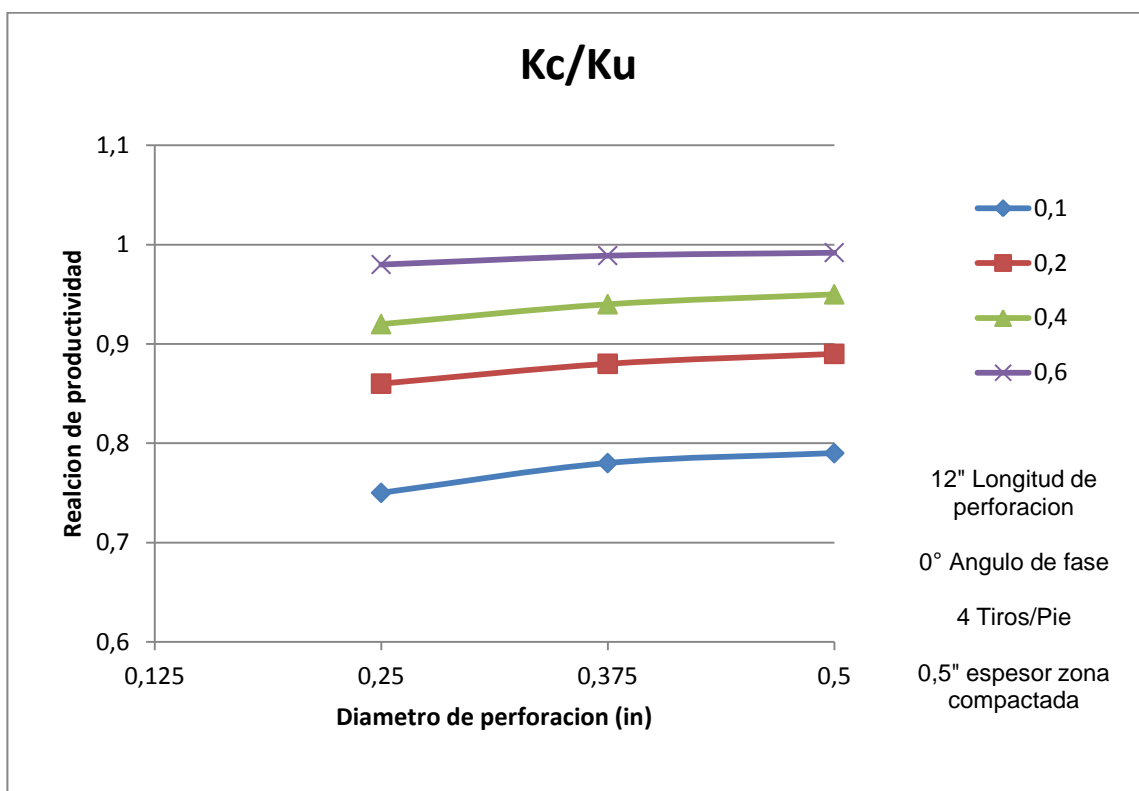
4.4. DIÁMETRO DE LA PERFORACIÓN

Representa el diámetro del agujero que se crea en el revestimiento durante el cañoneo. El efecto que tiene el diámetro de la perforación en la relación de productividad. Se ilustrara a continuación en la figura 30 se comparan estos dos parámetros para diferentes valores de la relación K_c/K_u donde K_c es la permeabilidad de la zona compactada y K_u es la permeabilidad de la formación en la zona virgen. Esta es una situación más aproximada de lo que ocurre realmente en la formación en las cercanías del pozo.

En una formación dada. Para los valores mayores de K_c/K_u se espera encontrar menores restricciones al flujo. Por lo tanto mayores valores en la relación de productividad. Es interesante observar que para cualquier valor de K_c/K_u , los incrementos en el diámetro de perforación por encima de 0,25 pulgadas da como resultados incrementos mínimos en la relación de productividad.

De este modo lo que es realmente importante es una relación de productividad máxima. Por lo tanto cargas que suministren diámetros de perforación aproximadamente iguales o mayores a 0,25 pulgadas serán seleccionados con base en la penetración en lugar del diámetro del hueco.

Figura 30. Relación de productividad vs diámetro de la perforación. Para diferentes relaciones de Kc/Ku



Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S.

4.5. SEPARACIÓN ENTRE CARGAS O ESPACIO LIBRE

Indica la distancia existente entre la pared interior del revestimiento y la carga. Es un factor muy importante en la búsqueda de mayores penetraciones por cuanto las mejores perforaciones y las más profundas se logran con espacios libres menores de una pulgada, e inversamente las características de las perforaciones se ven reducidas al incrementarse este⁶³.

⁶³ Ibíd.

4.6. TIPOS DE COMPLETAMIENTO

Para llevar a cabo un diseño efectivo es muy importante tener en cuenta el tipo de completamiento que se va a realizar en el pozo pues éste determinará cuál será el parámetro geométrico que va influir fundamentalmente en la obtención de una relación de productividad lo más óptima posible. Se consideraran tres tipos de completamiento: natural, para el control de arena y el de estimulación. También se tendrá en cuenta el grado de importancia que cada uno de los parámetros geométricos tomará de acuerdo al tipo de completamiento que se requiera.

4.6.1. COMPLETAMIENTO NATURAL

En un completamiento natural el parámetro principal es la longitud de penetración y la densidad de disparo (Stanley. L. 1981). La longitud de las perforaciones es más importante para la productividad que otros parámetros, como el diámetro de la perforación. El orden de importancia de los parámetros geométricos para este tipo de completamiento es el siguiente:

- Longitud de penetración.
- Densidad de disparo.
- Ángulo de fase.
- Diámetro de las perforaciones.

4.6.2. COMPLETAMIENTO PARA EL CONTROL DE ARENA

El objetivo en las operaciones para el control de arena, es evitar el deterioro de las perforaciones. Cuando este deterioro ocurre los materiales resultantes bloquean las perforaciones.

Una alta densidad de disparo y un mayor diámetro de la perforación, traerá como resultado una mayor área total perforada (George. E. King, 1987). Así de este modo el orden de importancia de los parámetros geométricos es el siguiente:

- Diámetro de la perforación.
- Densidad de disparo.
- Ángulo de fase.
- Longitud de penetración.

4.6.3. COMPLETAMIENTO PARA ESTIMULACIÓN

En formaciones que requieren estimulación, el diámetro y distribución de las perforaciones son los parámetros de mayor importancia. El diámetro de la perforación y la densidad de disparo se seleccionan para controlar la caída de presión a través de las perforaciones (George. E. King, 1987). Y por tanto minimizar la demanda de presión en el equipo de bombeo.

De acuerdo a lo anterior, para las operaciones de estimulación el orden de importancia de los parámetros geométricos es:

- Diámetro de la perforación.
- Densidad de disparo.
- Ángulo de fase.
- Longitud de penetración.

4.7. EFECTO DEL DAÑO EN LA ZONA COMPACTADA

Uno de los objetivos importantes en el cañoneo es utilizar el equipo y las técnicas que minimicen el daño causado por este. Estudios muestran la influencia de la profundidad de la penetración y el ángulo de fase del cañón en la reducción del efecto de daño de la zona compactada. En ambos casos se asume que la densidad de disparo es de 4 TPP y que las perforaciones tienen un diámetro de 0,5 pulgadas. No se tiene zona dañada, pero existe una zona compactada de 0,5 pulgadas de espesor alrededor de cada perforación.

La figura 22 muestra el comportamiento de la eficiencia de flujo versus K_c/K_u para dos valores de penetración la eficiencia de flujo del pozo (EFP) es la relación del flujo de un completamiento perforado real a la de un completamiento perforado ideal de geometría idéntica.

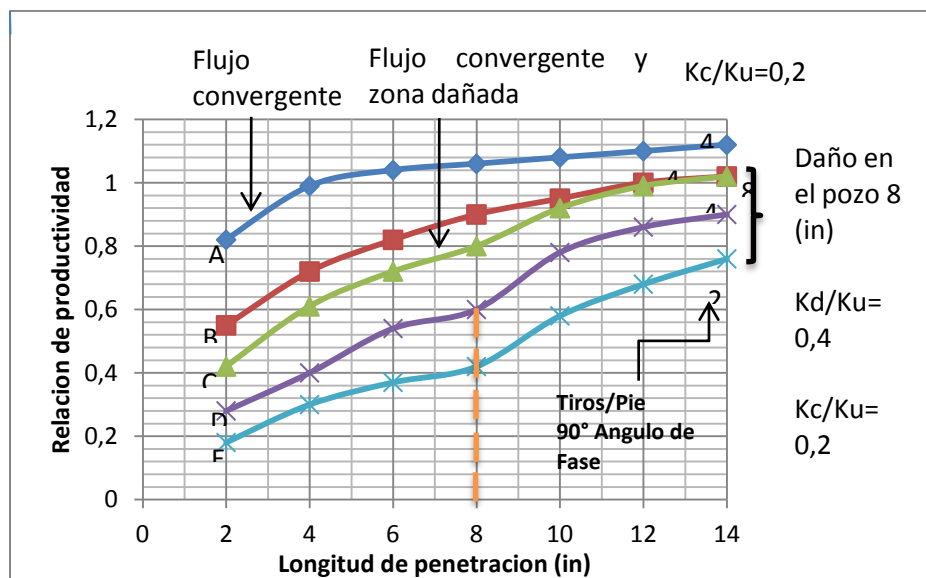
En la figura 22 se aprecia que a mayores valores de penetración se obtienen mayores eficiencias de flujo del pozo. Además se observa que cuando la relación de permeabilidad cae por debajo de 0,3 para cualquiera de los valores de penetración. La eficiencia de flujo del pozo empieza a decrecer rápidamente. Esto es muy importante ya que K_c/K_u puede ser fácilmente menor de 0,3 como cuando se cañonea con sobrealance caso en que las perforaciones no son lavadas por un contra flujo como sí ocurre con el cañoneo que se realiza con presión a favor de la formación. De este modo, por muy profunda que sea la penetración, las perforaciones limpias son necesarias para que haya una comunicación efectiva entre la formación y el pozo. Para lograr este objetivo se debe emplear un delta de presión de desbalance óptimo en el caso en el que se esté trabajando con presión diferencial negativa, o realizando operaciones de lavado y acidificación si se está trabajando con presión diferencial positiva.

La relación de permeabilidad K_c/K_u y la relación de productividad (PR) son comparadas en la figura 23 para faseamientos de 0° y 90° grados. Los valores de relación de productividad son claramente mayores para el faseamiento de 90° grados. Similarmente a la figura anterior, se observa que la relación de productividad empieza a decrecer notablemente cuando la relación de permeabilidad cae por debajo de 0,3.

Las figuras 22 y 23 muestran la importancia de minimizar el daño de la zona compactada. También se aprecian que los efectos del daño de la zona compactada pueden en cierta forma ser compensados usando cargas de penetración profunda y faseamientos diferentes a 0° grados.

4.7.1. INFLUENCIA EN LAS ZONAS DAÑADA Y COMPACTADA EN RELACION DE PRODUCTIVIDAD

Figura 31. Relación de productividad Vs Longitud de disparo para diferentes densidades de disparo.



Modificado de: Optimización de cañoneo. ALIRIO M. RODRIGUEZ P, CARLOS GOMEZ S.

La figura 31 permite una interesante comparación de los valores de relación de productividad cuando una zona en particular no tiene daño, cuando esta solo tiene daño por invasión y cuando presenta daño por invasión como el causado por el cañoneo en sí. El espesor de la zona dañada se asume sea de 8 pulgadas, la permeabilidad de esta zona será denotada como K_d .

La curva A representa la penetración versus relación de productividad cuando no se tiene daño de ningún tipo.

La curva B muestra el efecto al introducir el daño que se causa en hueco perforado al cañonear ($K_c/K_u=0,2$). Donde K_c es la permeabilidad de la zona compactada al realizar el disparo. Se observa en la gráfica que la relación de productividad cae en forma apreciable.

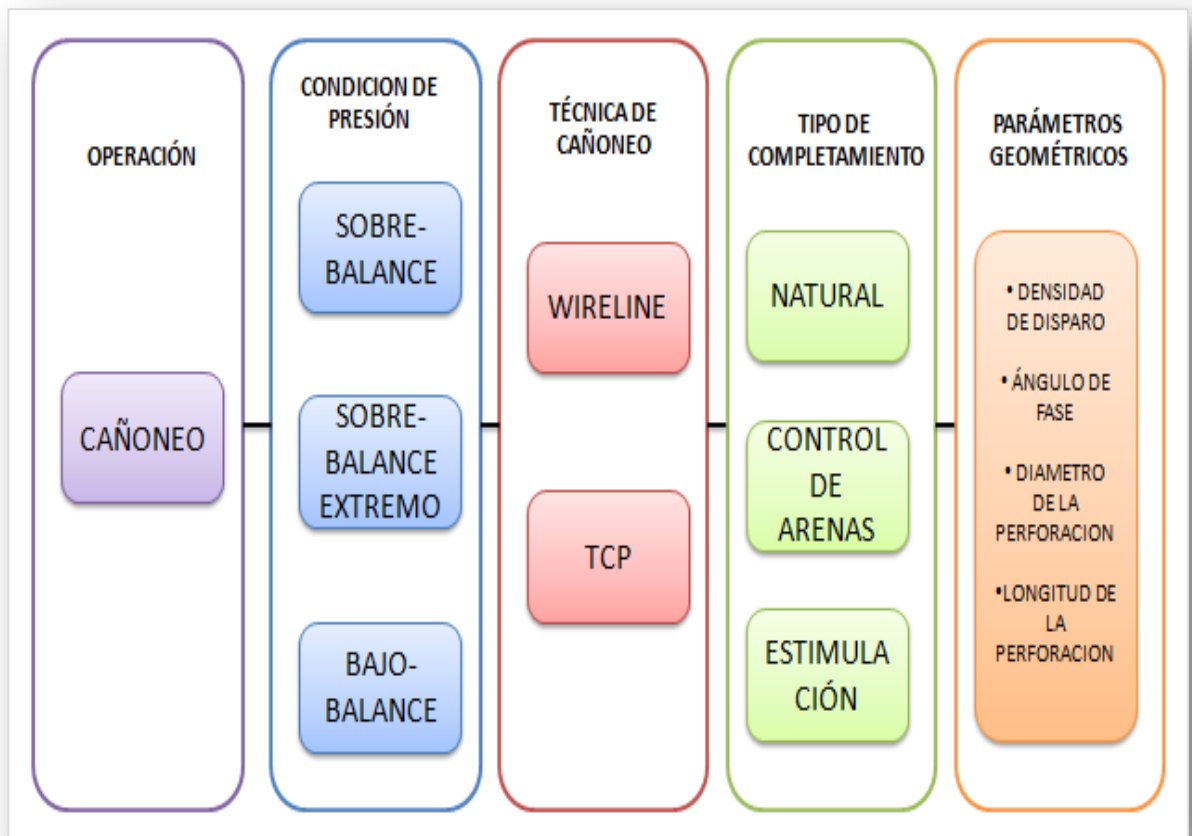
Si tanto el daño debido a la penetración del disparo ($K_c/K_u=0,2$), como el daño causado por la invasión se tienen en cuenta, la relación de productividad cae aun mas como lo muestra la curva D. para cada caso se utilizo una densidad de disparo de 4 TPP.

Comparando las curvas A, B, y D para cuando estas alcanzan una relación de productividad de 0,8 para las diferentes profundidades de penetración: para la curva A que no asume daño (caso ideal) se requiere de una profundidad de penetración apenas de 2 pulgadas. El daño hecho por la carga incrementa este valor a cerca de 6 pulgadas, y si se agrega el daño causado por la invasión de los fluidos de perforación, el valor total en la profundidad de penetración para alcanzar un valor de 0,8 en la relación de productividad es de un valor a las 10 pulgadas.

En las curvas C, D y E se comparan los valores de la relación de productividad para las densidades de disparos de 2, 4 y 8 TPP para cuando la zona dañada como la

compactada están presentes. Como se aprecia la relación de productividad aumenta al incrementar la densidad de disparo, algo muy importante es cuando la penetración de las perforaciones van más allá de la zona dañada ya que hay un aumento significativo en la tasa de incremento de la relación de productividad a medida que la penetración es más profunda, entonces es recomendable que para superar los efectos de la zona dañada se tengan altas densidades de disparo y cargas de penetración profunda.

Figura 32. Cuadro Conceptual Operación de Cañoneo



Fuente: Autores

5. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE CAÑONEO WIRELINE (WL) Y TUBING CONVEYED PERFORATING (TCP)

Con el fin de comparar las técnicas de cañoneo previamente estudiadas y la relación que tienen los parámetros geométricos con la eficiencia de flujo en las operaciones de cañoneo, se debe acudir a datos obtenidos de literatura. Para dicho análisis se requiere contar con la información de las propiedades petrofísicas, y las diferentes operaciones de cañoneo realizadas ya sean Wireline o TCP.

Factores a tener en cuenta en las tablas de entrada y salida de datos al simulador:

- El color rojo representa las opciones que no fueron seleccionadas en el simulador.
- El color verde y amarillo identifican el cambio de los valores en dichas celdas con respecto al caso base para cada técnica.

5.1. ELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA PARA LOS CASOS BASE WIRELINE, TCP Y TCP MEJORADO

La estimación de cada uno de los parámetros geométricos, como lo son penetración de los disparos, ángulo de fase, densidad de disparo, diámetro del hueco, carga y cañón seleccionado entre otros, se realizó a partir de la aplicación del software **SPAN** (Schlumberger Perforating Analysis) de la compañía Schlumberger.

Elegir una geometría óptima de perforación para una formación en particular, está afectada por el diámetro del casing y tubing. El programa SPAN predice el resultado de algunos trabajos de cañoneo permitiendo al ingeniero de completamiento comparar una variedad de alternativas. El programa consiste de un modulo de predicción de penetración y un modulo de predicción para cálculo de productividad.

El modulo de penetración calcula la longitud de las perforaciones y el diámetro de las mismas; y el tamaño de las cargas para datos de completamiento y formación dada. Esta

teoría básica de penetración asume que tanto el jet y la roca se comportan como fluido si la presión de penetración excede el esfuerzo de la roca.

El programa toma en consideración el tipo de carga, fase y posición de los cañones, diámetro de los cañones, densidad de disparo, profundidad de disparo, especificaciones y posición de casing, fluidos de completamiento, diámetro del hueco y datos en general de la formación y el pozo.

El software SPAN cuenta con 6 secciones de entrada de datos para el análisis completo del sistema de cañoneo, estas son:

- Job
- Formation Fluid
- Well / Reservoir
- Zones Formation
- Wellbore / Tubular
- Gun system

La selección de los datos de entrada para cada sección del SPAN es la siguiente:

5.1.1. Job

La mayor parte de los datos de entrada en la sección "Job" ayudan a identificar el trabajo que se está realizando, además el tipo de análisis es seleccionado aquí; lo cual para las siguientes tablas está representado por una X.

Tabla 5. Variables de entrada Casos Bases sección Job.

JOB		Caso Base WL	Caso Base TCP	Caso Base TCP MEJORADO
ANALYSIS TYPE	PENETRATION & EH ONLY			
	PENETRATION, EH & WELL PRODUCTIVITY	X	X	X
	WELL PRODUCTIVITY ONLY			
DESIGN TYPE	SINGLE DEPTH/ZONE	X	X	X
	MULTIZONE-MANUAL INPUT			
	MULTIZONE-LOG INPUT			
JOB METHOD	CT			
	SLICKLINE			
	TCP		X	X
	WL	X		

Fuente: Autores del proyecto

5.1.2. Formation Fluid

En esta sección los datos de entrada corresponden a las propiedades del fluido presente en el yacimiento, ya sea aceite, gas o agua.

Tabla 6. Variables de entrada Casos Base sección Formation Fluid.

FORMATION FLUID		CASO BASE WL	CASO BASE TCP	CASO BASE TCP MEJORADO
PRYMARY SEPARATION CONDITIONS	PRESSURE (PSI)	100	100	100
	TEMPERATURE (F)	100	100	100
PRIMARY FLUID	OIL	X	X	X
	WATER			
	GAS			
OIL GRAVITY (API)		15	15	15
WATER DENSITY (g/cc)		1,00347	1,00347	1,00347
WATER SALINITY (ppm)		5000	5000	5000
GAS GRAVITY		0,65	0,66	0,66
WATER CUT (%)		60	60	60
SEPARATOR GLR (SCF/STB)		375	375	375
VISCOSITY (cp)				
FVF (bbl/STB)				
BUBBLE POINT (Psi)				

Fuente: Autores del proyecto

5.1.3. Well / Reservoir

En esta sección se especifica la orientación del pozo ya sea vertical o desvaído, presión de fondo fluyendo, tasa de producción del pozo y modelo del yacimiento.

Tabla 7. Variables de entrada Casos Base sección Well / Reservoir

WELL RESERVOIR		CASO BASE WL	CASO BASE TCP	CASO BASE TCP MEJORADO
WELL ORIENTATION	VERTICAL OR DEVIATED	X	X	X
	HORIZONTAL			
WELL PRODUCTION	FLOWING BOTTOMHOLE PRESSURE (Psi)	2200	2200	2200
	USER DEFINED FLOW RATE			
VERTICAL OR DEVIATED WELL	MODEL TYPE			
	transient			
	PSS	X	X	X
DRAINAGE AREA		31,4159	31,4159	31,4159
DRAINAGE DIAMETER	circle 31,62	1320	1320	1320

Fuente: Autores del proyecto

5.1.4. Zones Formation

En esta sección se determina el intervalo a cañonear, profundidad de dicho intervalo, tipo de roca y propiedades petrofísicas de éste.

Tabla 8. Variables de entrada Casos Base sección Zones Formation.

ZONES FORMATION		CASO BASE WL	CASO BASE TCP	CASO BASE TCP MEJORADO
CALCULATED DEPTH DATA	VERT. WELL			
	ANGLE	X	X	X
	TVD			
	MD			
TVD top (ft)		4990	4990	4990
TVD bottom (ft)		5010	5010	5010
MD top (ft)		4990	4990	4990
MD bottom (ft)		5010	5010	5010
ROCK TYPE	SANDSTONE	X	X	X
	LIMESTONE			
	DOLOMITE			
POROSITY (%)		20	20	20
HORZ. PERMEABILITY (md)		100	100	100
VERT. PERMEABILITY (md)		20	20	20
BULK DENSITY (g/cc)				
ROCK STRENGHT (Psi)				
VERTICAL STRESS (Psi)				
PORE PRESSURE (Psi)				
TEMPERATURE (F)				
WELL DAMAGE (in)		8	8	8
kd/k		0,2	0,2	0,2

Fuente: Autores del proyecto

5.1.5. Wellbore / Tubular

En esta sección se establece el estado mecánico del pozo como la posición, el grado y peso del casing, también se especifica el fluido de completamiento y material en el anular.

Tabla 9. Variables de entrada Casos Base sección Well / Tubular

WELLBORE TUBULAR		CASO BASE WL	CASO BASE TCP	CASO BASE TCP MEJORADO
BOREHOLE DIAMETER (in)		8,5	8,5	8,5
BOREHOLE FLUID TYPE	MUD			
	BRINE	x	x	x
	WATER			
	GAS			
	OIL			
	DIESEL			
	PROD FLUID			
	ACID			
FLUD DENSITY (ppg)		8,76	8,76	8,76
# CASINGS		1	1	1
OUTTER DIAMETER (in)		7	7	7
INNER DIAMETER (in)		6,184	6,184	6,184
CASING WEIGHT (lbm/ft)		29	29	29
CASING DENSITY (g/cc)		7,9168	7,9168	7,9168
GRADE		L80	L80	L80
POSITION		CENTRALIZED	CENTRALIZED	CENTRALIZED
ANNULUS MATERIAL		CEMENT	CEMENT	CEMENT
ANNULUS DENSITY (ppg)		15,85	15,85	15,85

Fuente: Autores del proyecto

5.1.6. Gun System

En la sección “Gun system” se diseña el sistema de cañoneo más adecuado y su respectivo diferencial de presión. Esta sección es de vital importancia pues en ella se establecen los parámetros geométricos del cañoneo, mediante la variación de estos parámetros se determina que diseño de cañoneo fue el más óptimo; las casillas en verde corresponden a los datos de cada caso base, que varían uno con respecto al otro.

Tabla 10. Variables de entrada Casos Base sección Gun System.

GUN SYSTEM			CASO BASE WL	CASO BASE TCP	CASO BASE TCP MEJORADO
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			4- 1/2 HSD 60,5	5 HSD 60,5	6 HSD 120,12
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II RDX	41B HJ II RDX
GUN SYSTEM #1	PASHING (deg)		60	60	120
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
	GUN POSITION	POSITIONED			
		CENTERED	x	x	x
		ECCENTERED			
	ROTATION OFFSET		0	0	0
	GUN SYSTEM		4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	6" HSD, 41B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		37	37	22
	API EH		0,46	0,46	0,38
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0432557	0,0432557	0,0540429
	SHOT DENSITY		5	5	12
	PURE		0	0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0	0
	std Chg Load Len		20	20	20
	Standoff		0	0	0
	API PEN		34,58	34,58	21,07
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME				
	SCREEN DIAMETER				
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5	0,5
UNDBALANCE CONTIDIONS	NONE				
	BERHMAN STATIC	Static-UB/+OB	0	0	0

Fuente: Autores del proyecto

Se debe tener en cuenta que los datos introducidos al simulador corresponden los Casos Bases Wireline, TCP y TCP Mejorado de este estudio, algunos de estos datos no fueron introducidos como variables de entrada pues el simulador los calcula; entre ellos se tiene la viscosidad, factor volumétrico y punto de burbuja del fluido, tasa de flujo, resistencia de la roca, esfuerzo vertical, presión y temperatura del yacimiento.

5.2. DATOS DE ENTRADA CASO WIRELINE VARIANDO LOS PARÁMETROS DE LA SECCIÓN GUN SYSTEM

Los parámetros geométricos del sistema de cañoneo determinan la relación de productividad del pozo, si dicha relación se incrementa, la eficiencia del sistema de cañoneo por ende sería mayor. Para probar lo anteriormente dicho y así cumplir con los objetivos planteados en este trabajo de grado se desarrollaron diferentes diseños de cañoneo tomando como base la técnica Wireline, se variaron parámetros geométricos tales como: Presión diferencial, carga jet, densidad de disparo y ángulo de fase, estableciendo para cada uno de estos parámetros un valor por encima y por debajo al del caso base.

5.2.1. Presión Diferencial.

Con el fin de observar como la presión diferencial influía en la eficiencia del cañoneo, se tomaron valores de presión diferencial por debajo y por encima de la presión establecida en el caso base Wireline, dichos valores fueron:

- Overbalance = 1000 psi
- Underbalance = - 2000 psi

Tabla 11. Datos de entrada técnica Wireline variando la presión diferencial de desbalance.

GUN SYSTEM			CASO BASE WL	OVERBALANCE	UNDERBALANCE
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			4- 1/2 HSD 60,5	4- 1/2 HSD 60,5	4- 1/2 HSD 60,5
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II RDX	51B HJ II RDX
GUN SYSTEM # 1	PASHING (deg)		60	60	60
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
	GUN POSITION	POSITIONED			
		CENTERED	x	x	x
		ECCENTERED			
	ROTATION OFFSET		0	0	0
	GUN SYSTEM		4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		37	37	37
	API EH		0,46	0,46	0,46
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0432557	0,0292672	0,0828584
	SHOT DENSITY		5	5	5
	PURE		0	0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0	0
	std Chg Load Len		20	20	20
	Standoff		0	0	0
	API PEN		34,58	34,58	34,58
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME				
	SCREEN DIAMETER				
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDION	NONE				
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	1000	-2000

Fuente: Autores del proyecto

5.2.2. Carga Jet

Para determinar el efecto que genera la carga en la eficiencia del sistema de cañoneo, se cambió la carga jet tipo 51B JH II RDX utilizada en el caso base Wireline, por una carga tipo 51B HJ II HMX.

Tabla 12. Datos de entrada técnica Wireline variando la Carga Jet

GUN SYSTEM			CASO BASE WL	CARGA
# OF GUN SYSTEMS			1	1
GUN TYPE			4- 1/2 HSD 60,5	4- 1/2 HSD 60,5
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II HMX
GUN SYSTEM # 1	PASHING (deg)		60	60
	OPEN PERFS. (%)		100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0
	STRING LENGTH		20	20
	GUN POSITION	POSITIONED		
		CENTERED	x	x
		ECCENTERED		
	ROTATION OFFSET		0	0
	GUN SYSTEM		4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, HMX
	CHARGE WEIGHT		37	37
	API EH		0,46	0,45
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0432557	0,0379751
	SHOT DENSITY		5	5
	PURE		0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0
	std Chg Load Len		20	20
	Standoff		0	0
	API PEN		34,58	31,05
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME			
	SCREEN DIAMETER			
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE			
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.2.3. Ángulo de fase

Igualmente se varió el ángulo de fase del caso base Wireline, el cual era de 60 grados por ángulos de fase mayor y menor que éste, los cuales fueron respectivamente de 72 y 45 grados, esto con el fin de determinar como la variación de el ángulo de fase en el diseño afecta la relación de productividad y eficiencia del sistema de cañoneo.

Tabla 13. Datos de entrada técnica Wireline variando el Ángulo de Fase.

GUN SYSTEM			CASO BASE WL	FASE 75 GRADOS	FASE 45 GRADOS
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			4- 1/2 HSD 60,5	4- 1/2 HSD 72,5	4- 1/2 HSD 45,5
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II HMX	51B HJ II HMX
GUN SYSTEM # 1	PASHING (deg)		60	72	45
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
	GUN POSITION	POSITIONED			
		CENTERED	x	x	x
		ECCENTERED			
	ROTATION OFFSET		0	0	0
	GUN SYSTEM		4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		37	37	37
	API EH		0,46	0,46	0,46
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0432557	0,0373659	0,0365929
	SHOT DENSITY		5	5	5
	PURE		0	0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0	0
	std Chg Load Len		20	20	20
	Standoff		0	0	0
	API PEN		34,58	34,58	34,58
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME				
	SCREEN DIAMETER				
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE				
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.2.4. Densidad de disparo

En el caso base se tiene una densidad de disparo de 5 tiros por pie, para comparar el efecto de la densidad de disparo con la relación de productividad y eficiencia del sistema, se varió por densidades de disparo mayor y menor a la establecida en este caso base Wireline, dichas densidades fueron de 8 y 3 tiros por pie respectivamente.

Tabla 14. Datos de entrada técnica Wireline variando la Densidad de disparo.

GUN SYSTEM			CASO BASE WL	TPP 8	TPP3
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			4- 1/2 HSD 60,5	4- 1/2 HSD 60,8	4- 1/2 HSD 60,3
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II RDX	51B HJ II RDX
GUN SYSTEM #1	PASHING (deg)		60	60	60
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
	GUN POSITION	POSITIONED			
		CENTERED	x	x	x
		ECCENTERED			
	ROTATION OFFSET		0	0	0
	GUN SYSTEM		4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		37	37	37
	API EH		0,46	0,46	0,46
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0432557	0,0373113	0,0373113
	SHOT DENSITY		5	8	3
	PURE		0	0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0	0
	std Chg Load Len		20	20	20
	Standoff		0	0	0
	API PEN		34,58	34,58	34,58
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME				
	SCREEN DIAMETER				
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE				
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.3. DATOS DE ENTRADA TCP VARIANDO LOS PARÁMETROS DE LA SECCIÓN GUN SYSTEM

La técnica Tubing Conveyed Perforating fue evaluada igualmente variando los parámetros geométricos del caso base TCP, el cual se diferencia del caso base Wireline sólo por el diámetro del cañón. El diámetro de cañón usado en la técnica Wireline fue de 4^{1/2} ", mientras que el diámetro del cañón usado en TCP fue de 5" ya que esta técnica permite usar cañones de mayor diámetro, también cargas de alta penetración y alta densidad de disparo; pero sólo se varió el diámetro del cañón pues lo que se pretende es dejar los diseños básicos de ambas técnicas lo más similares posibles, para tener un punto de comparación entre estas y así variar los parámetros geométricos de ambas técnicas en las mismas proporciones.

A fin de evaluar la efectividad de la técnica TCP y compararla con la técnica Wireline, se modificaron parámetros geométricos del cañoneo tales como: densidad de disparo, ángulo de fase, carga jet y presión diferencial, con valores por encima y por debajo de los valores establecidos en el caso base TCP.

5.3.1. Presión diferencial

Con el fin de observar como la presión diferencial influía en la eficiencia del cañoneo, se tomaron valores de presión diferencial por debajo y por encima de la presión establecida en el caso base TCP, dichos valores fueron:

- Overbalance = 1000 psi
- Underbalance = - 2000 psi

Tabla 15. Datos de entrada técnica TCP variando la presión diferencial de desbalance.

GUN SYSTEM			CASO BASE TCP	OVERBALANCE	UNDERBALANCE
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			5 HSD 60,5	5 HSD 60,5	5 HSD 60,5
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II RDX	51B HJ II RDX
GUN SYSTEM #1	PASHING (deg)		60	60	60
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
GUN POSITION	POSITIONED				
	CENTERED		x	x	x
	ECCENTERED				
ROTATION OFFSET		0	0	0	
GUN SYSTEM			5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
CHARGE WEIGHT			37	37	37
API EH			0,47	0,47	0,47
HARDWARE TYPE			STANDARD	STANDARD	STANDARD
COMP. TYPE			Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
CRUSHED kc/k			0,0360162	0,0283341	0,0786813
SHOT DENSITY			5	5	5
PURE			0	0	0
TOP SHOT DELTA			0	0	0
std Chg Load Len			20	20	20
Standoff			0	0	0
API PEN			33,42	33,42	33,42
PEN MODEL			CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
GRAVEL VOLUME					
SCREEN DIAMETER					
CRUSH THICKNESS			0,5	0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE				
BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB		0	1000	-2000

Fuente: Autores del proyecto

5.3.2. Carga Jet

Para determinar el efecto que genera la carga en la eficiencia del sistema de cañoneo, se cambió la carga jet tipo 51B JH II RDX utilizada en el caso base TCP, por una carga tipo 51B HJ II HMX.

Tabla 16. Datos de entrada técnica TCP variando la Carga Jet.

GUN SYSTEM			CASO BASE TCP	CARGA
# OF GUN SYSTEMS			1	1
GUN TYPE			5 HSD 60,5	5 HSD 60,5
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II HMX
GUN SYSTEM # 1	PASHING (deg)		60	60
	OPEN PERFS. (%)		100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0
	STRING LENGTH		20	20
	GUN POSITION	POSITIONED		
		CENTERED	x	x
		ECCENTERED		
	ROTATION OFFSET		0	0
	GUN SYSTEM		5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	5" HSD, 51B HyperJet II, HMX
	CHARGE WEIGHT		37	37
	API EH		0,47	0,44
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0360162	0,0378131
	SHOT DENSITY		5	5
	PURE		0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0
	std Chg Load Len		20	20
	Standoff		0	0
	API PEN		33,42	30,1
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME			
	SCREEN DIAMETER			
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE			
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+C	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.3.3. Ángulo de fase

Igualmente se varió el ángulo de fase del caso base TCP, el cual era de 60 grados por ángulos de fase mayor y menos que este, los cuales fueron respectivamente de 72 y 45 grados, esto con el fin de determinar como la variación de el ángulo de fase en el diseño afecta la relación de productividad y eficiencia del sistema de cañoneo.

Tabla 17. Datos de entrada técnica TCP variando el Ángulo de Fase.

GUN SYSTEM			CASO BASE TCP	FASE 72	FASE 45
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			5 HSD 60,5	5 HSD 72,5	5 HSD 45,5
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II RDX	51B HJ II RDX
GUN SYSTEM #1	PASHING (deg)		60	72	45
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
	GUN POSITION	POSITIONED			
		CENTERED	x	x	x
		ECCENTERED			
	ROTATION OFFSET		0	0	0
	GUN SYSTEM		5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		37	37	37
	API EH		0,47	0,47	0,47
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0360162	0,0360162	0,0360162
	SHOT DENSITY		5	5	5
	PURE		0	0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0	0
	std Chg Load Len		20	20	20
	Standoff		0	0	0
	API PEN		33,42	33,42	33,42
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME				
	SCREEN DIAMETER				
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE				
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.3.4. Densidad de disparo

En el caso base se tiene una densidad de disparo de 5 tiros por pie, para comparar el efecto de la densidad de disparo con la relación de productividad y eficiencia del sistema, se varió por densidades de disparo mayor y menor a la establecida en este caso base TCP, dichas densidades fueron de 8 y 3 tiros por pie respectivamente.

Tabla 18. Datos de entrada técnica TCP variando la Densidad de disparo.

GUN SYSTEM			CASO BASE TCP	TPP 8	TPP 3
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			5 HSD 60,5	5 HSD 60,8	5 HSD 60,3
CHARGE TYPE			51B HJ II RDX	51B HJ II RDX	51B HJ II RDX
GUN SYSTEM #1	PASHING (deg)		60	60	60
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
	GUN POSITION	POSITIONED			
		CENTERED	x	x	x
		ECCENTERED			
	ROTATION OFFSET		0	0	0
	GUN SYSTEM		5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		37	37	37
	API EH		0,47	0,47	0,47
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0360162	0,0360162	0,0360162
	SHOT DENSITY		5	8	3
	PURE		0	0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0	0
	std Chg Load Len		20	20	20
	Standoff		0	0	0
	API PEN		33,42	33,42	33,42
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME				
	SCREEN DIAMETER				
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE				
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.4. DATOS DE ENTRADA CASO TCP MEJORADO VARIANDO LOS PARÁMETROS DE LA SECCIÓN GUN SYSTEM

Se realizó una tercera corrida con la técnica de cañoneo TCP, a diferencia de las corridas anteriores no se guardaron los mismos parámetros bases que se venían trabajando, es decir, los parámetros geométricos como: la densidad de disparo, ángulo de fase, carga jet y presión diferencial, para el caso base TCP Mejorado son completamente diferentes que los de los casos bases WL y TCP.

5.4.1. Presión Diferencial.

Con el fin de observar como la presión diferencial influía en la eficiencia del cañoneo, se tomaron valores de presión diferencial por debajo y por encima de la presión establecida en el caso base TCP Mejorado, dichos valores fueron:

- Overbalance = 1000 psi
- Underbalance = - 2000 psi

Tabla 19. Datos de entrada técnica TCP MEJORADO Variando la presión diferencial de desbalance.

GUN SYSTEM			CASO BASE TCP MEJORADO	OVERBALANCE	UNDERBALANCE
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			6 HSD 120,12	6 HSD 120,12	6 HSD 120,12
CHARGE TYPE			41B HJ II RDX	41B HJ II RDX	41B HJ II RDX
GUN SYSTEM #1	PASHING (deg)		120	120	120
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
	GUN POSITION	POSITIONED			
		CENTERED	x	x	x
		ECCENTERED			
	ROTATION OFFSET		0	0	0
	GUN SYSTEM		6" HSD, 41B HyperJet II, RDX	6" HSD, 41B HyperJet II, RDX	6" HSD, 41B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		22	22	22
	API EH		0,38	0,38	0,38
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0540429	0,042729	0,114879
	SHOT DENSITY		12	12	12
	PURE		0	0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0	0
	std Chg Load Len		20	20	20
	Standoff		0	0	0
	API PEN		21,07	21,07	21,07
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME				
	SCREEN DIAMETER				
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE				
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	1000	-2000

Fuente: Autores del proyecto

5.4.2. Carga Jet

Para determinar el efecto que genera la carga en la eficiencia del sistema de cañoneo, se cambió la carga jet tipo 41B JH II RDX por una carga tipo 41B HJ II HMX.

Tabla 20. Datos de entrada técnica TCP MEJORADO Variando la Carga Jet.

GUN SYSTEM			CASO BASE TCP MEJORADO	CARGA
# OF GUN SYSTEMS			1	1
GUN TYPE			6 HSD 120,12	6 HSD 120,12
CHARGE TYPE			41B HJ II RDX	41B HJ II HMX
GUN SYSTEM # 1	PASHING (deg)		120	120
	OPEN PERFS. (%)		100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0
	STRING LENGTH		20	20
	GUN POSITION	POSITIONED		
		CENTERED	x	x
		ECCENTERED		
	ROTATION OFFSET		0	0
	GUN SYSTEM		6" HSD, 41B HyperJet II, RDX	6" HSD, 41B HyperJet II, HMX
	CHARGE WEIGHT		22	22
	API EH		0,38	0,4
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0540429	0,0513161
	SHOT DENSITY		12	12
	PURE		0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0
	std Chg Load Len		20	20
	Standoff		0	0
	API PEN		21,07	20,4
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME			
	SCREEN DIAMETER			
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE			
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.4.3. Ángulo de fase

Igualmente se varió el ángulo de fase del caso base TCP Mejorado, el cual era de 120 grados por ángulos de fase mayor y menos que éste, los cuales fueron respectivamente de 180 y 90 grados, esto con el fin de determinar como la variación de el ángulo de fase en el diseño afecta la relación de productividad y eficiencia del sistema de cañoneo.

Tabla 21. Datos de entrada técnica TCP MEJORADO Variando el Ángulo de fase.

GUN SYSTEM			CASO BASE TCP MEJORADO	FASE 90	FASE 180
# OF GUN SYSTEMS			1	1	1
GUN TYPE			6 HSD 120,12	6 HSD 90,12	6 HSD 180,12
CHARGE TYPE			41B HJ II RDX	41B HJ II RDX	41B HJ II RDX
GUN SYSTEM # 1	PASHING (deg)		120	90	180
	OPEN PERFS. (%)		100	100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0	0
	STRING LENGTH		20	20	20
	GUN POSITION	POSITIONED			
		CENTERED	x	x	x
		ECCENTERED			
	ROTATION OFFSET		0	0	0
	GUN SYSTEM		6" HSD, 41B HyperJet II, RDX	6" HSD, 41B HyperJet II, RDX	6" HSD, 41B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		22	22	22
	API EH		0,38	0,38	0,38
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0540429	0,0540429	0,0540429
	SHOT DENSITY		12	12	12
	PURE		0	0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0	0
	std Chg Load Len		20	20	20
	Standoff		0	0	0
	API PEN		21,07	21,07	21,07
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME				
	SCREEN DIAMETER				
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE				
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.4.4. Densidad de disparo

En el caso base se tiene una densidad de disparo de 12 tiros por pie, para comparar el efecto de la densidad de disparo con la relación de productividad y eficiencia del sistema, se tomo una densidad de disparo de 9 tiros por pie.

Tabla 22. Datos de entrada técnica TCP MEJORADO Variando la Densidad de disparo.

GUN SYSTEM			CASO BASE CTP MEJORADO	TIROS POR PIE
# OF GUN SYSTEMS			1	1
GUN TYPE			6 HSD 120,12	6 HSD 120,9
CHARGE TYPE			41B HJ II RDX	41B HJ II RDX
GUN SYSTEM # 1	PASHING (deg)		120	120
	OPEN PERFS. (%)		100	100
	GUN TOP DELTA (ft)		0	0
	STRING LENGTH		20	20
	GUN POSITION	POSITIONED		
		CENTERED	x	x
		ECCENTERED		
	ROTATION OFFSET		0	0
	GUN SYSTEM		6" HSD, 41B HyperJet II, RDX	6" HSD, 41B HyperJet II, RDX
	CHARGE WEIGHT		22	22
	API EH		0,38	0,38
	HARDWARE TYPE		STANDARD	STANDARD
	COMP. TYPE		Perf, Open	Perf, Open
	CRUSHED kc/k		0,0540429	0,0540429
	SHOT DENSITY		12	9
	PURE		0	0
	TOP SHOT DELTA		0	0
	std Chg Load Len		20	20
	Standoff		0	0
	API PEN		21,07	21,07
	PEN MODEL		CONCRETE BASED API SECT 1	CONCRETE BASED API SECT 1
	GRAVEL VOLUME			
	SCREEN DIAMETER			
	CRUSH THICKNESS		0,5	0,5
UNDERBALANCE CONTIDIONS	NONE			
	BERHMAN STATIC	Static -UB/+OB	0	0

Fuente: Autores del proyecto

5.5. ANÁLISIS DE GRÁFICAS

Después de haber fijado los datos de entrada al simulador necesarios para llevar a cabo la respectiva simulación de los diseños de cañoneo que se propusieron, como resultado de estas corridas se generan diferentes gráficas las cuales van a ser analizadas a continuación.

Para el análisis de las gráficas se debe tener en cuenta lo siguiente:

- En cada gráfica aparecen 3 líneas de diferente color, la línea color azul clara representa el resultado de la simulación del diseño propuesto, la línea azul oscura es establecida por el programa SPAN donde las perforaciones a hueco abierto se realizan sin daño y línea color café es la zona donde las perforaciones a hueco abierto producen un daño.
- Las gráficas mostradas corresponden a las corridas de los casos bases Wireline, TCP y TCP Mejorado, las cuales se pueden ver en los anexos A, B Y C.

5.5.1. Productivity index Vs Effective shot density

En esta gráfica se observa el índice de productividad con respecto a la efectividad con la que se realizaron los disparos. En la sección de GUN SYSTEM se estableció que OPEN PERFS.= 100% (PERFORACIONES ABIERTAS), esto quiere decir que todos los disparos simulados se realizaron de forma exitosa, por ejemplo para la simulación del caso base en la técnica wireline se estableció una densidad de disparo de 5 TPP al establecer OPEN PERFS.= 100% el simulador va a realizar los 5 TPP con éxito, si esta opción en el simulador fuese de OPEN PERFS. = 80%, y aún así se establezcan 5 TPP en los datos de entrada al simulador los disparos con éxito que este va a generar serían 4 TPP. Para todas las simulaciones realizadas, estas gráficas tienen una tendencia similar, es decir

que a medida que la efectividad del disparo sea mayor, el índice de productividad es mayor y viceversa

5.5.2. Productivity index Vs Damage zone

En la gráfica de índice de productividad Vs zona dañada se observa claramente que al tener una zona con menos daño el índice de productividad aumenta, la zona de daño se establece como dato de entrada al simulador, lo que infiere que esta zona no cambia al variar los parámetros geométricos del cañoneo, pues hace referencia a la zona dañada debido a las operaciones de perforación del pozo; ahora pues la razón por la cual las perforaciones tienen un mayor o menor índice de productividad al cañonear depende principalmente de la presión diferencial que se fija en el diseño como también de la densidad de disparo, generalmente una presión de desbalance a favor de la formación (Underbalance) ocasiona un mayor índice de productividad, más adelante este fenómeno será explicado con detalle.

5.5.3. Productivity index Vs Damage zone K_d/K

La gráfica de índice de productividad Vs relación de permeabilidad en la zona dañada tiene el mismo comportamiento que se presentan en la gráfica anteriormente mencionada, nótese que la relación de permeabilidad K_d/K debe ser igual a 1 para que en la zona de daño la permeabilidad de ésta sea igual a la permeabilidad en la zona virgen; entre más cerca la relación de permeabilidad se encuentre de 1, el diseño se aproxima al comportamiento de un pozo completado a hueco abierto sin daño.

5.5.4. Productivity index Vs Crushed zone Kc/K

La relación K_c/K es la permeabilidad en la zona compactada sobre la permeabilidad en la zona virgen después de realizar la operación de cañoneo, es decir que esta relación mide el impacto que tiene la explosión sobre la zona cañoneada; si esta relación de permeabilidad es igual a 1 significa que sobre la zona impactada no se genera ningún daño gracias al disparo y al contrario de ocasionar algún daño en este caso habría estimulación del pozo por fracturamiento, pues como se puede observar claramente en la gráfica, si la relación es igual a 1 el índice de productividad del diseño será mayor que el índice de productividad de un completamiento a hueco abierto sin daño.

Es importante mencionar que el tipo de carga es un factor principal sobre el efecto en la zona compactada ya que dependiendo del tipo de carga que se utilice en el momento de plantear el diseño, el impacto sobre la zona puede ser mayor o menor sin importar la técnica que se decida trabajar.

5.5.5. Productivity index Vs Well deviation

Aunque el diseño que se realizó fue para un pozo vertical, esta gráfica muestra según la tendencia de la línea que a medida que aumenta los grados con respecto a la vertical en caso que el pozo sea desviado u horizontal el índice de productividad tiende a aumentar.

5.5.6. Depth Pwf Vs Flow Rate (IPR)

El potencial de producción que tiene un yacimiento es un factor importante para cualquier proyecto de ingeniería de petróleo, es por esto que este trabajo de grado se enfoca en analizar que técnica de cañoneo es más recomendable utilizar según las características de un yacimiento, en estas gráficas se observa la producción que puede llegar a tener un pozo a medida que la presión de fondo fluyendo disminuye.

Las gráficas de IPR generadas por el simulador corresponden a un yacimiento sobresaturado, las condiciones iniciales de presión y temperatura de éste fueron calculadas por el simulador y están por debajo del punto de burbuja, respectivamente son $P_i = 2234$ psi, $P_b = 10458$ psi, es decir que el yacimiento está inicialmente en dos fases, la presión de fondo fluyendo fue introducida como dato de entrada al simulador $P_{wf} = 2200$ psi.

El comportamiento de cada una de estas graficas depende principalmente de los parámetros geométricos del cañoneo más que de la técnica que se llegue a emplear, pues como se puede ver en las dos corridas que se realizaron por la técnica TCP se obtuvieron valores de AOF mayor y menor que la realizada por la técnica Wireline, es decir, que no siempre la técnica TCP es la que va a producir un mayor potencial de pozo; de aquí el parámetro que más influye en el potencial de producción de un pozo, es la presión diferencial de desbalance a favor de la formación, aunque los demás parámetros geométricos también forman parte esencial en el comportamiento del pozo, este parámetro en sí predomina pues al tener una presión diferencial a favor de la formación se obtienen perforaciones más limpias que facilitan el flujo desde el yacimiento hacia el pozo.

5.5.7. Productivity index Vs Rock Strength

La tendencia de la línea muestra como el índice de productividad disminuye a medida que la resistencia de la roca aumenta, por tanto la presión ejercida por el disparo debe ser más fuerte para poder penetrar la roca con éxito.

El comportamiento del daño y el índice de productividad para cada simulación se mantienen, obteniendo mejor índice de productividad y menor daño con una densidad de disparo alta y un desbalance de presión a favor de la formación.

5.5.8. Penetration index Vs Rock Strength

En general la penetración contra la resistencia de la roca tiende a disminuir a medida que la roca es más fuerte, para todos los casos de wireline la penetración promedio de los disparos tiene una magnitud de 21,96 (in) , para la técnica TCP la penetración tiene una magnitud de 21,59 (in) y para la técnica TCP MEJORADO tiene una magnitud de 14,59 (in), aunque el cambio es mínimo con respecto al caso TCP la longitud de penetración es mayor en la técnica por Wireline, ahora se debe tener en cuenta que la resistencia de la roca en este estudio es la misma para todas las corridas, entonces la longitud de penetración en el estudio no sólo depende de la resistencia de la roca también depende de los parámetros geométricos y de la técnica que se vaya a utilizar con estos.

5.5.9. Optimum Underbalance Vs Permeability and Porosity

Esta gráfica permite observar de acuerdo a la permeabilidad y porosidad que posee la formación cual es el desbalance de presión óptimo a favor de la formación con el que se debe realizar la operación de cañoneo, al tener este valor preciso de desbalance el índice de productividad se puede optimizar.

5.5.10. Crushed zone K_c/K Vs Static Underbalance Pressure y Productivity index Vs Static Underbalance Pressure

El valor de Presión de Desbalance definido por el usuario debe ser preciso para obtener un mejor índice de productividad, al analizar la tendencia de este parámetro en estas dos gráficas se observa que con un desbalance de presión a favor de la formación la relación de permeabilidad se aproxima a 1 por tanto el índice de productividad incrementa y con un desbalance de presión en contra de la formación se genera más daño a la formación y por consiguiente se obtiene un menor índice de productividad.

5.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados arrojados por el simulador corresponden a tres corridas básicas, la primera corrida se realizó por la técnica de cañoneo Wireline después de tener fijada la corrida base a ésta se le modificaron los parámetros geométricos del cañoneo tales como: Presión diferencial de desbalance, carga jet, densidad de disparo y ángulo de fase, generando así 7 corridas más por wireline, después se realizó una segunda corrida base usando la técnica TCP en esta corrida se procuró dejar el diseño del cañoneo lo más similar al hecho por Wireline todo con el fin de tener un punto de comparación para evaluar la efectividad de cada técnica, el único parámetro de diseño que se cambió desde un inicio fue el diámetro del cañón en la técnica TCP, ya que esta técnica permite usar diámetros de cañones más grandes, igualmente se hicieron 7 corridas más variando los parámetros geométricos de cañoneo, finalmente se realizó la tercera corrida por TCP la cual se llama TCP MEJORADO, este diseño fue modificado desde el inicio de la primera corrida a diferencia del diseño anterior en el cual se mantenía el diseño muy similar al efectuado por Wireline, así mismo se generaron 7 corridas más, variando los parámetros geométricos del cañoneo de este diseño.

Los resultados obtenidos de estas simulaciones fueron agrupados y graficados con el fin de comparar una técnica y diseño de cañoneo con otra, el primer análisis se le realiza a la técnica por Wireline y TCP, el segundo a la técnica Wireline y TCP Mejorado, los datos de salida que se graficaron fueron: Crush Zone Kc/K, Formation Penetration Average, Formation Diameter Average, Perforation Skin, Crush Zone Skin, Productivity Relation, Productivity index, Flow Rate, Absolute Open Flow.

Tabla 23. Nomenclatura Tablas y Gráficas.

NOMENCLATURA TABLAS Y GRAFICAS	
SIGLAS	SIGNIFICADO
BC (WL)	BASIC CASE WIRELINE
OB (WL)	OVERBALANCED PRESSURE WIRELINE (1000 PSI)
UB (WL)	UNDER BALANCED PRESSURE WIRELINE (-2000 PSI)
CH (WL)	CHARGE WIRELINE (51B HJII HMX)
AP H (WL)	ANGLE PHASE HIGHER WIRELINE (72°)
AP L (WL)	ANGLE PHASE LOWER WIRELINE (45°)
SDH (WL)	SHOT DENSITY HIGHER WIRELINE (8TPP)
SDL (WL)	SHOT DENSITY LOWER WIRELINE (3TPP)
BC (TCP)	BASIC CASE TUBING CONVEYED PERFORATING
OB (TCP)	OVERBALANCED PRESSURE TUBING CONVEYED PERFORATING (1000 PSI)
UB (TCP)	UNDER BALANCED PRESSURE TUBING CONVEYED PERFORATING (-2000 PSI)
CH (TCP)	CHARGE TUBING CONVEYED PERFORATING (51B HJII HMX)
AP H (TCP)	ANGLE PHASE HIGHER TUBING CONVEYED PERFORATING (72°)
AP L (TCP)	ANGLE PHASE LOWER TUBING CONVEYED PERFORATING (45°)
SDH (TCP)	SHOT DENSITY HIGHER TUBING CONVEYED PERFORATING (8TPP)
SDL (TCP)	SHOT DENSITY LOWER TUBING CONVEYED PERFORATING (3TPP)
BC (TCPM)	BASIC CASE TUBING CONVEYED PERFORATING ENHANCED
OB (TCPM)	OVERBALANCED PRESSURE TUBING CONVEYED PERFORATING ENHANCED (1000 PSI)
UB (TCPM)	UNDER BALANCED PRESSURE TUBING CONVEYED PERFORATING ENHANCED (-2000 PSI)
CH (TCPM)	CHARGE TUBING CONVEYED PERFORATING ENHANCED (41B HJII HMX)
AP H (TCPM)	ANGLE PHASE HIGHER TUBING CONVEYED PERFORATING ENHANCED (180°)
AP L (TCPM)	ANGLE PHASE LOWER TUBING CONVEYED PERFORATING ENHANCED (90°)
SDL (TCPM)	SHOT DENSITY LOWER TUBING CONVEYED PERFORATING ENHANCED (9TPP)

Fuente: Autores

5.6.1. Análisis a partir de la penetración del disparo (si los disparos sobrepasaron o no la zona de daño de formación por invasión en el pozo)

Se considera efectiva en un principio la operación de cañoneo siempre que el radio de penetración del disparo sea mayor que el radio de daño de formación por invasión del pozo, este criterio se debe a que la penetración más allá de la zona de daño es relevante para mejorar la Relación de Productividad.

- **Cálculo del radio de invasión**

Como se mencionó en capítulos anteriores para calcular el radio de invasión en la zona dañada se utilizará la ecuación de Hawkins:

$$r_s = r_w \times e^{\left(\frac{S}{k/k_s - 1}\right)}$$

En este trabajo se considerará una reducción severa de permeabilidad por efectos de invasión representada matemáticamente por una relación k/k_s igual a 10, además el valor de S introducido dentro de esta fórmula corresponde al daño total del pozo.

A continuación se presentara una tabla con cada uno de los valores de radio de invasión calculados para cada caso en estudio.

Tabla 24. Radio de invasión para el caso WRL

WIRE LINE								
	BC (WL)	OB (WL)	UB (WL)	CH (WL)	APH (WL)	APL (WL)	SDH (WL)	SDL (WL)
EFF SKIN	1,86	2,67	0,24	2,46	1,86	1,94	0,48	4,35
rw (in)	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
K/Ks	10	10	10	10	10	10	10	10
rs (in)	5,22568375	5,71780877	4,36485797	5,58593771	5,22568375	5,27234133	4,48282002	6,8912488

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 25. Radio de invasión para el caso TCP

TCP								
	BC (TCP)	OB (TCP)	UB (TCP)	CH (TCP)	APH (TCP)	APL (TCP)	SDH (TCP)	SDL (WL)
EFF SKIN	1,95	2,77	0,31	2,58	1,95	2,03	0,54	4,48
rw (in)	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
K/Ks	10	10	10	10	10	10	10	10
rs (in)	5,27820274	5,78169424	4,39893923	5,66091562	5,27820274	5,32532924	4,51280532	6,99151143

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 26. Radio de invasión TCP MEJORADO

TCP MEJORADO							
	BC (TCPM)	OB (TCPM)	UB (TCPM)	CH (TCPM)	APH (TCPM)	APL (TCPM)	SDL (TCPM)
EFF SKIN	1,02	1,46	0,13	1,16	0,8	1,2	1,68
rw (in)	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25	4,25
K/Ks	10	10	10	10	10	10	10
rs (in)	4,76002212	4,99851668	4,3118344	4,83464581	4,64507664	4,85618095	5,12220827

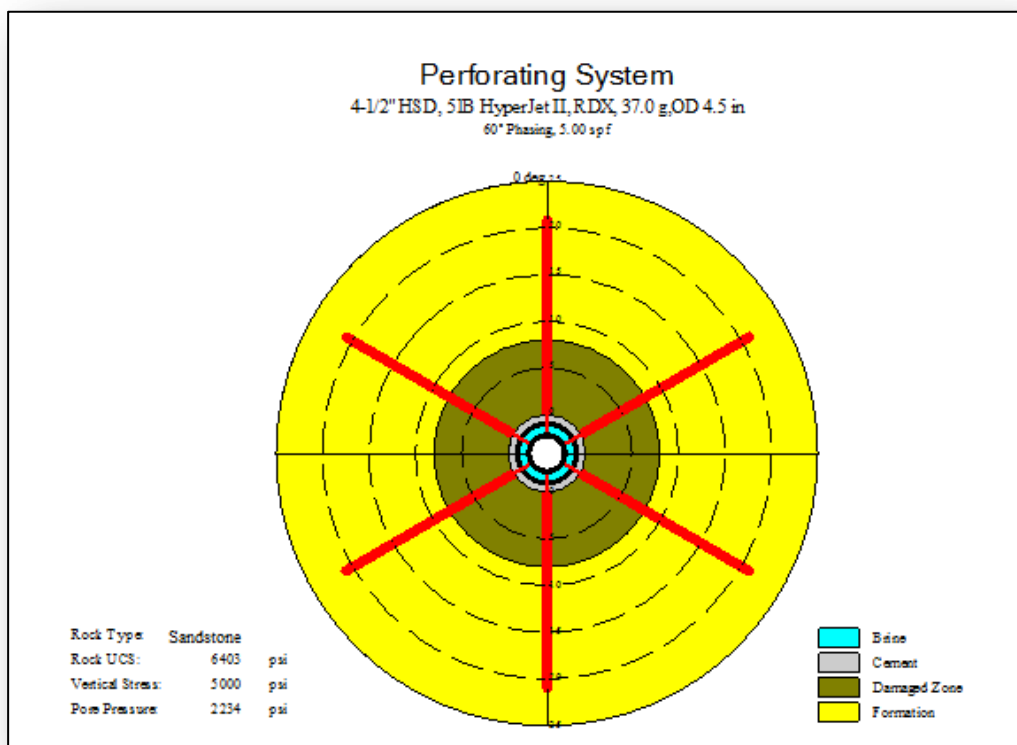
Fuente: Autores del proyecto

Para considerar si la operación de cañoneo fue efectiva o no, se comparó los valores de penetración de la formación obtenidos de la simulación por medio del software SPAN con los valores calculados de radio de invasión.

Las siguientes figuras corresponden a la penetración para cada caso base, las demás corridas se muestran en los anexos A, B y C, también se gráfico el radio de invasión calculado Vs la longitud de penetración de la formación para cada uno de los casos propuestos de diseño.

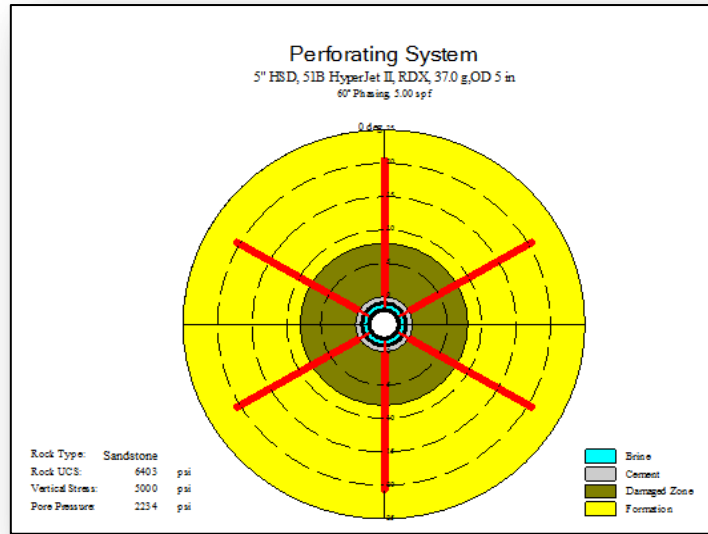
- **Valores de penetración obtenidos del SPAN.**

Figura 33. Penetración de la formación Caso Base WL



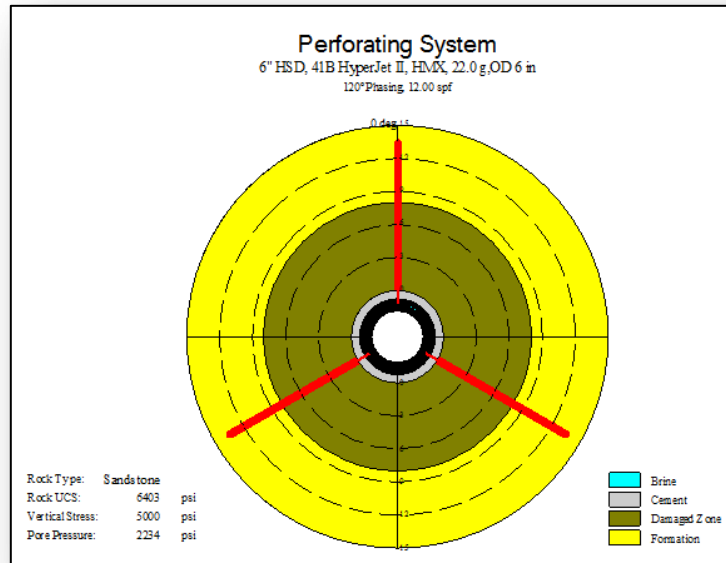
Fuente: System Perforating Analysis SPAN 9.5

Figura 34. Penetración de la formación caso base TCP



Fuente: System Perforating Analysis SPAN 9.5

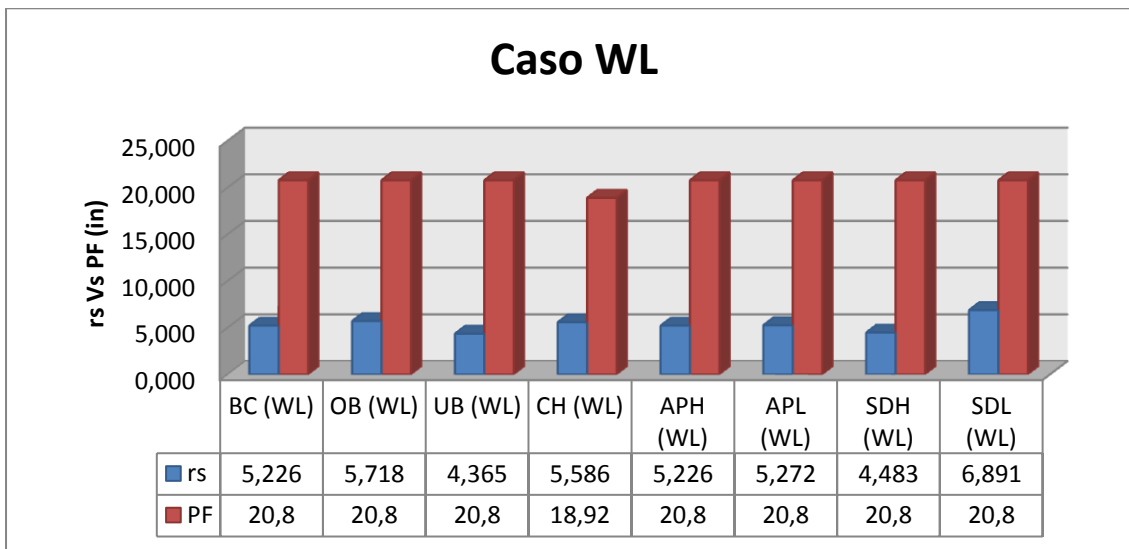
Figura 35. Penetración de la formación caso base TCP MEJORADO



Fuente: System Perforating Analysis SPAN 9.5

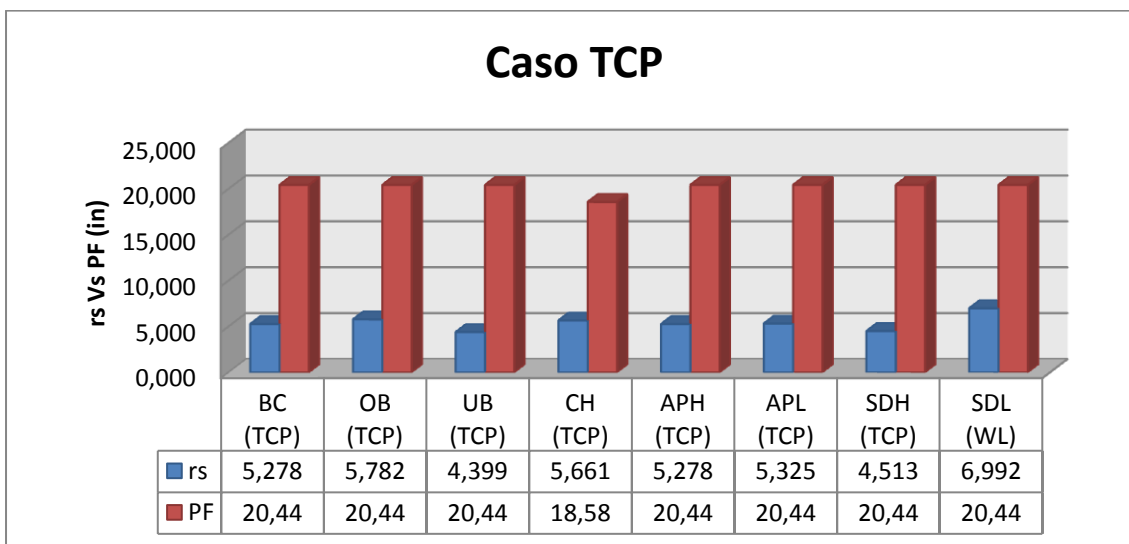
- Comparación Radio de Invasión Vs Penetración de la Formación para los caso Wireline, TCP y TCP MEJORADO.

Figura 36. Radio de Invasión Vs Penetración de la formación caso Wireline



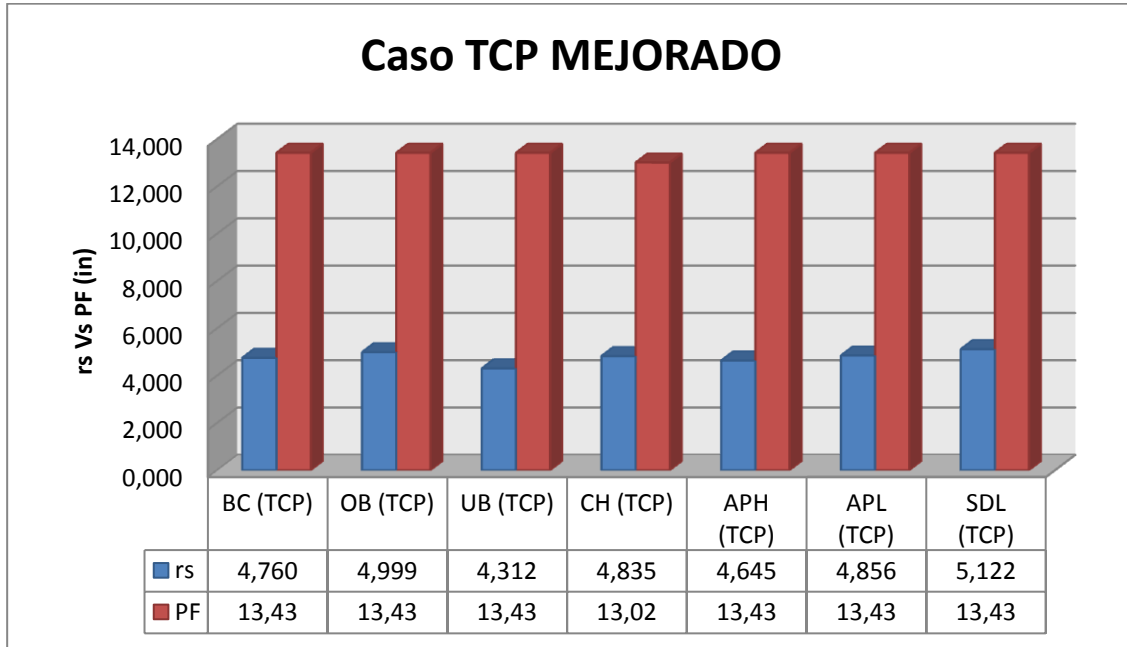
Fuente: Autores del proyecto

Figura 38. Radio de Invasión Vs Penetración de la formación caso TCP.



Fuente: Autores del proyecto

Figura 37. Radio de Invasión Vs Penetración de la formación caso TCP MEJORADO.



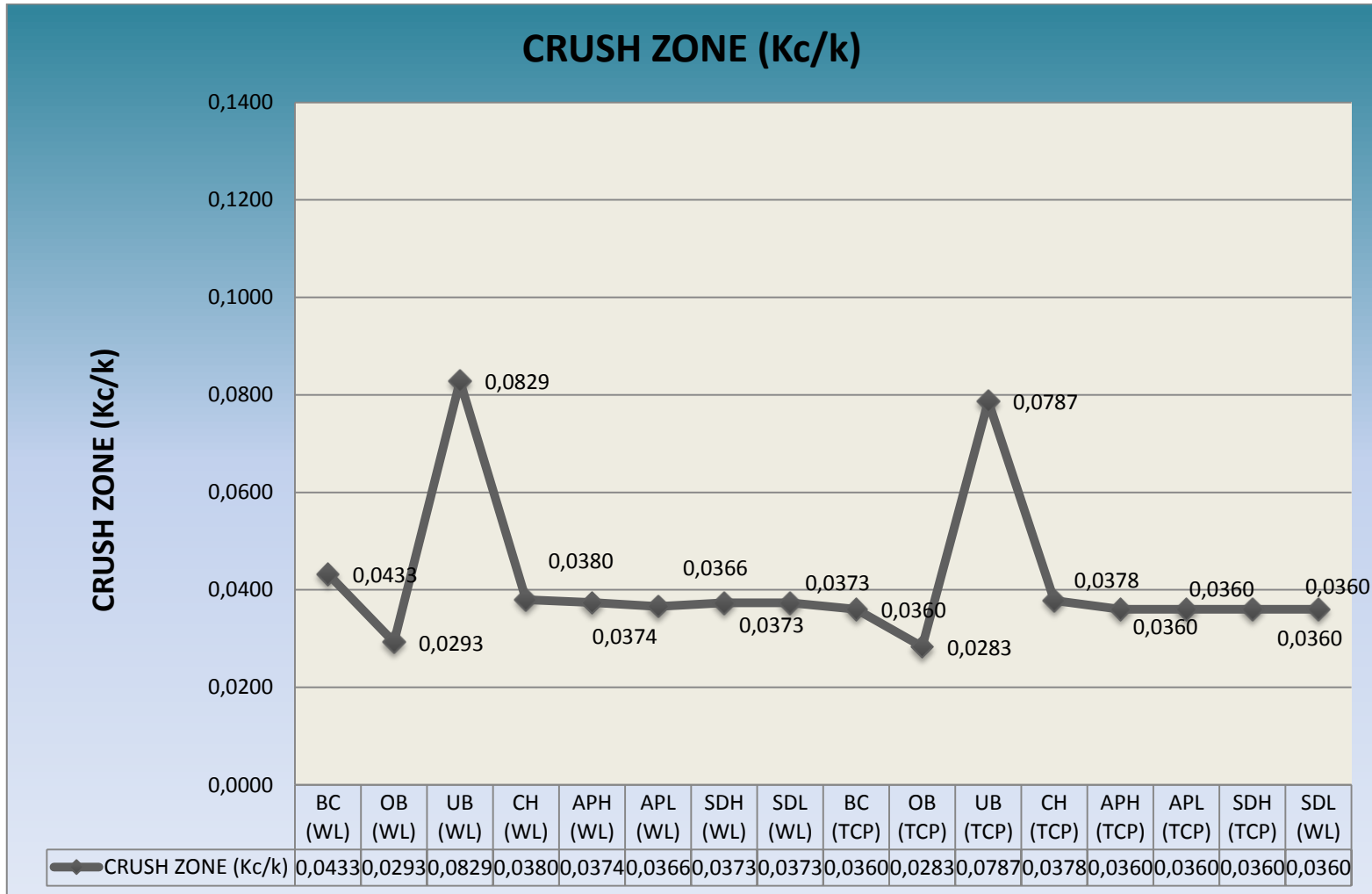
Fuente: Autores del proyecto

Claramente se puede observar en cada una de estas gráficas que se cumple con el criterio anteriormente mencionado, por lo tanto se puede decir que los diseños de cañoneo propuestos para el análisis fueron efectivos.

5.6.2. Análisis a partir de la variación de los parámetros geométricos de las técnicas Wireline y TCP

El criterio de efectividad es importante mencionarlo, sin embargo el objetivo de este trabajo de grado es determinar que parámetros geométricos del cañoneo influyen más en la productividad de un pozo, por lo cual a continuación se va a comparar la técnica de cañoneo Wireline con TCP, a partir de los datos obtenidos de la variación los parámetros geométricos del cañoneo por el simulador SPAN.

Figura 39. Relación de permeabilidad en la zona compactada y en la zona virgen CRUSH ZONE Kc/K



Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **CRUSH ZONE Kc/K**

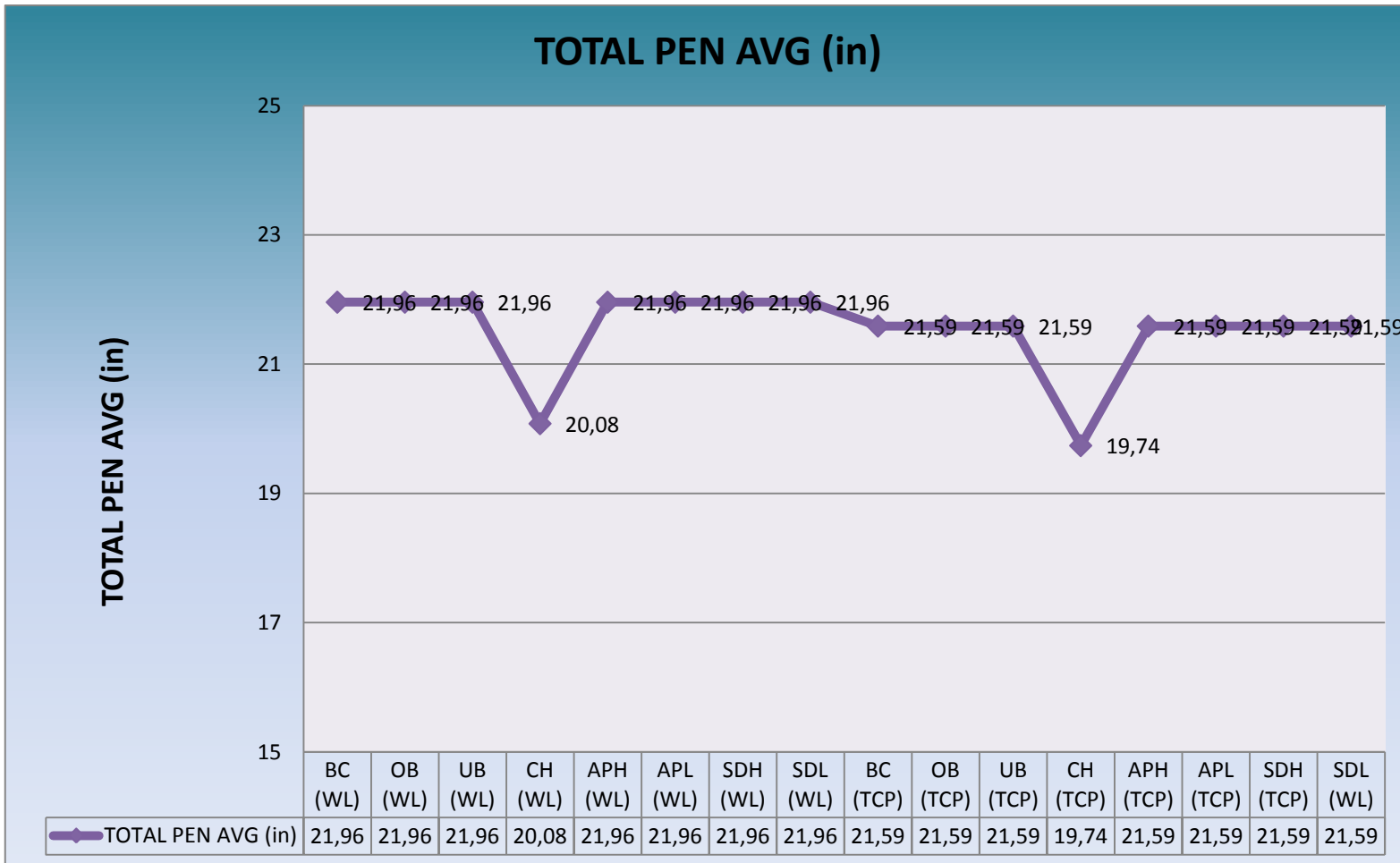
En la gráfica de relación de permeabilidad en la zona compactada para los casos Wireline y TCP se puede observar que para ambos casos el método de cañoneo que produjo una relación de permeabilidad más cercana a 1 que es lo que se pretende, fue el diseño desarrollado por el método de Underbalance y por el contrario el diseño planteado por Overbalance fue el que menor relación de permeabilidad arrojó, los datos exactos para cada caso son: Wireline Underbalance (0,0828584), TCP Underbalance (0,0786813), Wireline Overbalance (0,0292672), TCP Overbalance (0,0283341), estos resultados son prueba de que el método de cañoneo con una presión diferencial a favor de la formación es más óptimo, pues con este método se obtienen los mayores índices de flujo ya que los daños o taponamientos que sufren las perforaciones y la formación por parte del fluido dentro del pozo son mínimos debido a que tan pronto se cañonea la formación fluye a través de ellas evitando la invasión del fluido del pozo, sin embargo que el método por Underbalance sea más óptimo no quiere decir que el método por Overbalance no sea eficiente, pues como se puede ver en los cálculos del radio de invasión en todos los diseños la longitud de penetración sobrepasó la zona invadida por lo que cada diseño fue eficiente.

Ahora lo que se debe analizar es la técnica de cañoneo que se utilizó, pues a simple vista la técnica de cañoneo por Wireline produjo una relación de permeabilidad más alta que la técnica por TCP, cabe recordar que para este estudio, el diseño TCP difiere del diseño Wireline tan sólo por el diámetro del cañón, pues la técnica TCP permite utilizar cañones de mayor diámetro, cargas de alta penetración y alta densidad de disparo, en vista de esto se tomó un diámetro de cañón para la técnica TCP de 5" y Wireline de 4 1/2 " ambos cañones tipo High Shot Density Hollow Carrier, es decir que los demás parámetros de diseño se mantienen para ambos casos,

por tanto los resultados obtenidos se deben a que se está subestimando la capacidad del cañón 5" HSD por la técnica TCP pues se podría utilizar una carga de mayor penetración para este diámetro de cañón, lo que no se está haciendo y por ende la técnica Wireline arroja mejores resultados de relación de permeabilidad en esta corrida.

Con el objetivo de analizar como los demás parámetros geométricos interfieren en la permeabilidad de la zona compactada y la zona virgen, se realizaron variaciones de carga jet, ángulo de fase y densidad de disparo, y aunque los resultados no variaron mucho con respecto a los del caso base de cada diseño, lo contrario a lo sucedido con la presión diferencial del pozo que sí interfiere notoriamente en la relación de permeabilidad, se hicieron los siguientes cambios: se reemplazó la carga 51B HyperJet II RDX por una carga 51B HyperJet II HMX tanto para la técnica Wireline como TCP, como resultado aumenta la relación de permeabilidad de 0.03602 hasta 0.0378 para el caso TCP base y TCP (carga) respectivamente, este resultado se debe a que la carga tipo 51B HyperJet II HMX genera menor reducción de la permeabilidad en la zona compactada ya que este tipo de cargas son de menor penetración entonces el impacto sobre la formación es menor produciendo menos daño, también se cambió el ángulo de fase por encima y por debajo del ángulo de fase de los casos bases para cada técnica, esto redujo la relación de permeabilidad en la técnica Wireline y para la técnica TCP esta relación permanece igual, el mismo efecto genera la densidad de disparo pues para la técnica TCP no hay cambio en la relación de permeabilidad y en Wireline igualmente disminuye, por tanto al desarrollar la técnica Wireline estos dos parámetros deben ser tenidos en cuenta con más detalle en comparación con la técnica TCP.

Figura 40. Longitud de penetración total promedio (in) TOTAL PENETRATION AVERAGE (in)



Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **TOTAL PENETRATION AVERAGE**

El parámetro de cañoneo que más influye en la penetración total promedio es la carga jet, en este estudio como se dijo se reemplazó la carga 51B HyperJet II RDX por una 51B HyperJet II HMX, esta última es una carga de menor penetración por lo cual en estas corridas la longitud de penetración se redujo de 21.96 a 20.08 para la técnica Wireline base y Wireline (carga) respectivamente, igualmente la longitud de penetración se redujo de 21.59 a 19.79 para la técnica TCP base y TCP (Carga) respectivamente, es decir que el cambio de la carga en ambas técnicas reduce la penetración total promedio de la formación.

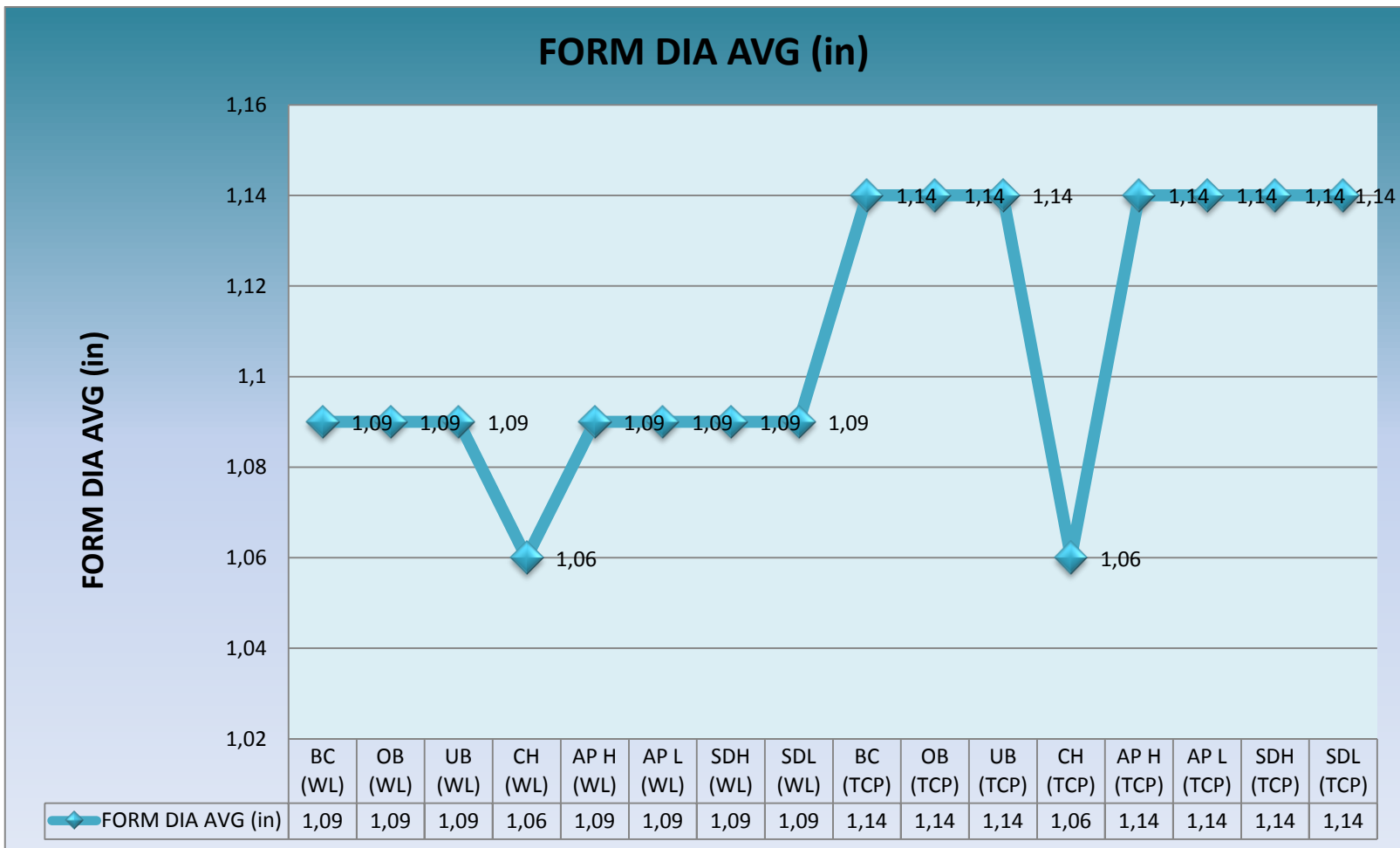
A continuación se muestra la tabla de propiedades generada por las pruebas de laboratorio API hechas para cada carga usadas en este estudio, esta tabla se tomó del Data Summary de la Schlumberger

Tabla 27. Perforating Systems Performance and Mechanical Data Summary

TECNICA	WL	WL CARGA	TCP	TCP CARGA
CAÑÓN TIPO	4(1/2) HSD60.5 (51B HJII RDX)	4(1/2) HSD60.5 (51B HJII HMX)	5 HSD60.5 (51B HJII RDX)	5 HSD60.5 (51B HJII HMX)
Penetration (in)	34.58	31.05	33.42	30.1
Entrance Hole CSG (in)	0.46	0.45	0.47	0.44
Gun Diameter (in)	4.5	4.5	5	5
Burr Height (in)	0.11	0.12	0.11	0.1
Maximum Explosive load (g)	37	37	37	37
Maximum Pressure rating (psi)	12000	1200	1300	1300
Maximun Temperatura (°F)	340	400	340	400

Fuente: Data Summary Schlumberger

Figura 41. Diámetro promedio de la formación (in) FORMATION DIAMETER AVERAGE (in)

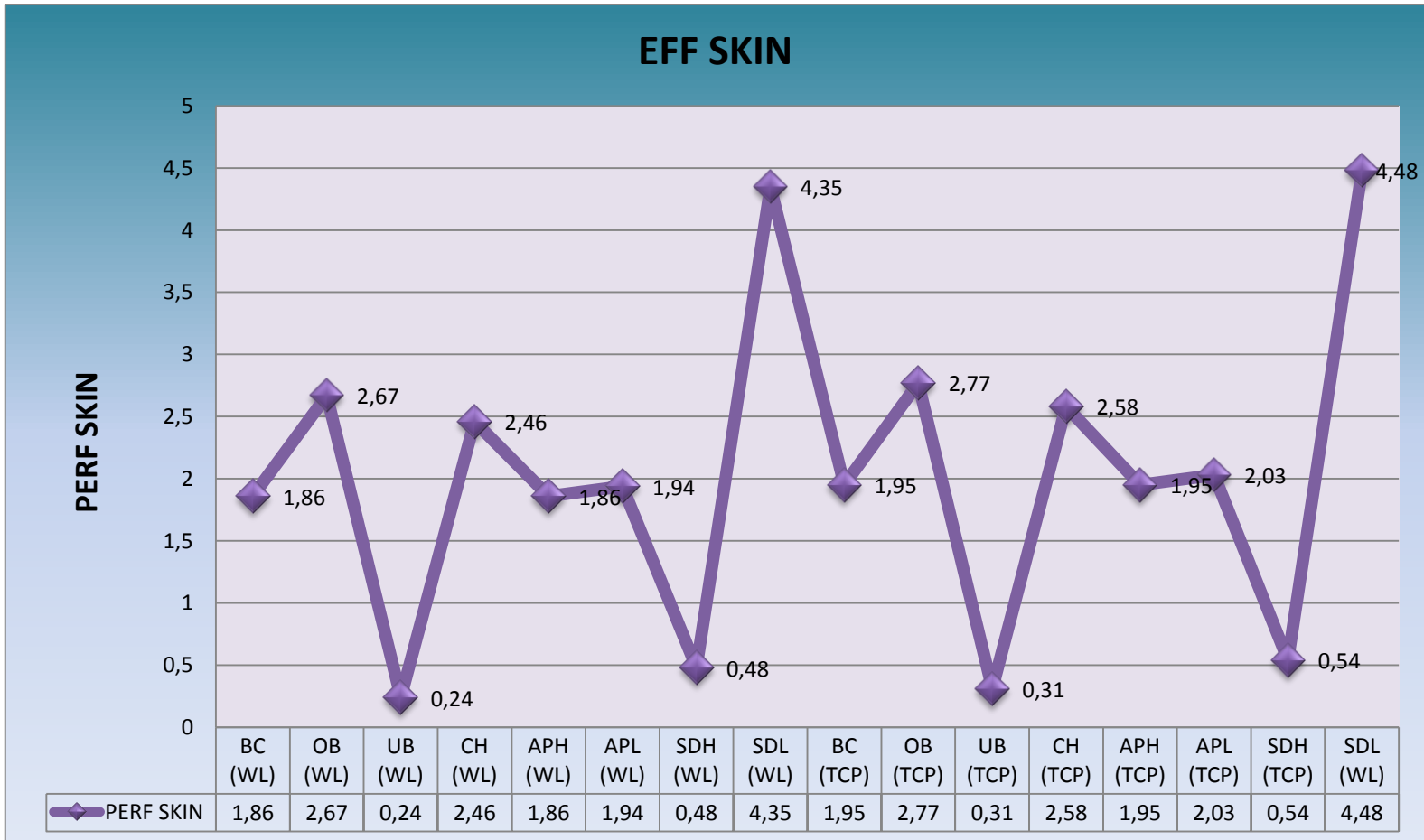


Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **FORMATION DIAMETER AVERAGE**

De la gráfica de diámetro promedio del hueco en la formación se puede analizar que el parámetro de cañoneo más influyente es el tipo de carga jet, en este estudio se cambió la carga 51B HyperJet II RDX por una 51B HyperJet II HMX, esta última reduce el diámetro de entrada a la formación así como en el caso anterior en donde la penetración de la formación se ve reducida debido a que la carga jet 51B HyperJet II HMX es una carga de menor alcance; ahora para esta gráfica es importante analizar que la técnica de cañoneo TCP genera un mayor diámetro de entrada en la formación que la técnica por Wireline, este resultado se debe a que la técnica TCP es realizada bajando los cañones con la tubería de producción al intervalo de interés, generando una mayor estabilidad en el sistema de cañoneo al efectuar el disparo, pues la energía que genera la carga jet es utilizada completamente al penetrar la formación y no es malgastada por el cañón como sucede en la técnica Wireline pues al bajar los cañones por cable estos no están firmemente posicionados por lo que al efectuar la operación cierta parte de la energía requerida para formar el hueco es absorbida por el cañón.

Figura 42. Daño efectivo EFFECTIVE SKIN



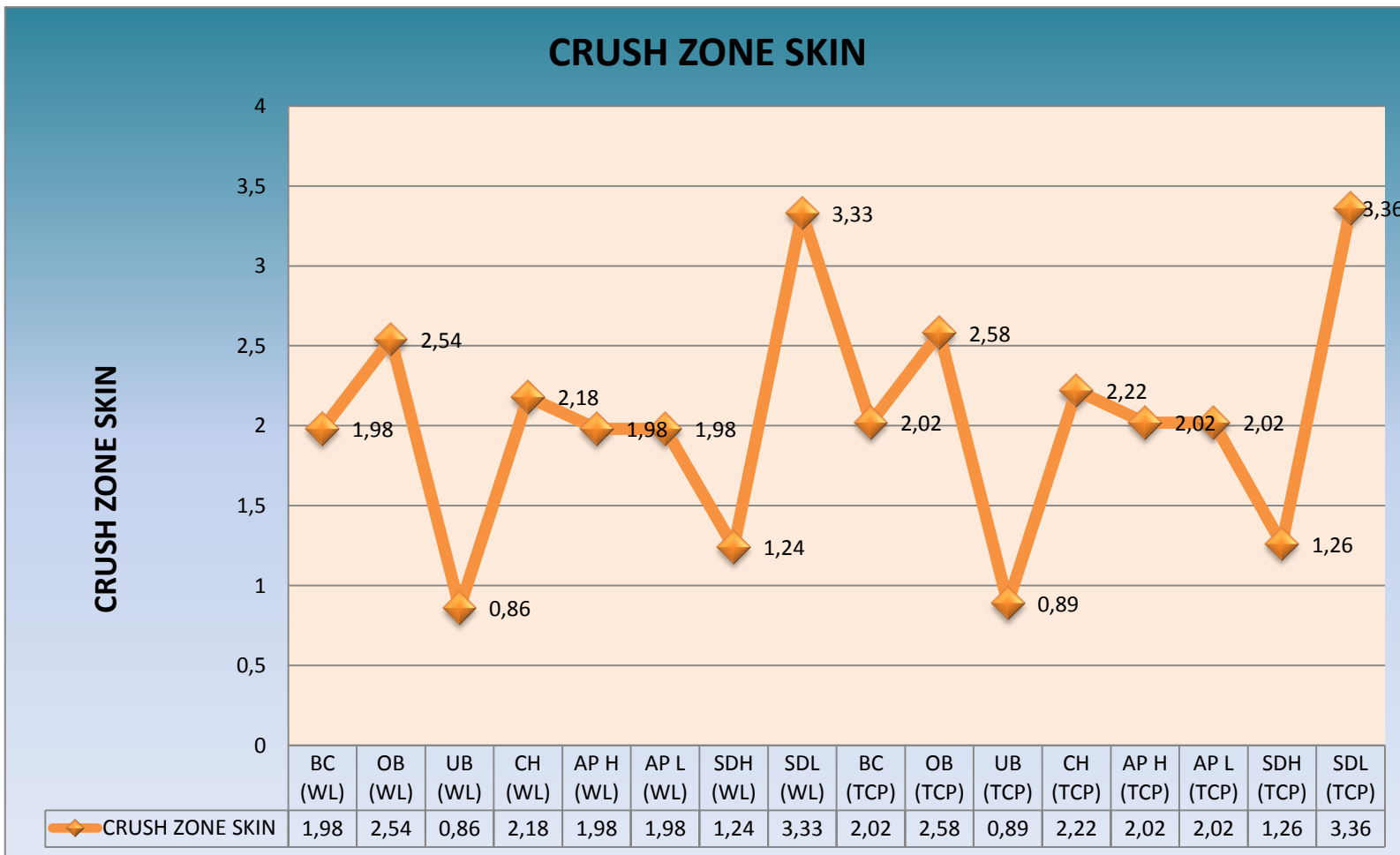
Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **EFFECTIVE SKIN**

La gráfica de daño efectivo como se puede ver es una de las más aleatorias, es decir que cada uno de los parámetros geométricos del cañoneo influyen de una u otra forma en el daño efectivo que se le puede generar al pozo. De esta gráfica se puede analizar que el parámetro geométrico que más incrementa el daño efectivo es la densidad de disparo, cuando ésta es menor a la del caso base para ambas técnicas, entonces si se disminuye la densidad de disparo de 5 a 3 tiros por pie (TPP) para el caso base Wireline y Wireline (Densidad= 3 TPP) respectivamente entonces el incremento del daño efectivo sería de 1.8 a 4.35 así mismo sucede si se analizan las técnicas TCP caso base y TCP (Densidad= 3 TPP), y por el contrario al aumentar la densidad de disparo por encima de los casos bases para cada técnica disminuye el daño del pozo, en términos numéricos si se aumenta la densidad de disparo de 5 a 8 tiros por pie (TPP) da como resultado una disminución del daño de 1.86 a 0.48 para la técnica Wireline caso base y Wireline (Densidad=8 TPP) respectivamente, lo mismo sucede al incrementar los tiros por pie para las técnicas TCP base y TCP (Densidad= 8 TPP).

También se puede observar de esta gráfica que la presión diferencial a favor de la formación es el parámetro que más reduce el daño efectivo del pozo en ambas técnicas, pues el flujo radial inmediatamente posterior al disparo (laminar o turbulento) limpia los túneles de los disparos, un flujo inicial erosiona las zonas trituradas y arrastra los detritos resultantes, por el contrario una presión diferencial de Overbalance aumenta el daño efectivo del pozo tanto para la técnica por Wireline y por TCP; el cambio de la carga jet por una de menor penetración aumenta el daño efectivo del pozo, finalmente el ángulo de fase por debajo del caso base no genera ningún cambio, pero un ángulo de fase por encima del caso base incrementa el daño efectivo del pozo para ambas técnicas.

Figura 43. Daño en la zona compactada CRUSH ZONE SKIN

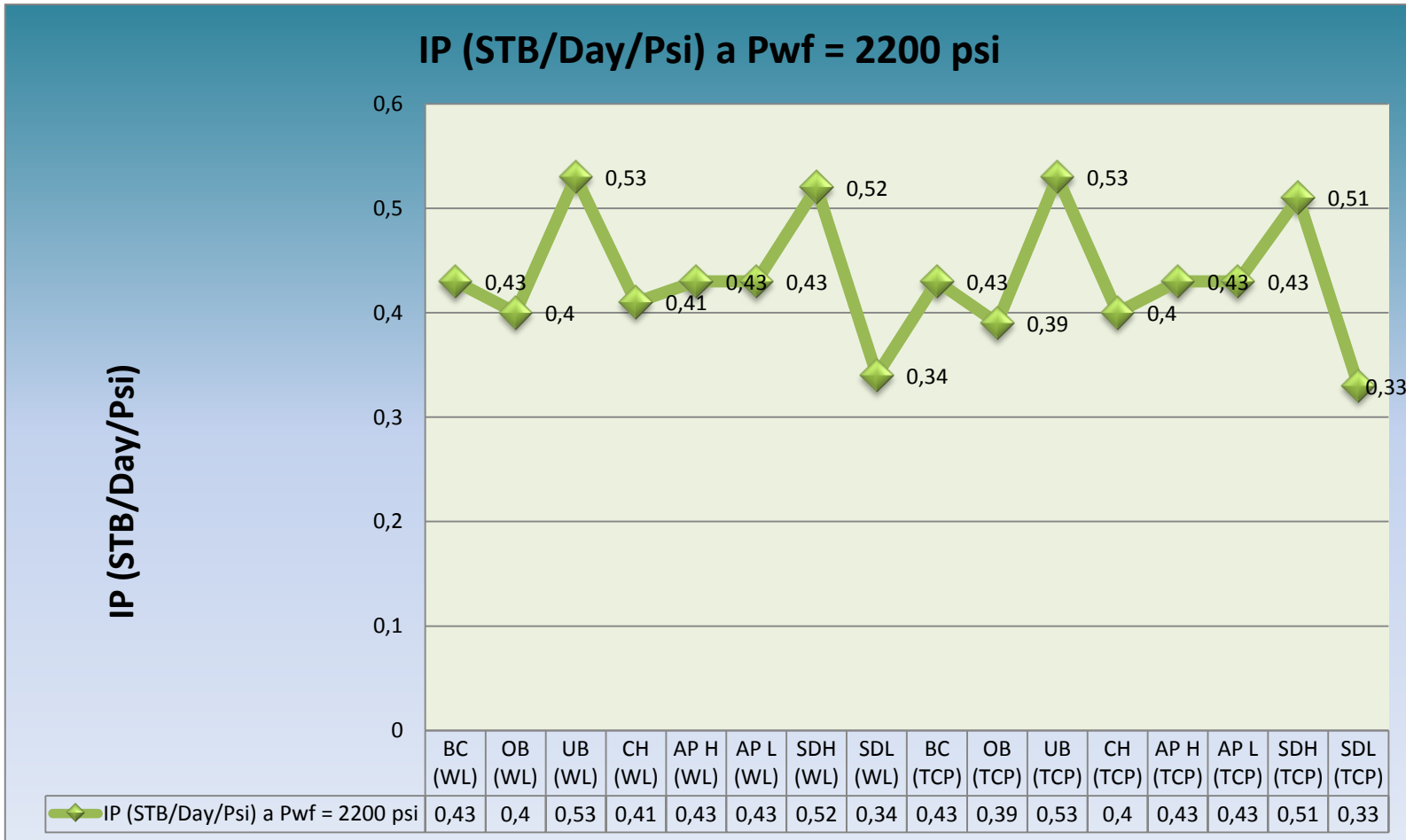


Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **CRUSH ZONE SKIN**

La tendencia de los puntos en esta gráfica es muy similar a la gráfica de **EFF SKIN**, como se dijo la presión diferencial a favor de la formación es el parámetro que mas reduce el daño en la zona compactada tanto en la técnica Wireline como TCP, y el parámetro que más incrementa dicho daño es la disminución de la densidad de disparo, igualmente una carga de menor penetración incrementa el daño en la zona compactada, el único parámetro que varia con respecto a la gráfica de daño efectivo es el ángulo de fase pues un incremento o disminución de éste no genera variación del daño con respecto al caso base para cada técnica.

Figura 44. Índice de Productividad PRODUCTIVITY INDEX

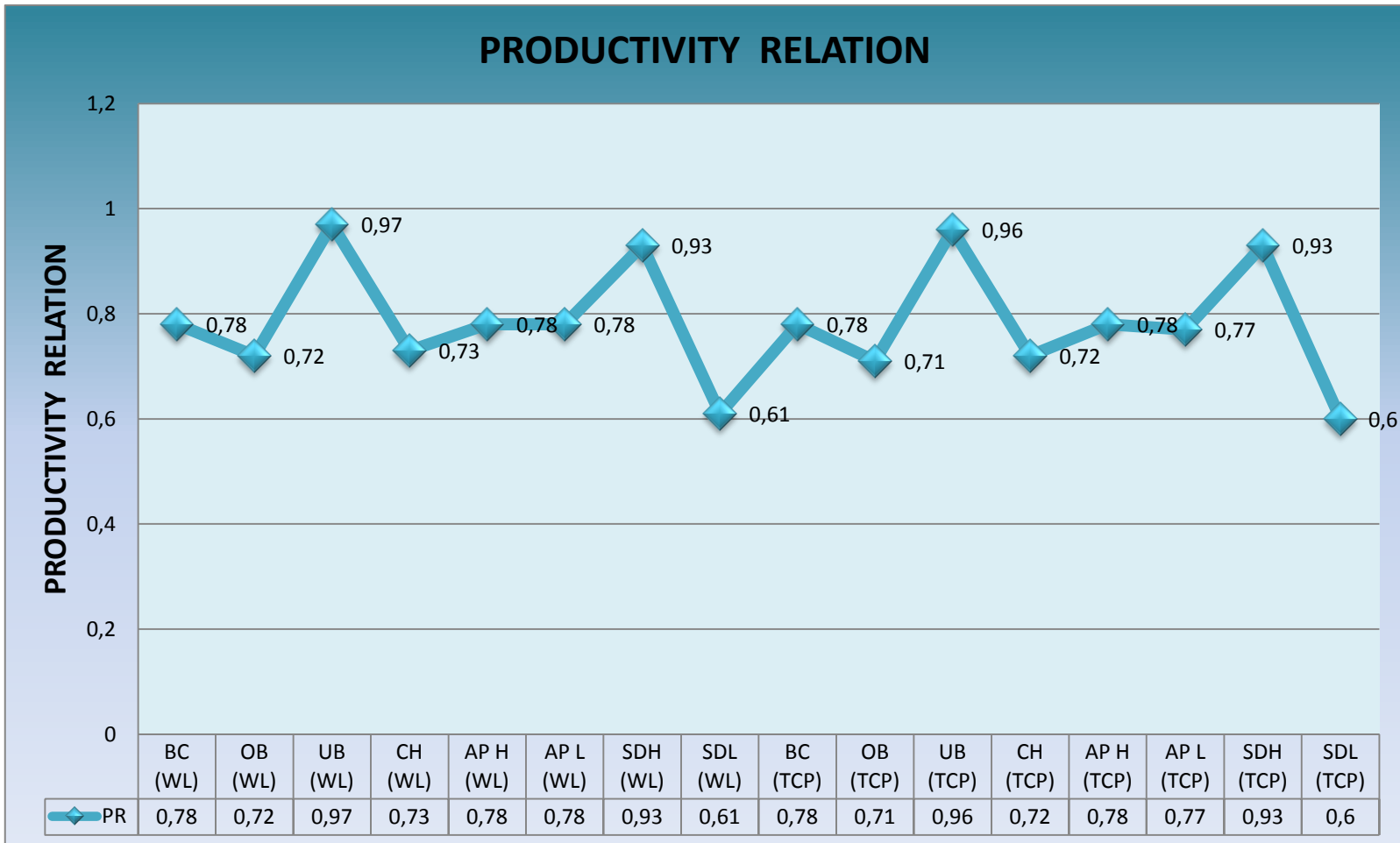


Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **PRODUCTIVITY INDEX (IP)**

El índice de productividad o potencial del pozo fue determinado a una presión de fondo fluyendo de 2200 psi para cada diseño, de esta gráfica se puede analizar que el IP mayor se produjo a partir de una presión diferencial de desbalance a favor de la formación (Underbalance) pues como se ha dicho este método de cañoneo limpia los túneles de los disparos ya que el flujo inicial erosiona las zonas trituradas y arrastra los detritos resultantes permitiendo así una mayor cantidad de flujo a través de los túneles perforados, el IP para ambas técnicas fue el mismo de 0.53, el índice de productividad menor se obtuvo al disminuir la densidad de disparo pues como es de esperarse al generar menos túneles por donde fluya el fluido el ritmo de producción disminuye también, es por esto que la densidad de disparo depende del ritmo de producción que requiera el ingeniero de completamiento así como también de la permeabilidad de la formación y de la longitud del intervalo a disparar, entonces para este estudio por la técnica Wireline el IP fue de 0.34 y para TCP fue de 0.33 igualmente como se ha dicho el método Overbalance para ambas técnicas reduce también el IP pues este no cumple satisfactoriamente con la función de limpiar las perforaciones; el cambio de la carga reduce el IP pues se tomó una carga de menor penetración generando una menor longitud de penetración y por ende menor capacidad de flujo, el ángulo de fase para ambas técnicas no interfiere en cuando al incremento o disminución del índice de productividad con respecto al de los casos base, y finalmente una densidad de disparo mayor incrementa y el índice de productividad, pues a mayor cantidad de túneles abiertos mayor será la tasa de producción del pozo.

Figura 45. Relación de Productividad PRODUCTIVITY RELATION

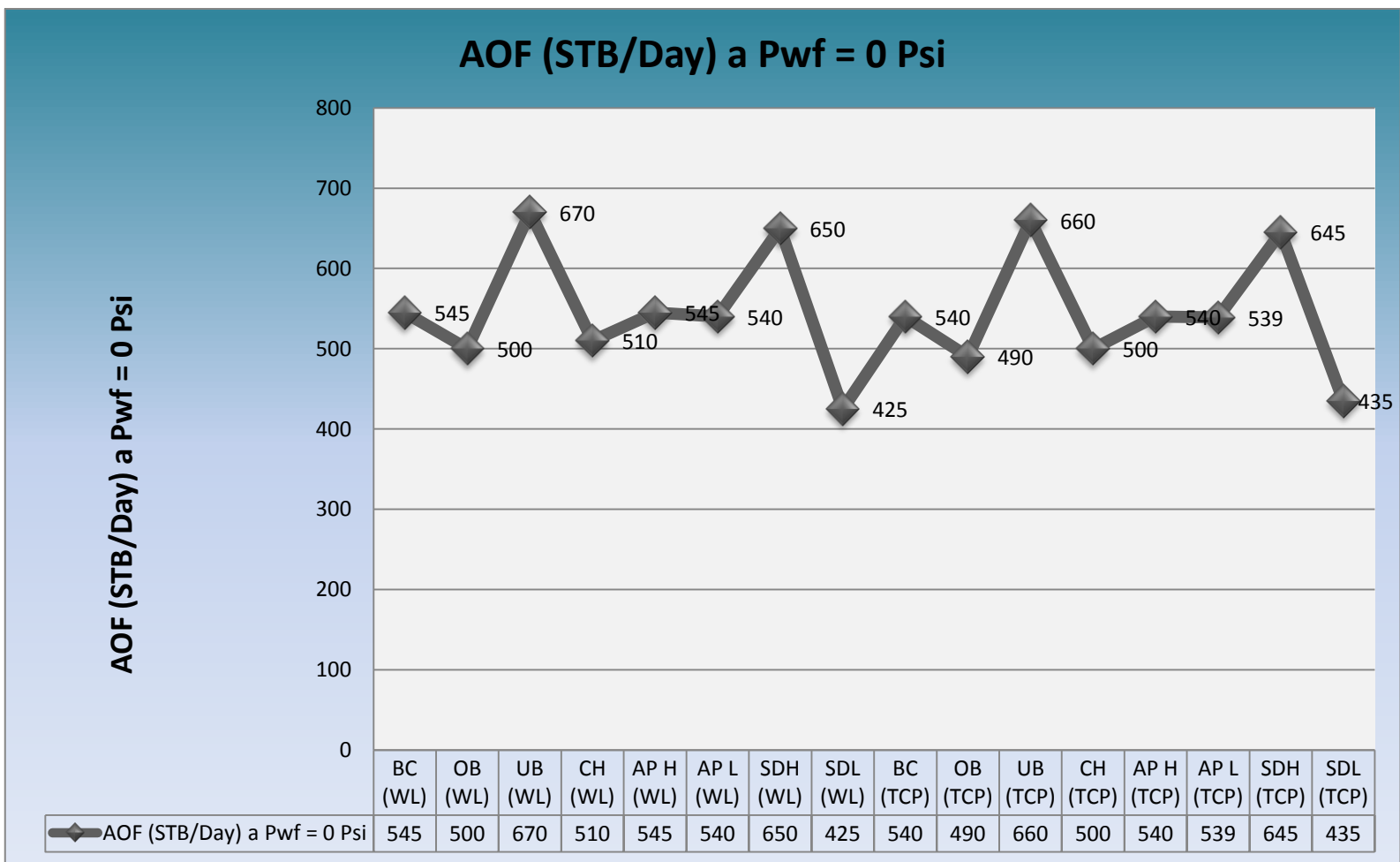


Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **PRODUCTIVITY RELATION (RP)**

La gráfica de relación de productividad como era de esperarse tiene una tendencia muy similar a la gráfica de índice de productividad, cabe recordar que la relación de productividad es igual a la razón entre la producción de la zona cañoneada y la producción de la zona en agujero abierto y que uno de los principales factores que interfiere en la relación de productividad de un pozo son los parámetros geométricos del cañoneo, por eso es de vital importancia prestar la mayor atención en esta parte del análisis, siendo así, la grafica generada por los datos del simulador muestra que, la RP más alta se obtuvo al implementar el método de cañoneo por Underbalance para ambas técnicas Wireline y TCP el cual respectivamente fue de 0.97 y 0.96, la RP mas baja se genera debido a la reducción de la densidad de disparo para ambas técnicas Wireline y TCP la cual fue de 0.61 y 0.6 respectivamente y el incremento de la densidad de disparo aumenta la RP también en ambas técnicas, una carga de menor penetración disminuye la relación de productividad tanto en Wireline como en TCP, en cuanto al ángulo de fase al incrementarlo o disminuirlo para la técnica Wireline éste no genera ningún cambio en la RP con respecto al caso base, pero por la técnica TCP al disminuirlo de 60° hasta 45° la RP disminuye de 0.78 a 0.77 para el caso base TCP y TCP (Angulo= 45°) respectivamente.

Figura 46. Absolute Open Flow AOF



Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

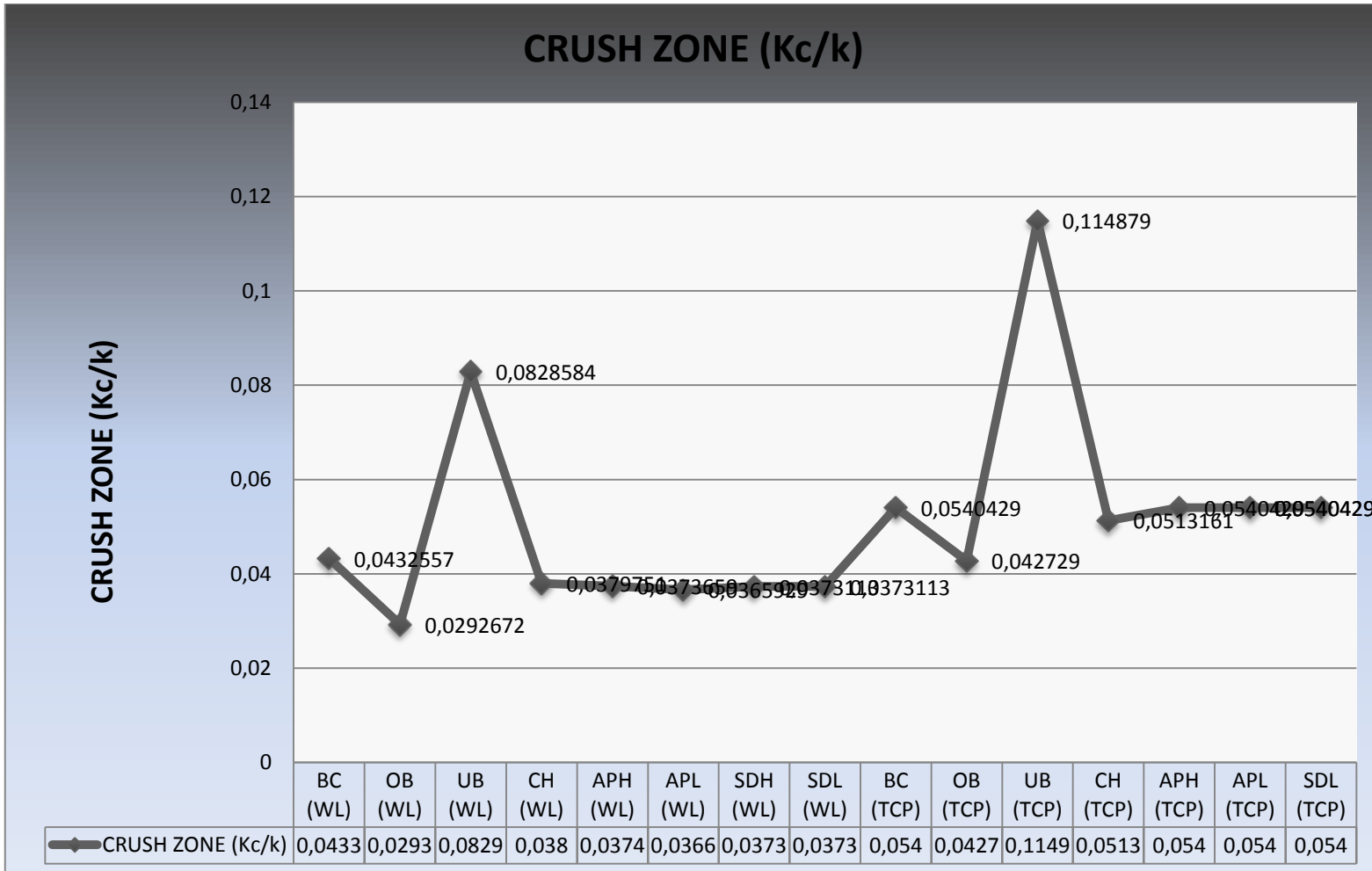
- **ABSOLUTE OPEN FLOW (AOF)**

Esta gráfica muestra el flujo máximo que el pozo podría entregar calculado a una presión de fondo fluyendo igual a 0 psi para cada diseño de cañoneo, la tendencia de esta gráfica es similar a las gráficas anteriormente analizadas, lo que quiere decir que los parámetros geométricos influyen en la misma proporción, por tanto como es de esperarse la técnica Wireline desarrollada por el método Underbalance genera el AOF más alto de este estudio correspondiente a 670 BPD no obstante el diseño por la técnica TCP e igualmente desarrollado por el método de Underbalance genera un AOF muy similar el cual corresponde a 660 BPD, la disminución de la densidad de disparo es el parámetro que más reduce el AOF en comparación con el caso base tanto para la técnica Wireline como TCP estos valores son respectivamente 425 BPD y 435 BPD, así mismo al remplazar la carga jet por una de menor penetración el AOF disminuye y el ángulo fase es el parámetro que menos altera el AOF con respecto a el caso base realizado por cada técnica.

5.6.3. Análisis a partir de la variación de los parámetros geométricos de las técnicas Wireline y TCP MEJORADO.

El caso TCP MEJORADO fue planteado con el fin de optimizar el diseño inicial TCP, pues como se dijo en el análisis anterior el caso TCP estaba siendo subestimado, ya que no se estaba utilizando la carga adecuada para el tipo de cañón permitido por esta técnica, por tanto en esta sección de análisis se compara la técnica Wireline y TCP con un diseño de TCP MEJORADO. Los resultados obtenidos por el simulador fueron los siguientes:

Figura 47. Relación de permeabilidad en la zona compactada y en la zona virgen CRUSH ZONE Kc/K



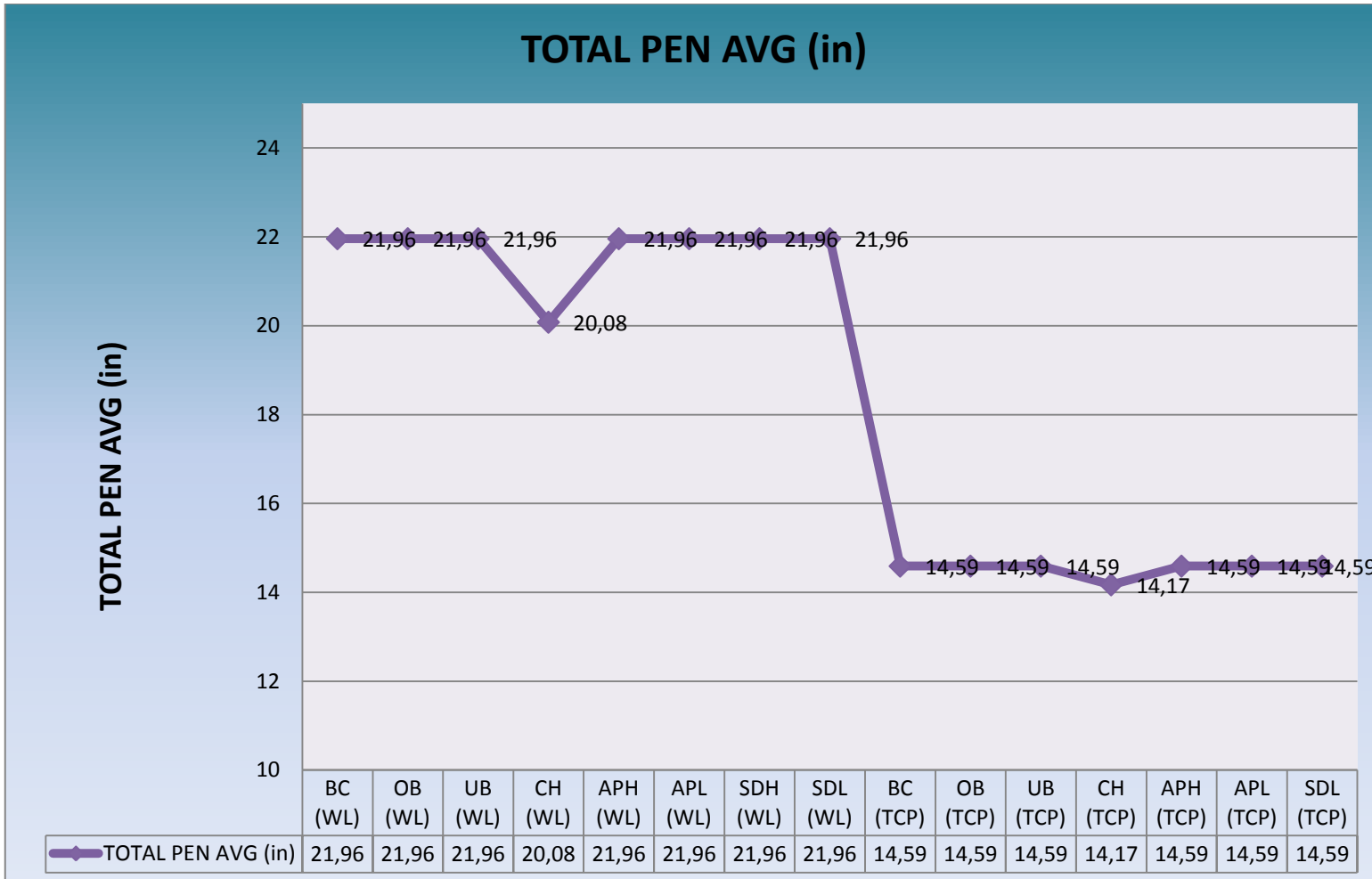
Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **CRUSH ZONE K_c/K**

En la gráfica de relación de permeabilidad en la zona compactada para los casos Wireline y TCP MEJORADO se puede observar que para ambos casos el método de cañoneo que produjo una relación de permeabilidad más cercana a 1 que es lo que se pretende fue el diseño desarrollado por el método de Underbalance y por el contrario el diseño planteado por Overbalance fue el que menor relación de permeabilidad produjo, los datos exactos para cada caso son: Wireline Underbalance (0,0828584), TCP MEJORADO Underbalance (0,114879), Wireline Overbalance (0,0292672), TCP MEJORADO Overbalance (0,042729), estos resultados son prueba de que el método de cañoneo con una presión diferencial a favor de la formación es más óptimo, pues con este método se obtienen los mayores índices de flujo ya que los daños o taponamientos que sufren las perforaciones y la formación por parte del fluido dentro del pozo son mínimos debido a que tan pronto se cañonea, la formación fluye a través de ellas evitando la invasión del fluido del pozo, sin embargo que el método por Underbalance sea más óptimo no quiere decir que el método por Overbalance no sea eficiente, pues como se puede ver en los cálculos del radio de invasión en todos los diseños la longitud de penetración sobrepasó la zona invadida por lo que cada diseño fue eficiente.

Ahora lo que se debe analizar es la técnica de cañoneo que se utilizó, pues a simple vista la técnica de cañoneo por TCP produjo una relación de permeabilidad más alta que la técnica por Wireline, cabe recordar que para esta parte del estudio los parámetros geométricos del cañoneo por la técnica TCP son diferentes a los parámetros de la técnica Wireline, por ende las corridas hechas por la técnica TCP MEJORADO produjeron mayor relación de permeabilidad ya que se tomó un diámetro de cañón más grande, carga jet de mayor penetración, mayor densidad de disparo y mayor ángulo de fase en comparación con la técnica Wireline.

Figura 48. Longitud de penetración total promedio (in) TOTAL PENETRATION AVERAGE (in)



Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **TOTAL PENETRATION AVERAGE**

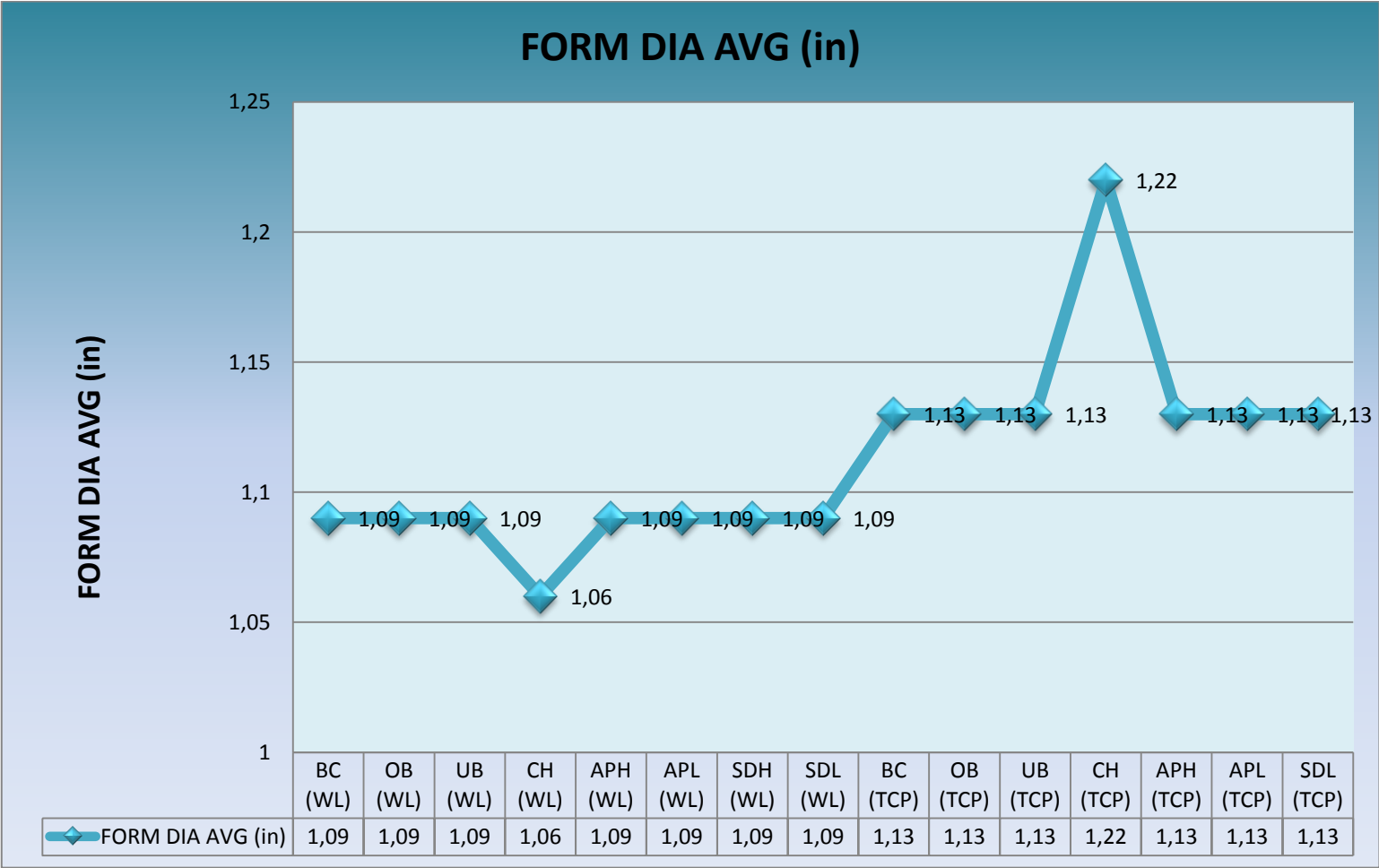
El parámetro de cañoneo que más influye en la penetración total promedio es la carga jet, en este estudio se reemplazó la carga 51B HyperJet II RDX por una 51B HyperJet II HMX para la técnica Wireline y TCP MEJORADO, la carga tipo HMX es de menor penetración por lo cual en estas corridas la longitud de penetración se redujo de 21.96 a 20.08 para la técnica Wireline base y Wireline (carga) respectivamente, igualmente la longitud de penetración se redujo de 14.59 a 14.17 para la técnica TCP MEJORADO base y TCP MEJORADO (Carga) respectivamente, es decir que el cambio de la carga en ambas técnicas reduce la penetración total promedio de la formación.

A continuación se muestra la tabla de propiedades generada por las pruebas de laboratorio API hechas para cada carga usadas en este estudio, esta tabla se tomó del Data Summary de la Schlumberger.

TECNICA	WLB	WL	TCP MEJORADO B	TCP MEJORADO
CAÑÓN TIPO	4 1/2 HSD 60.5 (51B HJII RDX)	4 1/2 HSD 60.5 (51B HJII HMX)	6HSD120.12 (41B HJII RDX)	6HSD120.12 (41B HJII HMX)
Penetration (in)	34.58	31.05	21.07	20.4
Entrance Hole (in)	0.46	0.45	0.38	0.4
Gun Diameter (in)	4.5	4.5	6	6
Burr Height (in)	0.11	0.12	-	-
Maximum Explosive load (g)	37	37	22	22
Maximum Pressure rating (psi)	12000	12000	-	-
Maximun Temperatura (°F)	340	340	340	-

Fuente: Data Summary Schlumberger

Figura 49. Diámetro promedio de la formación (in) FORMATION DIAMETER AVERAGE (in)



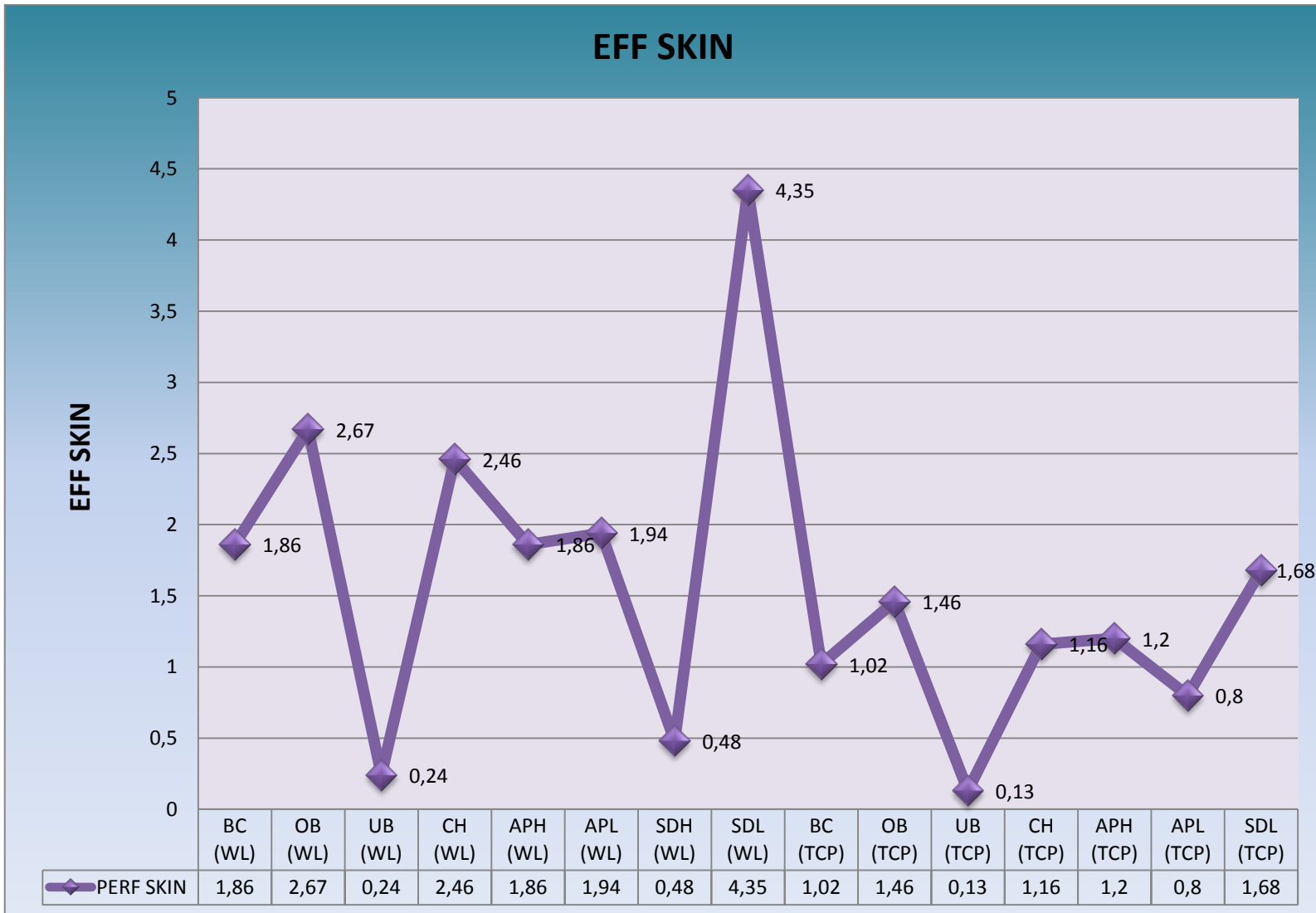
Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **FORMATION DIAMETER AVERAGE**

De la gráfica de diámetro promedio del hueco en la formación se puede analizar que el parámetro de cañoneo más influyente es el tipo de carga jet, en este estudio se cambió la carga 51B HyperJet II RDX por una 51B HyperJet II HMX para cada técnica, la carga tipo 51B HyperJet II HMX reduce el diámetro de entrada a la formación así como en el caso anterior en donde la penetración de la formación se ve reducida debido a que la carga jet es de menor alcance; ahora para esta gráfica es importante analizar que la técnica de cañoneo TCP MEJORADO así como la técnica TCP del caso anterior genera un mayor diámetro de entrada en la formación que la técnica por Wireline, este resultado se debe a que la técnica TCP MEJORADO es realizada bajando los cañones con la tubería de producción al intervalo de interés, generando una mayor estabilidad en el sistema de cañoneo al efectuar el disparo, pues la energía que genera la carga jet es utilizada completamente al penetrar la formación y no es malgastada por el cañón como sucede en la técnica Wireline pues al bajar los cañones por cable estos no están tan firmemente posicionados por lo que al efectuar la operación cierta parte de la energía requerida para formar el hueco es absorbida por el cañón.

El cambio de la carga por una de menor alcance genera que el diámetro del hueco en la formación para el caso TCP MEJORADO se incrementa con respecto al caso base TCP MEJORADO, lo contrario sucede en el caso TCP en donde el cambio de la carga jet de menor alcance reduce el diámetro del hueco en la formación con respecto al caso TCP base, por último las corridas por TCP generan mejor diámetro de entrada que las corridas por TCP MEJORADO ya que el diámetro del cañón por en este diseño es mayor y está siendo subestimado al utilizar la misma carga que el de TCP la cual es de menor alcance.

Figura 50. Daño efectivo EFFECTIVE SKIN



Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

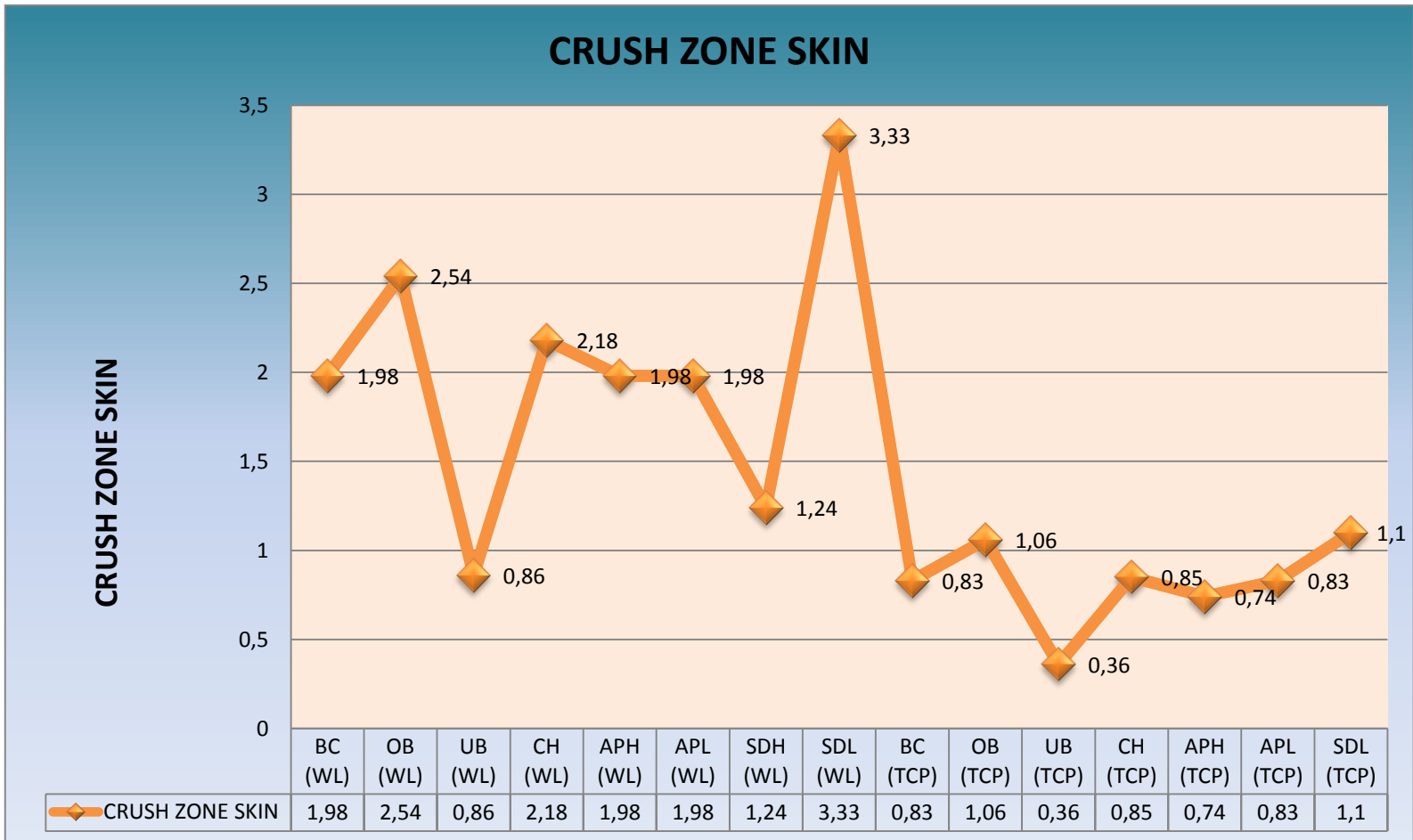
- **EFFECTIVE SKIN**

La gráfica de daño efectivo como se puede ver es una de las más aleatorias, es decir que cada uno de los parámetros geométricos del cañoneo influyen de una u otra forma en el daño efectivo que se le puede generar al pozo. De esta gráfica se puede analizar que el parámetro geométrico que más incrementa el daño efectivo es la densidad de disparo cuando ésta es menor a la del caso base para ambas técnicas, reducir la densidad de disparo incrementa el daño del pozo, en términos numéricos para el caso TCP MEJROADO se redujo la densidad de disparo de 12 TPP a 9 TPP lo que produjo un incremento del daño de 1.16 a 1.68 respectivamente.

También se puede observar que la presión diferencial a favor de la formación es el parámetro que más reduce el daño efectivo del pozo en ambas técnicas, pues el flujo radial inmediatamente posterior al disparo (laminar o turbulento) limpia los túneles de los disparos, un flujo inicial erosiona las zonas trituradas y arrastra los detritos resultantes, por el contrario una presión diferencial de Overbalance aumenta el daño efectivo del pozo tanto para la técnica por Wireline y por TCP; el cambio de la carga jet por una de menor penetración aumenta el daño efectivo del pozo, finalmente el ángulo de fase por encima del caso base para la técnica Wireline no genera ningún cambio, pero para la técnica TCP MEJORADO incrementa el daño, un ángulo de fase por debajo del caso base para la técnica Wireline incrementa el daño efectivo, y para la técnica TCP MEJORADA lo disminuye.

Comparando los diseños de TCP y TCP MEJORADO, la tendencia del daño con respecto a los parámetros geométricos en los dos diseños es prácticamente el mismo, aunque el diseño TCP genera mayor daño efectivo en cada caso, lo que es de esperarse ya que el diseño de cañoneo por TCP MEJORADO presenta mayor densidad de disparo y ángulo de fase.

Figura 51. Daño en la zona compactada CRUSH ZONE SKIN

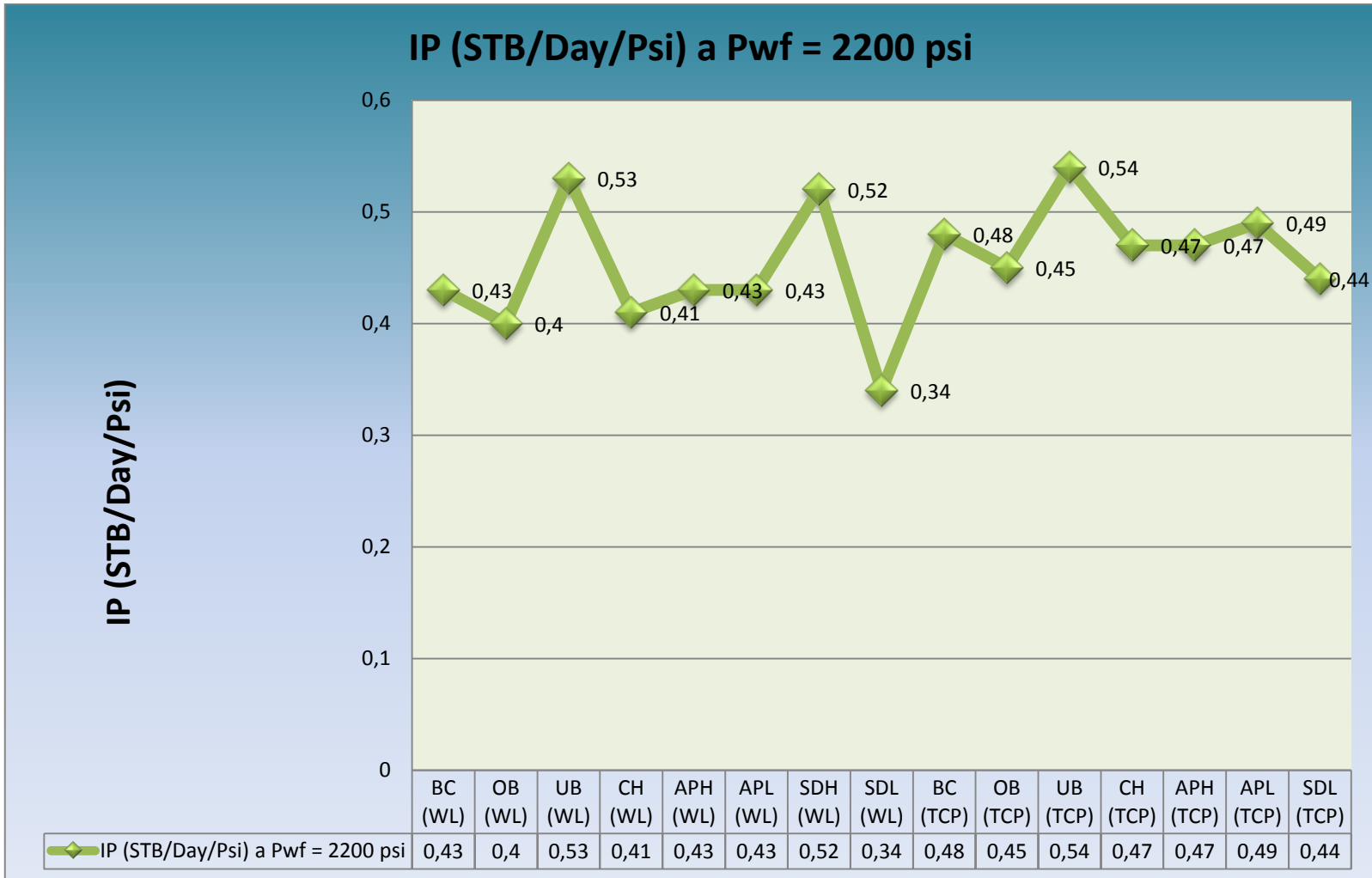


Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **CRUSH ZONE SKIN**

La tendencia de los puntos en esta gráfica es muy similar a la gráfica de **EFF SKIN**, como se dijo la presión diferencial a favor de la formación es el parámetro que mas reduce el daño en la zona compactada tanto en los diseños Wireline como TCP MEJORADO, y el parámetro que más incrementa dicho daño es la disminución de la densidad de disparo, igualmente una carga de menor penetración incrementa el daño en la zona compactada, el único parámetro que varia con respecto a la gráfica de daño efectivo es el ángulo de fase pues una incremento o disminución de éste no genera variación del daño con respecto al caso base para cada técnica. Igualmente el diseño TCP MEJORADO reduce más el daño en la zona compactada que el diseño TCP pues como se dijo el tipo de cañón utilizado en TCP MEJORADO posee un mayor ángulo de fase y densidad de disparo.

Figura 52. Índice de Productividad PRODUCTIVITY INDEX

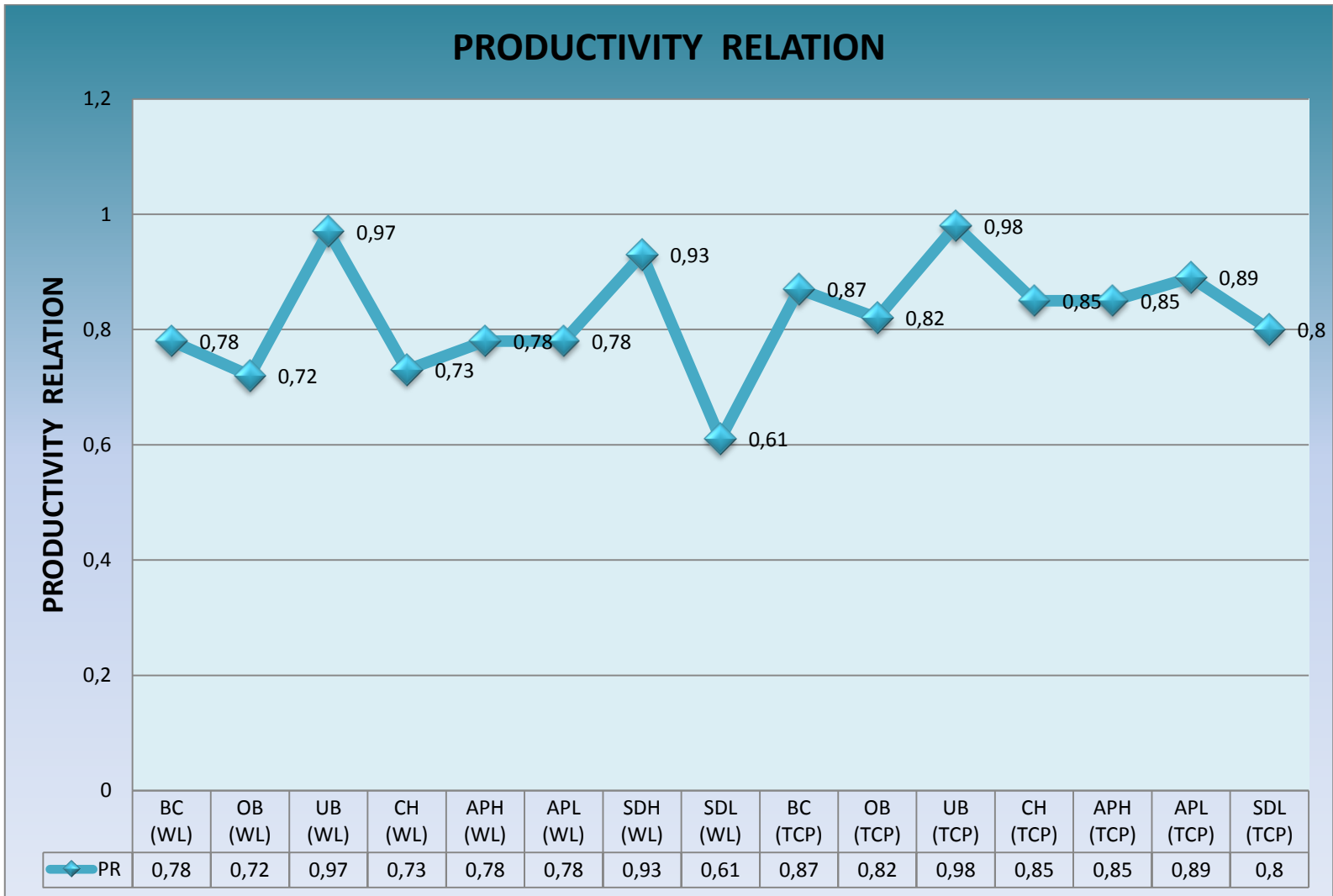


Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **PRODUCTIVITY INDEX (IP)**

El índice de productividad o potencial del pozo fue determinado a una presión de fondo fluyendo de 2200 psi para cada diseño, de esta gráfica se puede analizar que el IP mayor se produjo a partir de una presión diferencial de desbalance a favor de la formación (Underbalance) pues como se ha dicho este método de cañoneo limpia los túneles de los disparos ya que el flujo inicial erosiona las zonas trituradas y arrastra los detritos resultantes permitiendo así una mayor cantidad de flujo a través de los túneles perforados, el IP medido para el caso base Wireline Underbalance fue de 0.53 y para el caso base TCP MEJORADO 0.54, el índice de productividad menor se obtuvo al disminuir la densidad de disparo pues como es de esperarse al generar menos túneles por donde fluya el fluido el ritmo de producción disminuye también, es por esto que la densidad de disparo depende del ritmo de producción que requiera el ingeniero de completamiento así como también de la permeabilidad de la formación y de la longitud del intervalo a disparar, entonces para este estudio por la técnica Wireline el IP fue de 0.34 y para TCP MEJORADO fue de 0.44 igualmente como se ha dicho el método Overbalance para ambas técnicas reduce también el IP pues este no cumple satisfactoriamente con la función de limpiar las perforaciones; el cambio de la carga reduce el IP pues se tomó una carga de menor penetración generando una menor longitud de penetración y por ende menor área de flujo, el ángulo de fase para ambas técnicas no interfiere en cuando al incremento o disminución del índice de productividad con respecto al de los casos base, y finalmente una densidad de disparo mayor y menor incrementa y disminuye respectivamente el índice de productividad, pues a mayor cantidad de túneles abiertos mayor será la tasa de producción del pozo y viceversa.

Figura 53. Relación de Productividad PRODUCTIVITY RELATION



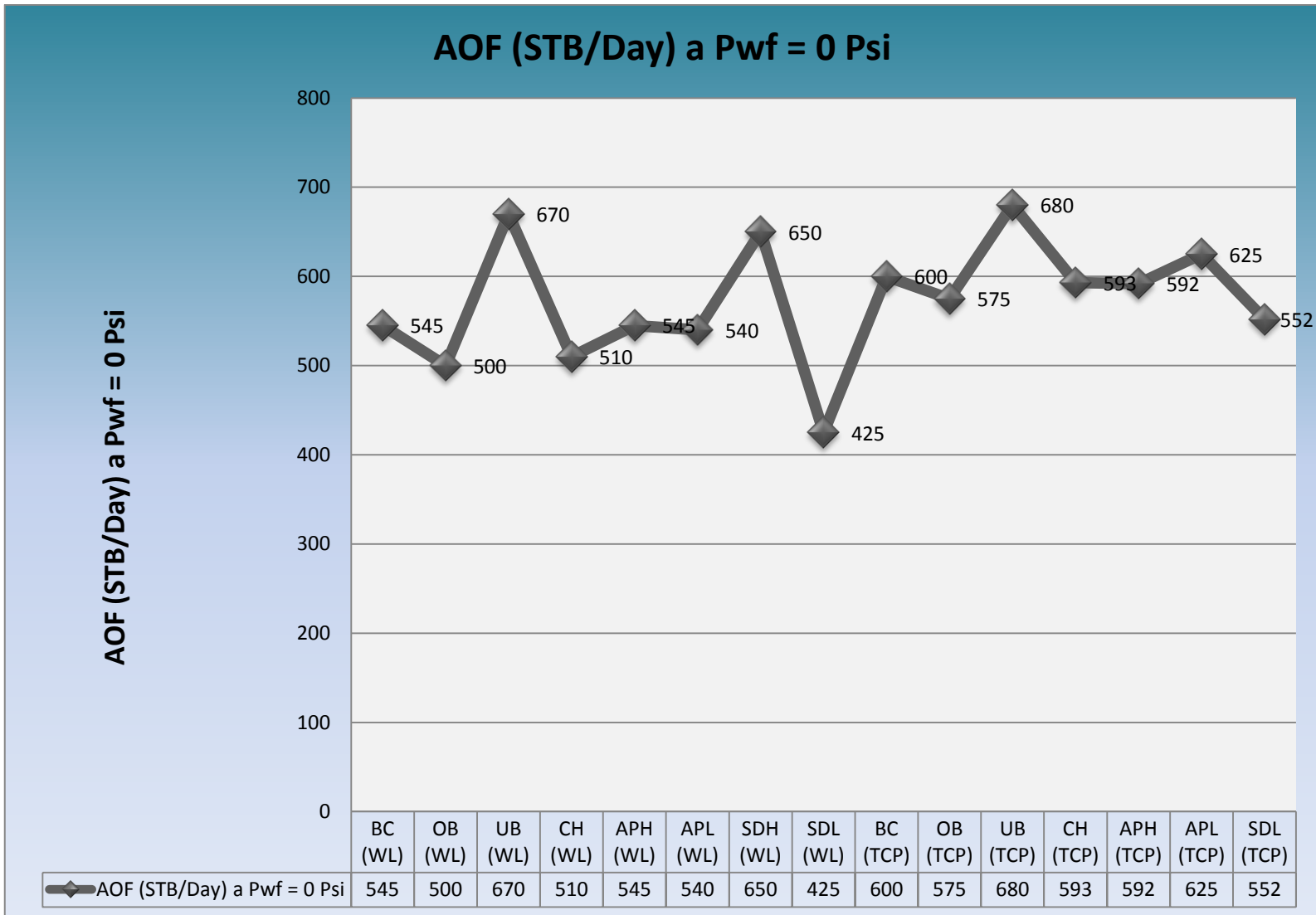
Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **PRODUCTIVITY RELATION (RP)**

La gráfica de relación de productividad como era de esperarse tiene una tendencia muy similar a la gráfica de índice de productividad, cabe recordar que la relación de productividad es igual a la razón entre la producción de la zona cañoneada y la producción de la zona en agujero abierto y que uno de los principales factores que interfieren en la relación de productividad de un pozo son los parámetros geométricos del cañoneo, por eso es de vital importancia prestar la mayor atención en esta parte del análisis, siendo así, la grafica generada por los datos del simulador muestra que la RP más alta se obtuvo al implementar el método de cañoneo por Underbalance para ambas técnicas Wireline y TCP MEJORADO el cual respectivamente fue de 0.97 y 0.98, la RP mas baja se genera debido a la reducción de la densidad de disparo para ambas técnicas Wireline y TCP MEJORADO la cual fue de 0.61 y 0.8 respectivamente y el incremento de la densidad de disparo aumenta la RP, una carga de menor penetración disminuye la relación de productividad tanto en Wireline como en TCP MEJORADO, en cuanto al ángulo de fase al incrementarlo o disminuirlo para la técnica Wireline éste no genera ningún cambio en la RP con respecto al caso base, pero por la técnica TCP al disminuirlo de 120° hasta 90° la RP aumenta de 0.87 a 0.89 para el caso base TCP y TCP MEJORADO (Angulo= 90°) respectivamente, y por el contrario al aumentar el ángulo de fase a 180° disminuye la RP a 0.85.

En el caso TCP sucede lo contrario, pues disminuir el ángulo de fase conlleva a una disminución de la Relación de Productividad y al aumentarlo no genera ningún cambio en la relación de productividad, sin embargo este parámetro geométrico es el que menos interfiere en la productividad de un pozo.

Figura 54. Absolute Open Flow AOF



Fuente: Autores, Datos SPAN 9.5

- **ABSOLUTE OPEN FLOW (AOF)**

Esta gráfica muestra el flujo máximo que el pozo podría entregar calculado a una presión de fondo fluyendo igual a 0 psi para cada diseño de cañoneo, la tendencia de esta gráfica es similar a las gráficas anteriormente analizadas, lo que quiere decir que los parámetros geométricos influyen en la misma proporción, por tanto como es de esperarse la técnica TCP MEJORADO desarrollada por el método Underbalance genera el AOF más alto de este estudio correspondiente a 800 BPD no obstante el diseño por la técnica Wireline e igualmente desarrollado por el método de Underbalance genera un AOF muy similar el cual corresponde a 670 BPD, la disminución de la densidad de disparo es el parámetro que más reduce el AOF en comparación con el caso base tanto para la técnica Wireline como TCP MEJORADO estos valores son respectivamente 425 BPD y 525 BPD, así mismo al remplazar la carga jet por una de menor penetración el AOF disminuye y el ángulo fase es el parámetro que menos altera el AOF con respecto a el caso base realizado por cada técnica.

CONCLUSIONES

- ❖ El método de cañoneo con una presión diferencial a favor de la formación o Underbalance genera mejores resultados de longitud de penetración, relación de permeabilidad en la zona compactada y virgen, daño efectivo, daño en la zona compactada, índice de productividad, relación de productividad y AOF, independientemente de la técnica de cañoneo que se utilice ya sea Wireline o TCP.
- ❖ Realizar la operación de cañoneo por la técnica TCP genera mejores resultados que la técnica de cañoneo por Wireline, ya que la técnica TCP permite utilizar mayor densidad de disparo, mayor ángulo de fase y cañones de diámetro más grande, esto sucede siempre y cuando no se subestime la capacidad del cañón, pues si se utiliza un cañón de mayor diámetro se espera utilizar una carga de alta penetración para que los resultados sean satisfactorios.
- ❖ La longitud de penetración que se puede lograr en una operación de cañoneo depende principalmente de las propiedades mecánicas de la roca, es decir, de su resistencia a la compresión; además de otros factores tales como la técnica de cañoneo y tipo de cargas utilizadas.
- ❖ Ejecutar la operación de cañoneo tomando una densidad de disparo baja reduce significativamente el potencial de producción de un pozo, puesto que se incrementa el daño en la zona compactada y el daño efectivo, reduciéndose el índice de productividad, la relación de productividad y el AOF, este comportamiento ocurre en ambas técnicas Wireline y TCP.

- ❖ El parámetro geométrico de cañoneo que tiene menos influencia en la productividad de un pozo es el ángulo de fase, debido a que una variación de éste no genera grandes cambios en el AOF que se pueda alcanzar, aunque este parámetro no sea tan influyente como los demás es importante tenerlo en cuenta, principalmente si se realiza la operación por TCP.

- ❖ Al ser el Absolute Open Flow la medida teórica de la máxima tasa de flujo que puede llegar a proporcionar un pozo, a partir de este valor se puede concluir que el diseño de cañoneo planteado en este proyecto de grado que mejor AOF produjo fue el ejecutado por la técnica TCP con una presión de desbalance a favor de la formación, el cual fue de 680 STB/D, por ende , este valor estadísticamente se encuentra por cima de la media registrada por todos los diseños propuestos la cual fue de 569 STB/D, ratificando dicho diseño de cañoneo como el más óptimo.

RECOMENDACIONES

- ❖ Profundizar en el estudio de las nuevas tecnologías que se han desarrollado para optimizar la operación, en especial el enfoque a la tecnología PURE, la cual utiliza un desbalance de presión dinámico al momento de cañonear que ha demostrado mayor limpieza de los perforados y menor daño en la formación, incrementando la productividad.

- ❖ Realizar un procedimiento de diseño que facilite llevar a cabo la operación de cañoneo, con el fin de minimizar el tiempo requerido al ejecutar un proyecto.

- ❖ Aplicar este estudio con datos reales de campo, teniendo en cuenta que las especificaciones de las operaciones de cañoneo dependen de los datos de yacimientos, por esto es necesario hacer una buena revisión de la información clave para la implementación de la operación.

- ❖ A partir de los resultados obtenidos en este trabajo de grado, se recomienda desarrollar un estudio financiero, para conocer la rentabilidad de un proyecto de cañoneo.

BIBLIOGRAFIA

1. ARRIETA, Mario. Daño de la formación y cañoneo. Venezuela. Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Bolivariana.
2. BARAJAS, Gonzalo Efrén. LOZANO, Luis Gerardo. Nuevas técnicas de cañoneo. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. 1982.
3. BENAVIDES, Carlos. Estudio técnico económico de la utilización de los diferentes sistemas de cañoneo a las arenas U y T en el área cuyabeno. Quito, Escuela Politécnica Nacional. 2012.
4. BENAVIDES, Marcia, Schlumberger. "Basic Perforating Principles". Bucaramanga, Santander. 2008.
5. BERHRMAN, Larry. Brooks, James. Técnica de diseño de los disparos para optimizar la productividad. Oilfield Review, Verano 2000; 27.
6. BROOKS, James E; SPE, schlumberger. Perforating and testing; "A Simple Method for Estimating Well Productivity SPE 38148". Dallas, Texas, EE.UU.1997.
7. BUSTOS, Edna. Estudio de Pozos Candidatos a Recañoneo y Apertura de Nuevas Zonas de Las Arenas De la Formación Barco del Área A del Campo Tibú. 2010.
8. DE LA HOZ, Maty María y ORTIZ, Diana. Metodología para la selección, diseño y ejecución del cañoneo y recañoneo de pozos de bajo potencial aplicación al campo Colorado. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander. 2009.
9. DIAZ, Johan. SANCHEZ, Christian. Análisis técnico-económico del uso de diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por petroproduccion. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica. 2007.

10. RODRIGUEZ, Álvaro Martín. GOMEZ, Carlos Isidro. Optimización del cañoneo. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1991.
11. RODRIGUEZ, Luis. ESP OIL completación y reacondicionamiento de pozos. Perú. 2006.
12. SIMANCAS, Frank. Manual teórico práctico de ingeniería de completación y rehabilitación de pozos. Caracas. Universidad central de Venezuela. 2005.
13. SPAN (Schlumberger Perforating Analysis Program) Version 9.5.
14. W.H. Jenkins. Et al; SPE, Schlumberger. Drilling and completions; "Optimizing the perforating strategy in well completions to maximize productivity". Dallas, Texas, EE.UU.2003.
15. WILEY, John. Halliburton-Petroleum well construction. Julio 1997.

ANEXOS

ANEXO A SIMULACIÓN SYSTEM PERFORATING ANALYSIS “SPAN” CASO BASE WIRELINE

SPAN Rock

Perforating Analysis

Company : UIS
Well : CASE BASE (WL)
Field :
Engineer : AArias4
Date : August 28, 2012

Schlumberger

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Company: UIS

Penetration Report

Well: CASE BASE (WL)

Completion

Borehole Diameter:	8.5 in	Wellbore Fluid:	Brine
Form Top (TVD):	4990.0 ft	Fluid Density:	8.763 ppg
Form Bottom (TVD):	5010.0 ft		

Tubular(s)

Casing #	Outer Diameter (in)	Weight (lbm/ft)	Grade	Inner Diameter (in)	Tubing Position	Stand-off	Annulus Material	Annulus Density (ppg)	Csg Str Remain (%)
1	7	29.00	L80	6.184	Centralized		Cement	15.86	96

Formation

Rock Type:	Sandstone	Rock Strength (UCS):	6403 psi
Porosity:	20.0 %	Vertical Stress:	5000 psi
Bulk Density:	2.31 g/cm3	Pore Pressure:	2234 psi
Formation Fluid:	Oil	Wellbore Damage:	8 in

Perforating System(s)

Perf #	Phasing Angle (deg)	Shot Density (spf)	Gun Position	Total Pen Average (in)	Form Pen Average (in)	Form Dia Average (in)	EH Dia Average (in)	AOF (in ² /ft)
1	60	5.00	Centered	21.96 ^	20.80 ^	1.09	0.51	1.0169

^ Concrete-based Model: Based on traditional API Section 1 results converted to downhole conditions

Gun System(s)

#	Name	Chg Wt (g)	Gun OD (in)	API Pen (in)	API EH (in)	Comment
1	4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX	37.0	4.5	34.58	0.46	RP43 5th Ed

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Report

Completion

Well Deviation:	0	deg	Drainage Area:	31.42	acre
Form Top (TVD):	4990.0	ft	Dietz Shape Factor:	31.62	
Form Bottom (TVD):	5010.0	ft	Formation Height (TVD):	20.0	ft
Borehole Diameter:	8.5	in	Completion Percentage:	100	%
Wellbore Fluid:	Brine		Perf to Form Top (TVD):	0.0	ft
Fluid Density:	8.763	ppg			

Formation

Rock Type:	Sandstone	Formation Fluid:	Oil	[GLR=436 SCF/STB]	
Porosity:	20.0	%	Gravity (Density):	15.0	deg API
Horizontal Permeability:	100.00	md	Form Volume Factor:	1.13	bbt/STB
Vertical Permeability:	20.00	md	Viscosity:	7.20	cp
kd/kc	0.20		Pore Pressure:	2234	psi
Wellbore Damage:	8	in	Formation Temperature:	158	deg F

Perforating System(s)

Perf #	Loaded Length (ft)	Phasing Angle (deg)	Shot Density / Open Perfs (spf/%)	Eff Shot Density (spf)	Crush Zone kc/k	Crush Zone (in)	Form Pen Avg (in)	Form Dia Avg (in)	EH Dia Avg (in)
1	20.0	60	5.00/100	5.00	0.04	0.50	20.80 ^	1.09	0.51

^ Concrete-based Model: Based on traditional API Section 1 results converted to downhole conditions

Perf #	Eff Skin	Darcy Skin	Perf Skin	Crush Zone Skin	Deviation Skin	Partially Open Skin	Non-Darcy Coef (1/STB/day)	Non-Darcy Skin	PR	PI * (STB/day) (/psi)	Flow * Rate (STB/day)
1	1.86	1.86	1.86	1.98	0.00	0.00	2.71e-5	3.545e-4	0.78	0.43	14.7
OH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.652e-6	7.757e-5	1.00	0.55	18.8
OH _{dmg}	4.23	4.23	0.00	0.00	0.00	0.00	2.261e-5	2.321e-4	0.62	0.34	11.6

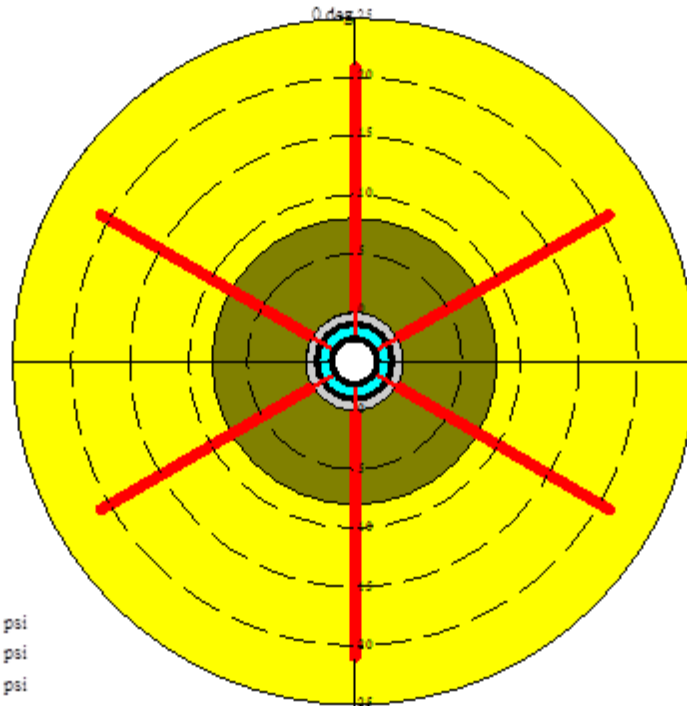
1. 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX

* At the stable bottom hole flowing pressure Pwf=2200 psi

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Perforating System

4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX, 37.0 g, OD 4.5 in
60° Phasing 5.00 spf



Rock Type: Sandstone
Rock UCS: 6403 psi
Vertical Stress: 5000 psi
Pore Pressure: 2234 psi

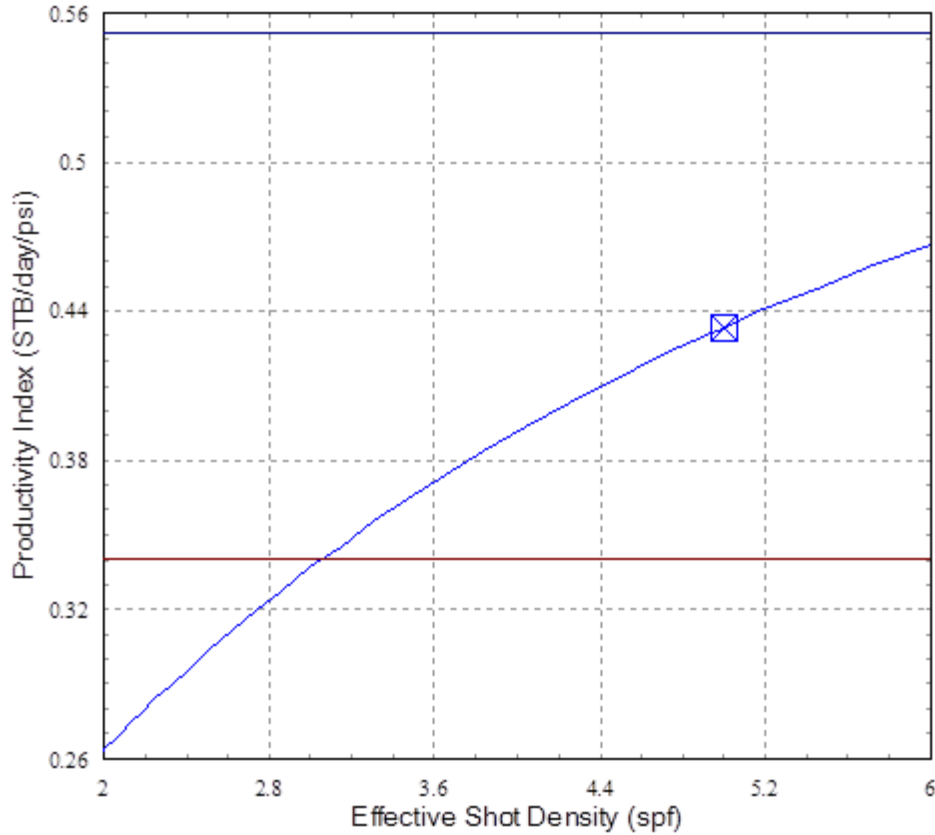
Brine
Cement
Damaged Zone
Formation

Angle (deg)	Clearance (in)	Total Pen ^ (in)	Form Pen ^ (in)	Form Dia (in)	Csg EH Dia (in)	
0	0.84	21.96	20.80	1.09	0.51	
60	0.84	21.96	20.80	1.09	0.51	
120	0.84	21.96	20.80	1.09	0.51	
180	0.84	21.96	20.80	1.09	0.51	
240	0.84	21.96	20.80	1.09	0.51	
300	0.84	21.96	20.80	1.09	0.51	
Average	0.84	21.96	20.80	1.09	0.51	
AOF (in ² /ft)					1.0169	at 5.00 spf

API: Pen 34.58 in, EHDia 0.46 in, RP43 5th Ed
^ Concrete-based Model

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Effective Shot Density



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

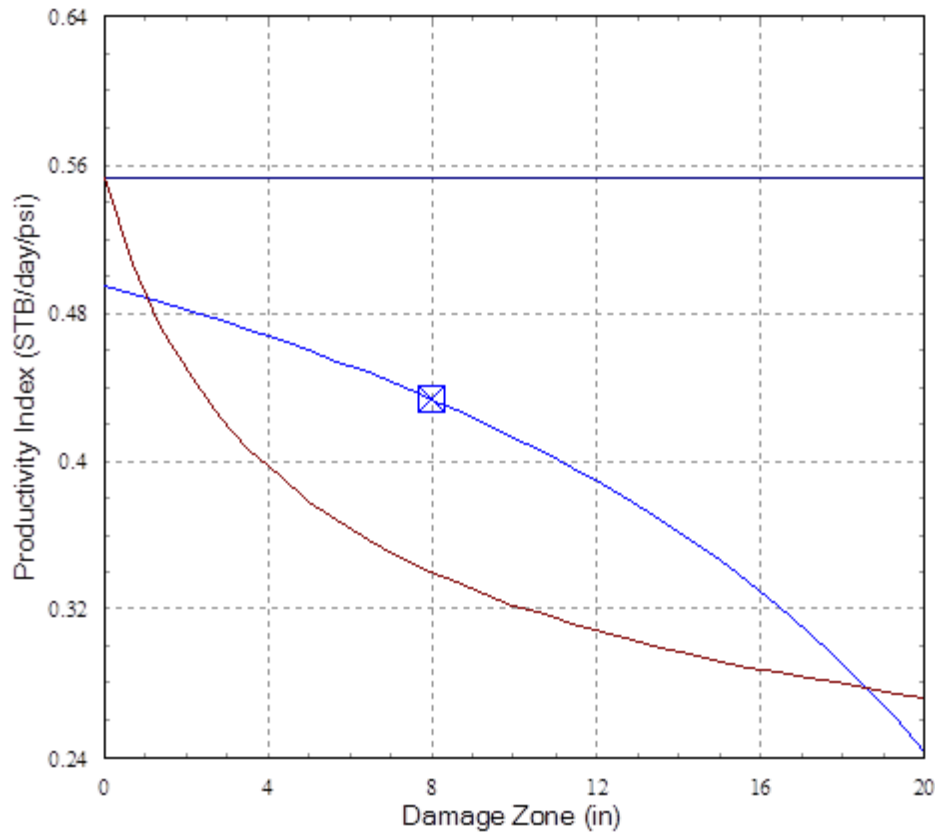
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/kc	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.7	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Damage Zone



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	ko/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

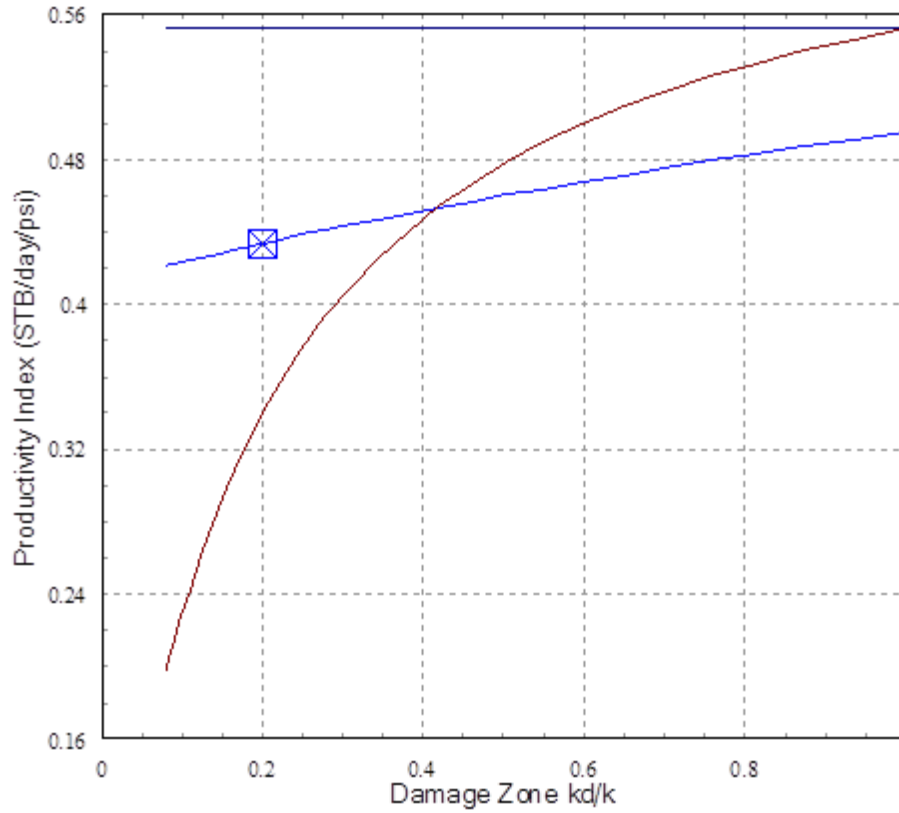
kh: 100.00 md
 kh/kr: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62
 Flow Rate: 14.7 STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Damage Zone kd/k



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

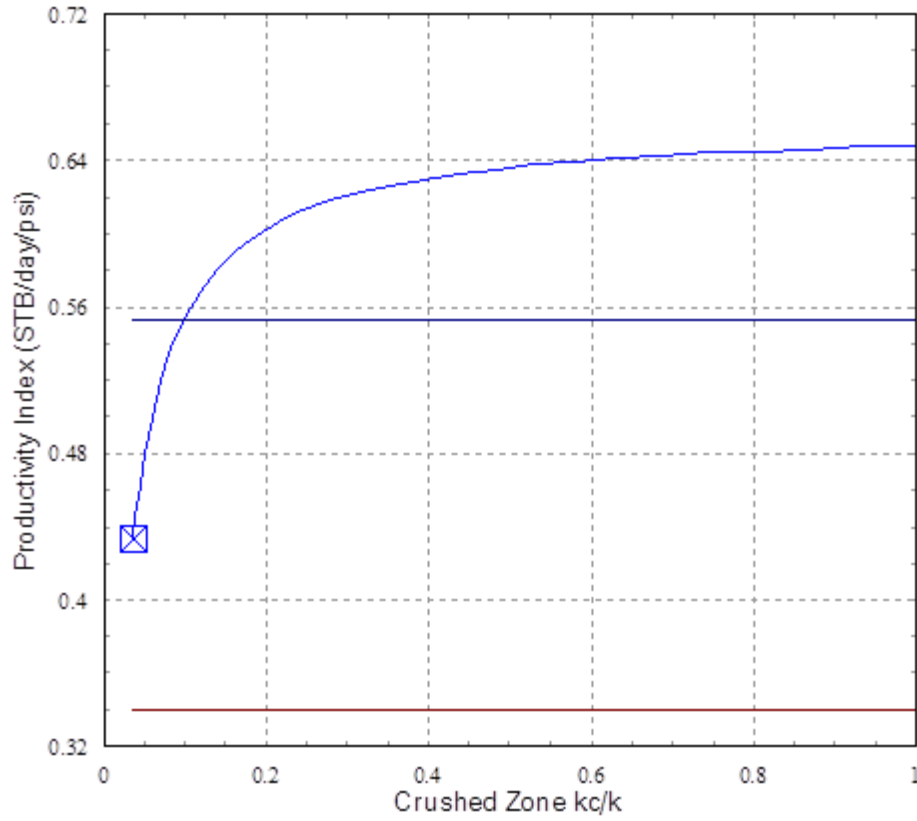
kd:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/kc	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.7	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Crushed Zone kc/k



- 4 1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09 [^]	20.0	100

[^] Concrete-based Model

Formation

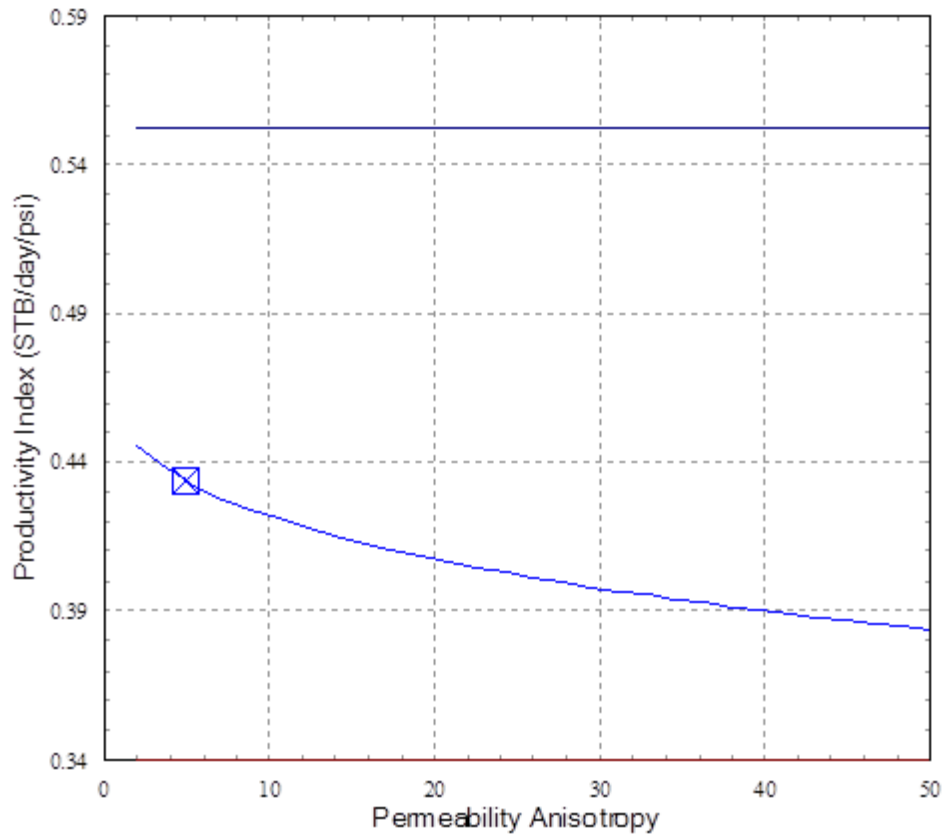
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.7	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer models of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Permeability Anisotropy



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	k _v /k _h	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

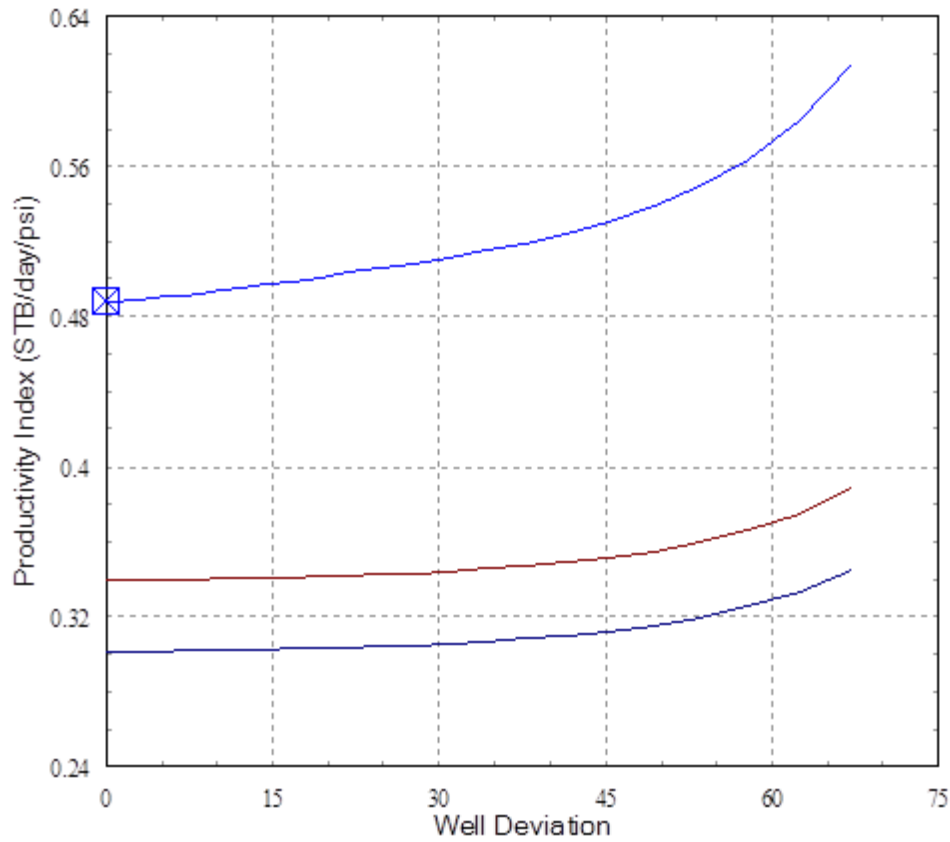
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.7	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Well Deviation



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kr/k	Form Pen/Dia Avg (m)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

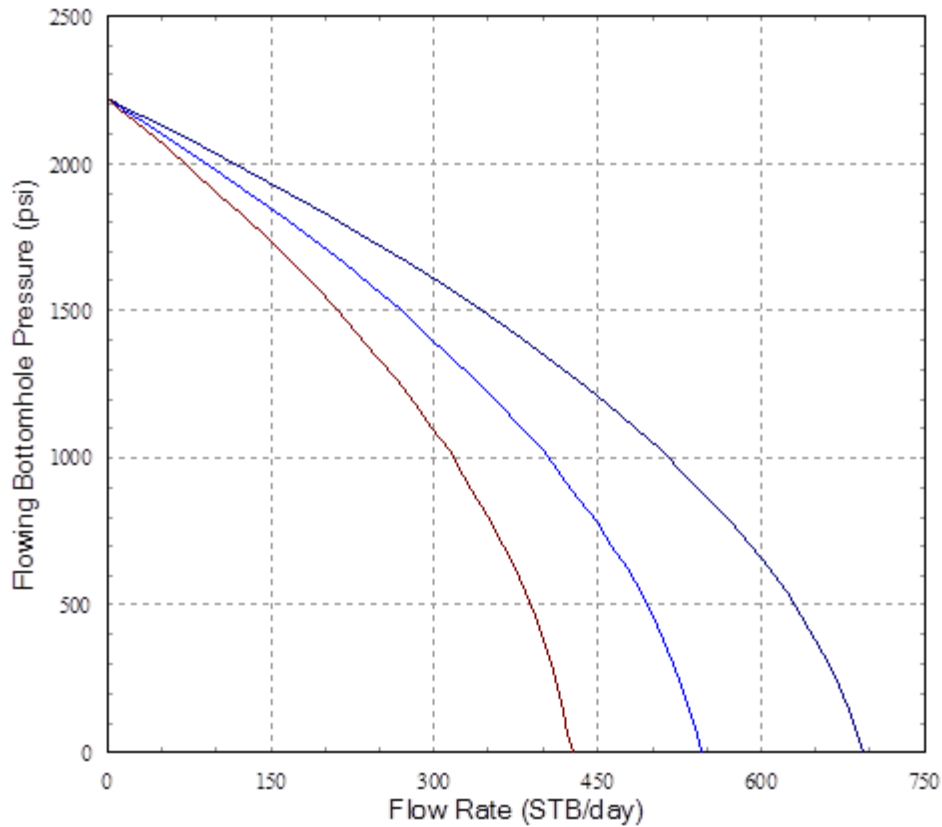
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62
 Flow Rate: 14.7 STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer model of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Depth Pwf vs Flow Rate (IPR)



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

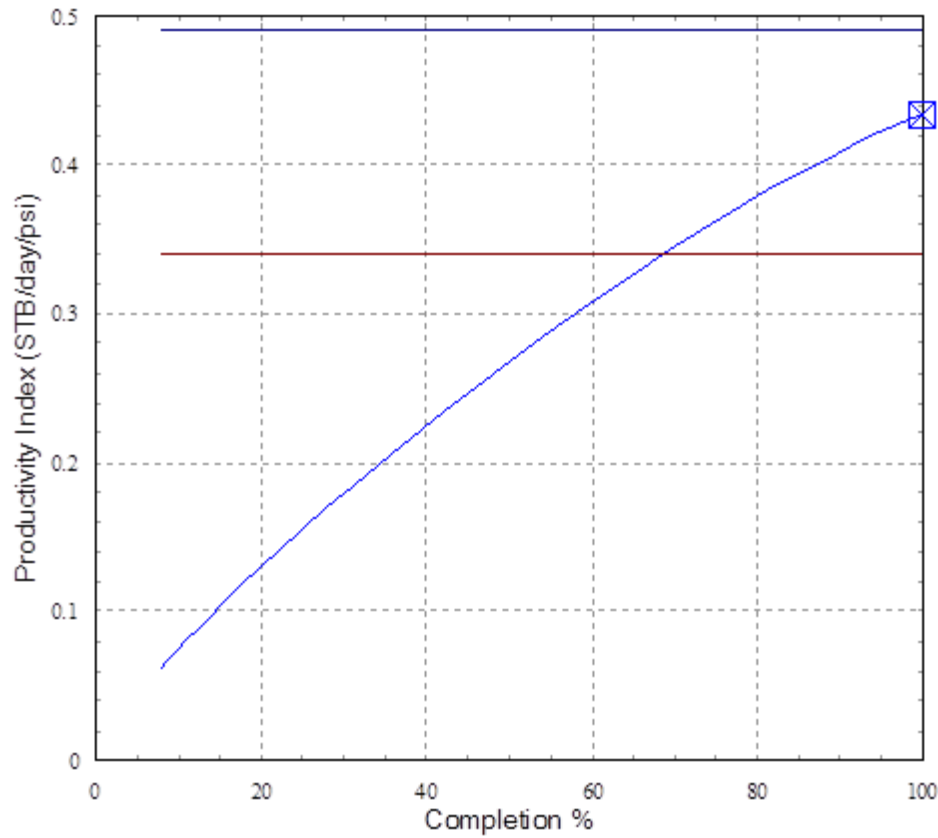
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in
 Fluid: Oil
 Gravity (Density): 15.0 deg API
 Form Volume Factor: 1.13 bbl/STB

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Completion %



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

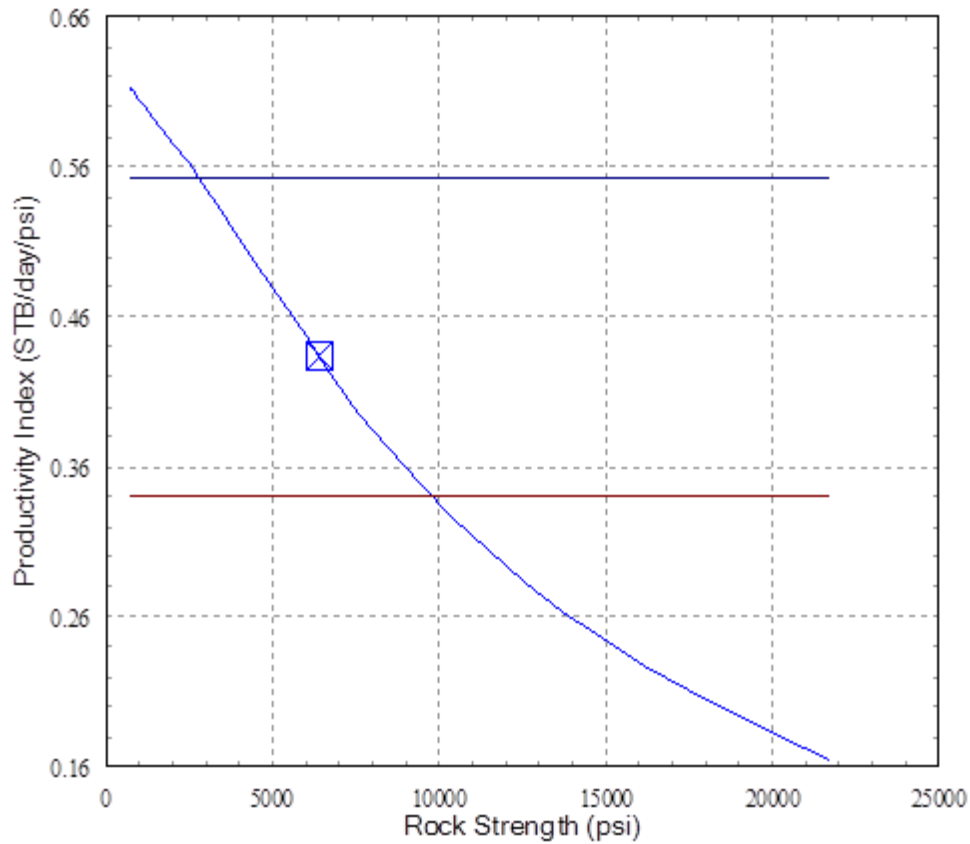
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/kc: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Rock Strength



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kr/k	Form Pen/Dia Avg (m)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

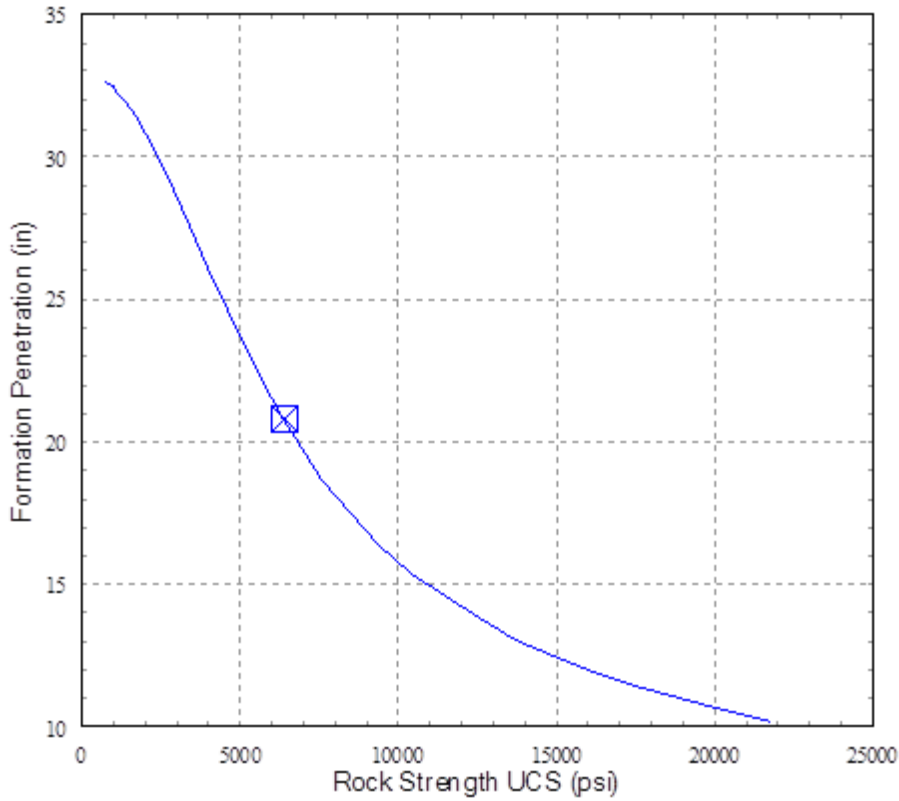
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62
 Flow Rate: 14.7 STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer model of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Penetration vs Rock Strength



— 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX

Gun #	API Pen (in)	Total Pen Avg (in)	Form Pen Avg (in)
1	34.58	21.96	20.80 ^

^ Concrete-based Model

Formation

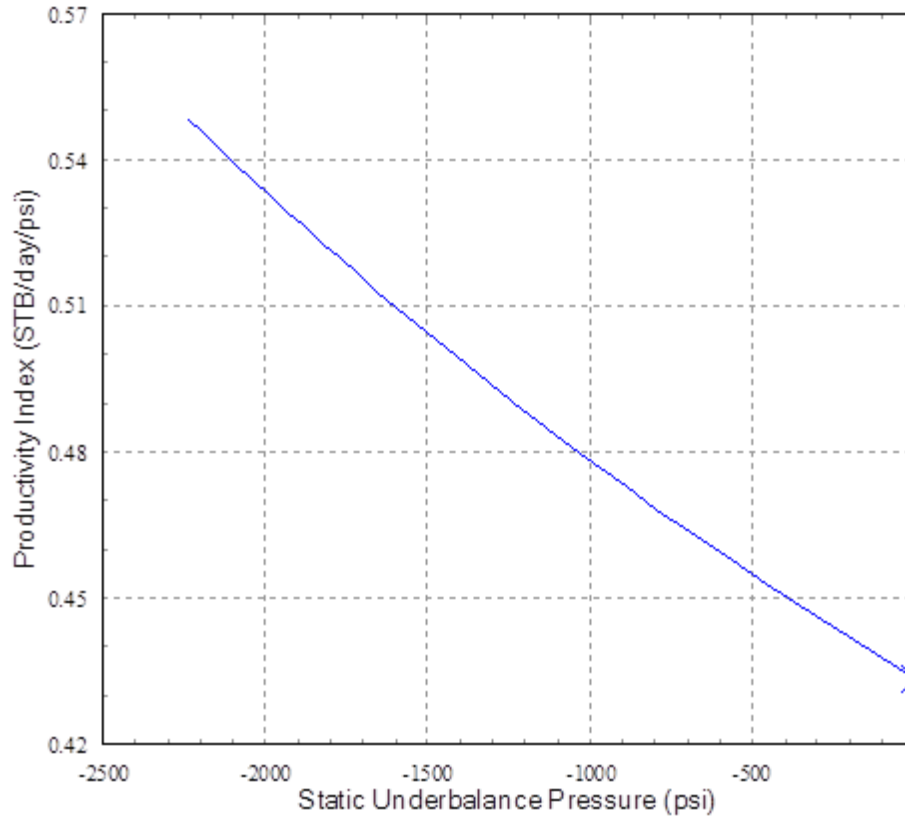
Rock Type: Sandstone
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 Well Damage: 8 in

Tubular(s)

OD (in)	Weight (lbm/ft)	Grade	Annulus	Density (ppg)
7	29.00	L80	Cement	15.86

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Static Underbalance Pressure



— 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.80/1.09 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

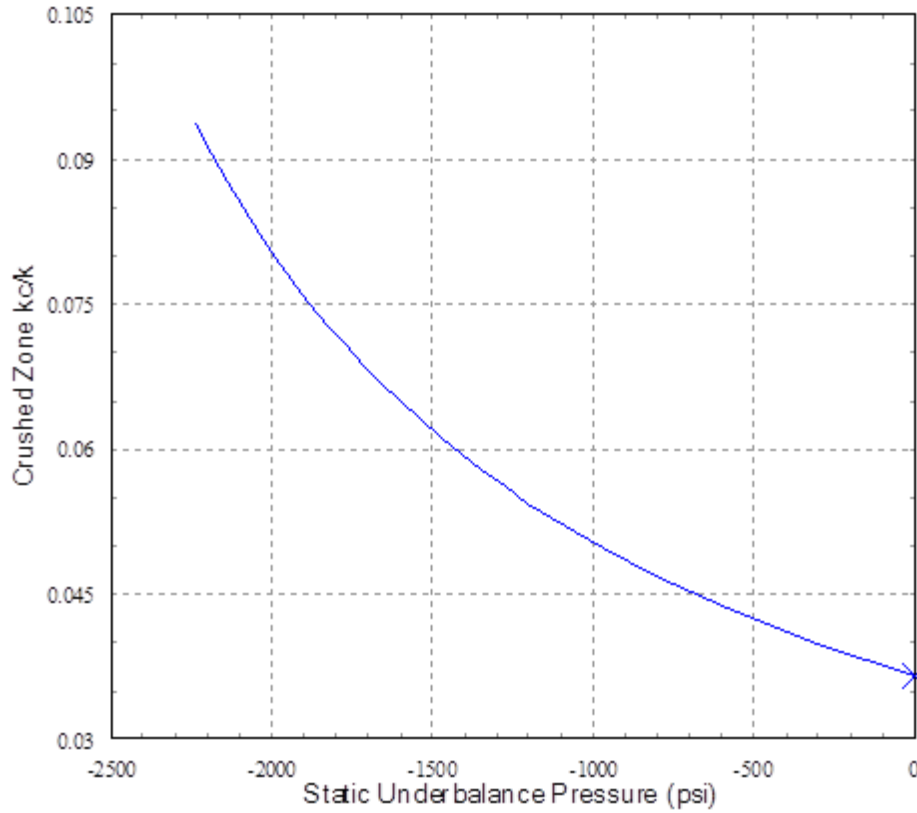
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm3
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.7	STB/day

Recent research and field results indicate that a static underbalance alone is insufficient to achieve clean perforations. A PURE design to achieve a dynamic underbalance immediately after perforating will deliver perforations with a kD/k of about 1 and is the preferred method of perforating job design. Typically, a kD/k from 0.05 to 0.3 is obtainable with a traditional static underbalance job design. SPAN results are based on "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE30081 (L. Behrmann). Results are provided in good faith without warranty.

Crushed Zone kc/k vs Static Underbalance Pressure



— 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX

Gun #	Static UB/OB (psi)	kc/k	Form Pen/Dia Avg (in)	Comp Len (ft)	Comp %
1	0	0.04	20.80/1.09 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

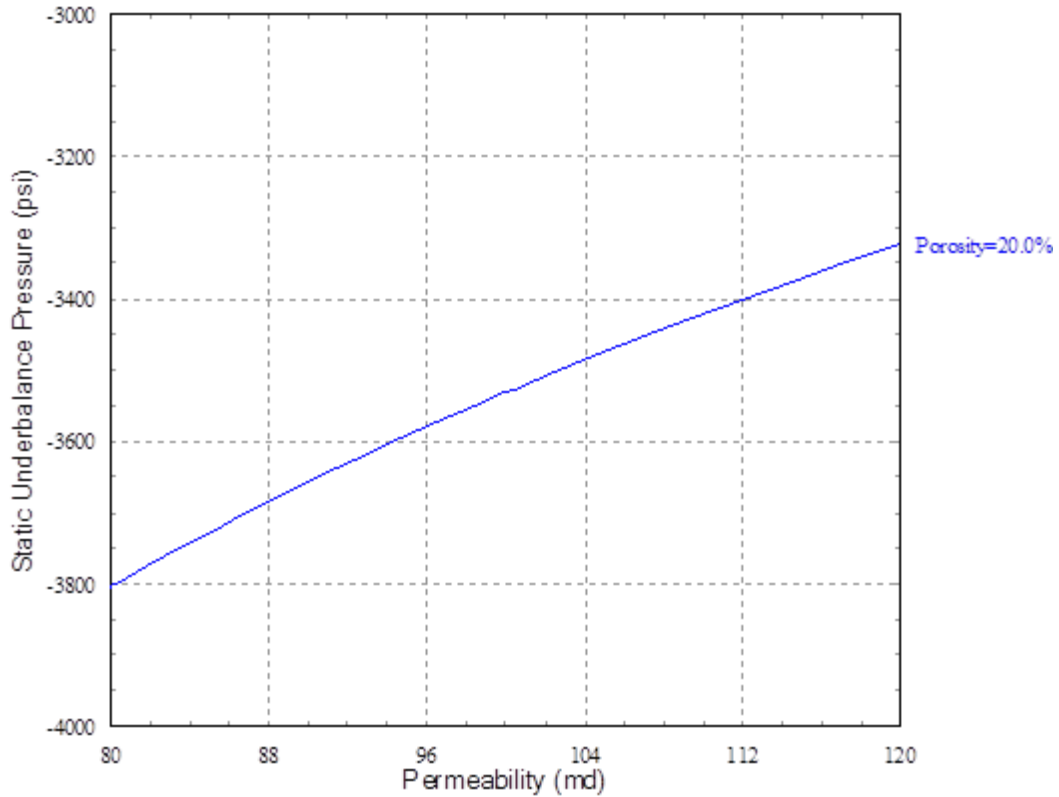
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/kc	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.7	STB/day

Recent research and field results indicate that a static underbalance alone is insufficient to achieve clean perforations. A PURE design to achieve a dynamic underbalance immediately after perforating will deliver perforations with a kc/k of about 1 and is the preferred method of perforating job design. Typically, a kc/k from 0.05 to 0.3 is obtainable with a traditional static underbalance job design. SPAN results are based on "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE 30081 (L. Behrmann). Results are provided in good faith without warranty.

Optimum Underbalance vs Permeability and Porosity



- 4-1/2" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Chrg Dia (mm)	Form Pen Avg (in)	Form Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	51.00	20.80 ^	1.09	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

Rock Type:	Sandstone
Porosity:	20.0 %
kh:	100.00 md
kv:	20.00 md
Rock UCS:	6403 psi
Vertical Stress:	5000 psi
Pore Pressure:	2234 psi

Completion

Well Deviation:	0 deg
Formation Thickness (TVD):	20.0 ft
Wellbore Length:	20.0 ft
Drainage Area:	31.42 acre
Dietz Shape Factor:	31.62
Flow Rate:	14.7 STB/day

Recent research and field results indicate that a static underbalance alone is insufficient to achieve clean perforations. A PURE design to achieve a dynamic underbalance immediately after perforating will deliver perforations with a rock of about 1 and is the preferred method of perforating job design. Typically, a rock from 0.05 to 0.3 is obtainable with a traditional static underbalance job design. SPAN results are based on "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE30081 (L. Behrmann). Results are provided in good faith without warranty.

**ANEXO B SIMULACION SYSTEM PERFORATING ANALYSIS “SPAN” CASO BASE
TUBING CONVEYED PERFORATING “TCP”**

SPAN Rock
Perforating Analysis

Company : UIS
Well : CASO BASE (TCP)
Field :
Engineer : AArias4
Date : September 6, 2012

Schlumberger

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Penetration Report

Completion

Borehole Diameter:	8.5	in	Wellbore Fluid:	Brine
Form Top (TVD):	4990.0	ft	Fluid Density:	8.763 ppg
Form Bottom (TVD):	5010.0	ft		

Tubular(s)

Casing #	Outer Diameter (in)	Weight (lbm/ft)	Grade	Inner Diameter (in)	Tubing Position	Stand-off	Annulus Material	Annulus Density (ppg)	Csg Str Remain (%)
1	7	29.00	L80	6.184	Centralized		Cement	15.86	96

Formation

Rock Type:	Sandstone	Rock Strength (UCS):	6403	psi
Porosity:	20.0 %	Vertical Stress:	5000	psi
Bulk Density:	2.31 g/cm ³	Pore Pressure:	2234	psi
Formation Fluid:	Oil	Wellbore Damage:	8	in

Perforating System(s)

Perf #	Phasing Angle (deg)	Shot Density (spf)	Gun Position	Total Pen Average (in)	Form Pen Average (in)	Form Dia Average (in)	EH Dia Average (in)	AOF (in ² /ft)
1	60	5.00	Centered	21.59 ^	20.44 ^	1.14	0.53	1.117

^ Concrete-based Model: Based on traditional API Section 1 results converted to downhole conditions

Gun System(s)

#	Name	Chg Wt (g)	Gun OD (in)	API Pen (in)	APIEH (in)	Comment
1	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	37.0	5	33.42	0.47	RP43 5th Ed

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Penetration Report

Completion

Borehole Diameter:	8.5	in	Wellbore Fluid:	Brine
Form Top (TVD):	4990.0	ft	Fluid Density:	8.763
Form Bottom (TVD):	5010.0	ft		ppg

Tubular(s)

Casing #	Outer Diameter (in)	Weight (lbm/ft)	Grade	Inner Diameter (in)	Tubing Position	Stand-off	Annulus Material	Annulus Density (ppg)	Csg Str Remain (%)
1	7	29.00	L80	6.184	Centralized		Cement	15.86	96

Formation

Rock Type:	Sandstone	Rock Strength (UCS):	6403	psi
Porosity:	20.0	%	Vertical Stress:	5000
Bulk Density:	2.31	g/cm ³	Pore Pressure:	2234
Formation Fluid:	Oil	Wellbore Damage:	8	in

Perforating System(s)

Perf #	Phasing Angle (deg)	Shot Density (spf)	Gun Position	Total Pen Average (in)	Form Pen Average (in)	Form Dia Average (in)	EH Dia Average (in)	AOF (in ² /ft)
1	60	5.00	Centered	21.59 [^]	20.44 [^]	1.14	0.53	1.117

[^] Concrete-based Model: Based on traditional API Section 1 results converted to downhole conditions

Gun System(s)

#	Name	Chg Wt (g)	Gun OD (in)	API Pen (in)	APIEH (in)	Comment
1	5" HSD, 51B HyperJet II, RDX	37.0	5	33.42	0.47	RP43 5th Ed

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Completion

Well Deviation:	0 deg	Drainage Area:	31.42 acre
Form Top (TVD):	4990.0 ft	Dist: Shape Factor:	31.62
Form Bottom (TVD):	5010.0 ft	Formation Height (TVD):	20.0 ft
Borehole Diameter:	8.5 in	Completion Percentage:	100 %
Wellbore Fluid:	Brine	Perf to Form Top (TVD):	0.0 ft
Fluid Density:	8.763 ppg		

Formation

Rock Type:	Sandstone	Formation Fluid:	Oil [GLR=436 SCF/STB]
Porosity:	20.0 %	Gravity (Density):	15.0 deg API
Horizontal Permeability:	100.00 md	Form Volume Factor:	1.13 bbl/STB
Vertical Permeability:	20.00 md	Viscosity:	7.20 cp
kd/kc:	0.20	Pore Pressure:	2234 psi
Wellbore Damage:	8 in	Formation Temperature:	158 deg F

Perforating System(s)

Perf #	Loaded Length (ft)	Phasing Angle (deg)	Shot Density Open Perfs (spf/%)	Eff Shot Density (spf)	Crush Zone kc/kc	Crush Zone (in)	Form Pen Avg (in)	Form Dia Avg (in)	EH Dia Avg (in)
1	20.0	60	5.00/100	5.00	0.04	0.50	20.44^	1.14	0.53

^ Concrete-based Model: Based on traditional API Section 1 results converted to downhole conditions

Perf #	Eff Skin	Darcy Skin	Perf Skin	Crush Zone Skin	Deviation Skin	Partially Open Skin	Non-Darcy Coef (1/STB/day)	Non-Darcy Skin	PR	PI * (STB/day) (/psi)	Flow * Rate (STB/day)
1	1.95	1.95	1.95	2.02	0.00	0.00	2.724e-5	3.529e-4	0.78	0.43	14.6
OH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.652e-6	7.757e-5	1.00	0.55	18.8
OHdmg	4.23	4.23	0.00	0.00	0.00	0.00	2.261e-5	2.321e-4	0.62	0.34	11.6

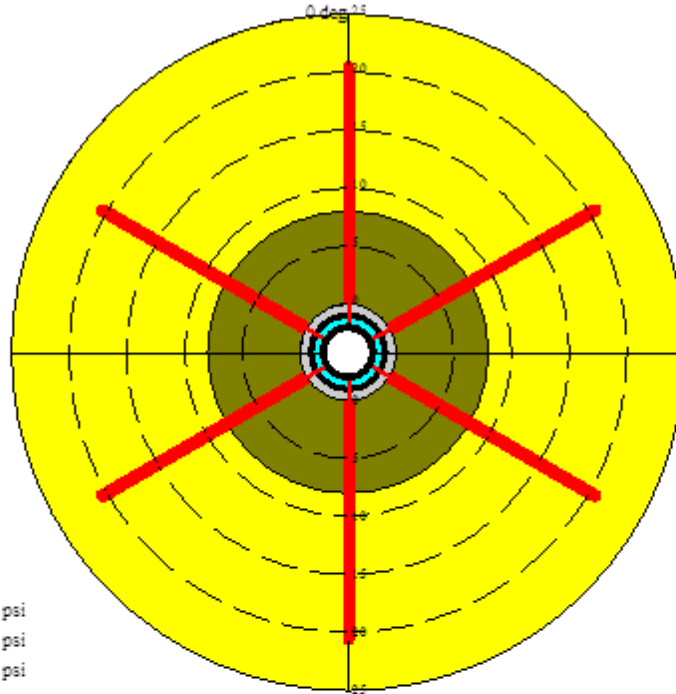
1. 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX

* At the stable bottom hole flowing pressure Pwf=2200 psi

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Perforating System

5" HSD, 51B HyperJet II, RDX, 37.0 g, OD 5 in
60° Phasing 5.00 spf



Rock Type: Sandstone
Rock UCS: 6408 psi
Vertical Stress: 5000 psi
Pore Pressure: 2234 psi

Brine
Cement
Damaged Zone
Formation

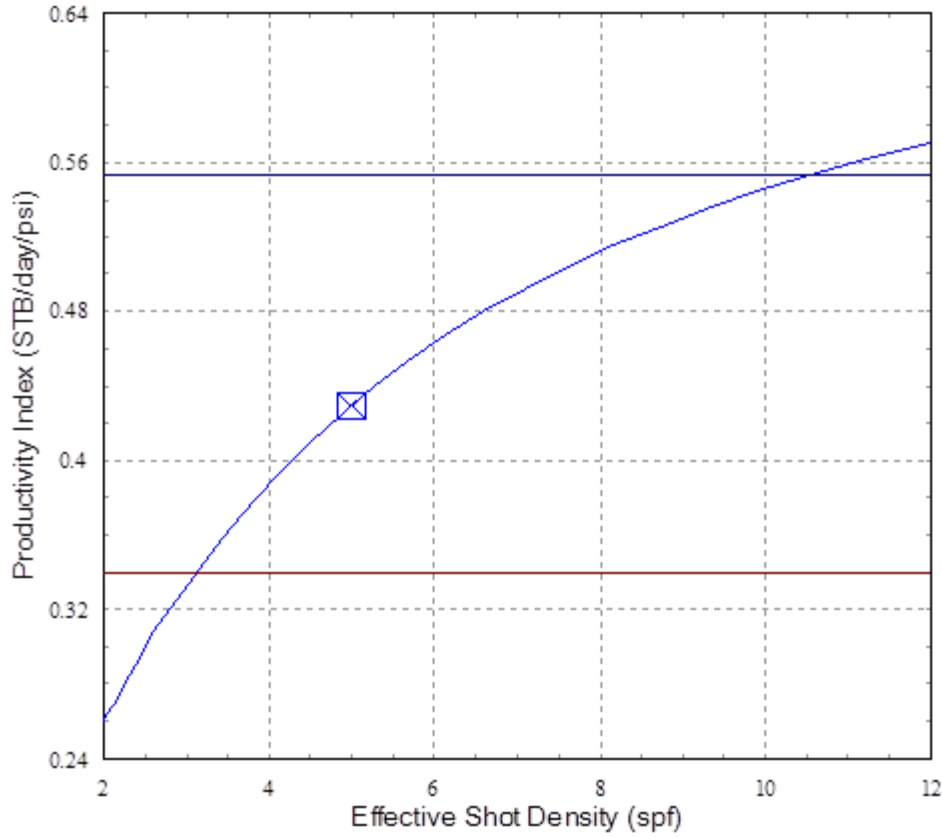
Angle (deg)	Clearance (in)	Total Pen ^ (in)	Form Pen ^ (in)	Form Dia (in)	Csg EH Dia (in)
0	0.59	21.59	20.44	1.14	0.53
60	0.59	21.59	20.44	1.14	0.53
120	0.59	21.59	20.44	1.14	0.53
180	0.59	21.59	20.44	1.14	0.53
240	0.59	21.59	20.44	1.14	0.53
300	0.59	21.59	20.44	1.14	0.53
Average	0.59	21.59	20.44	1.14	0.53
AOF (in ² /ft)					1.117

at 5.00 spf

API: Pen 33.42 in, EH Dia 0.47 in, RP43 5th Ed
^ Concrete-based Model

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Effective Shot Density



- 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

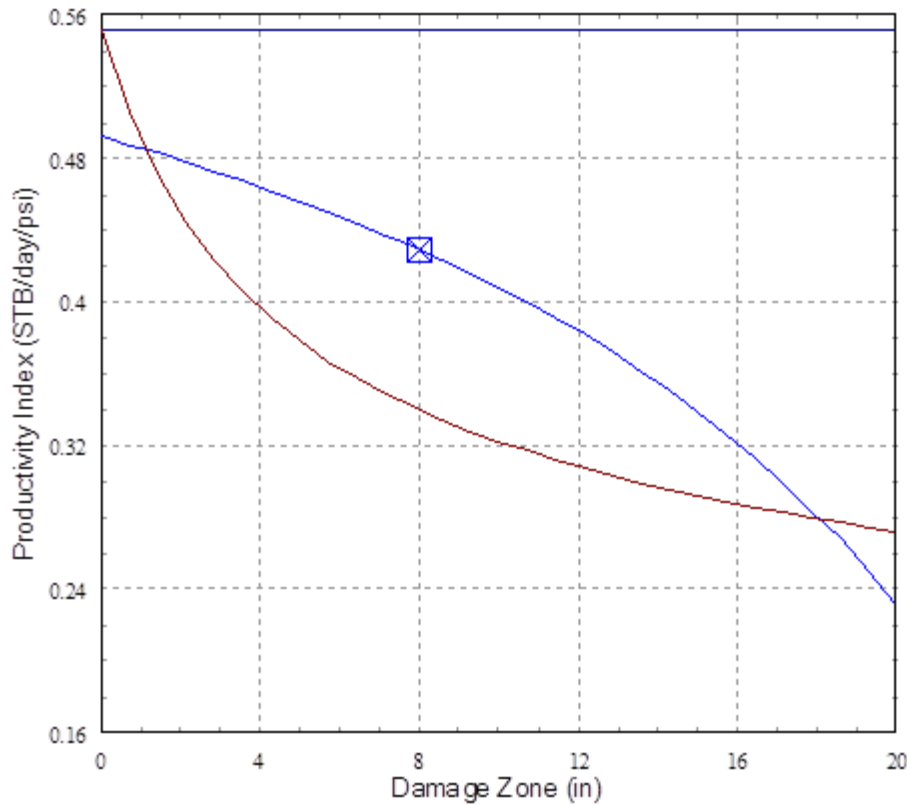
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62
 Flow Rate: 14.6 STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Damage Zone



- 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia. Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

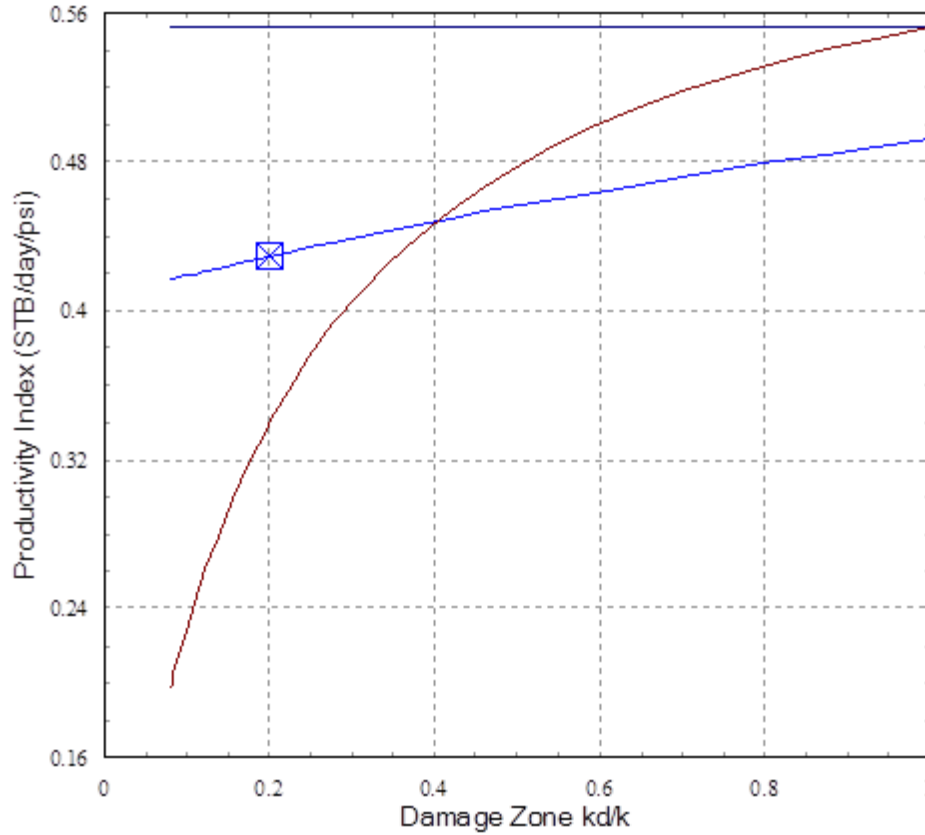
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.6	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Damage Zone kd/k



- 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kd/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

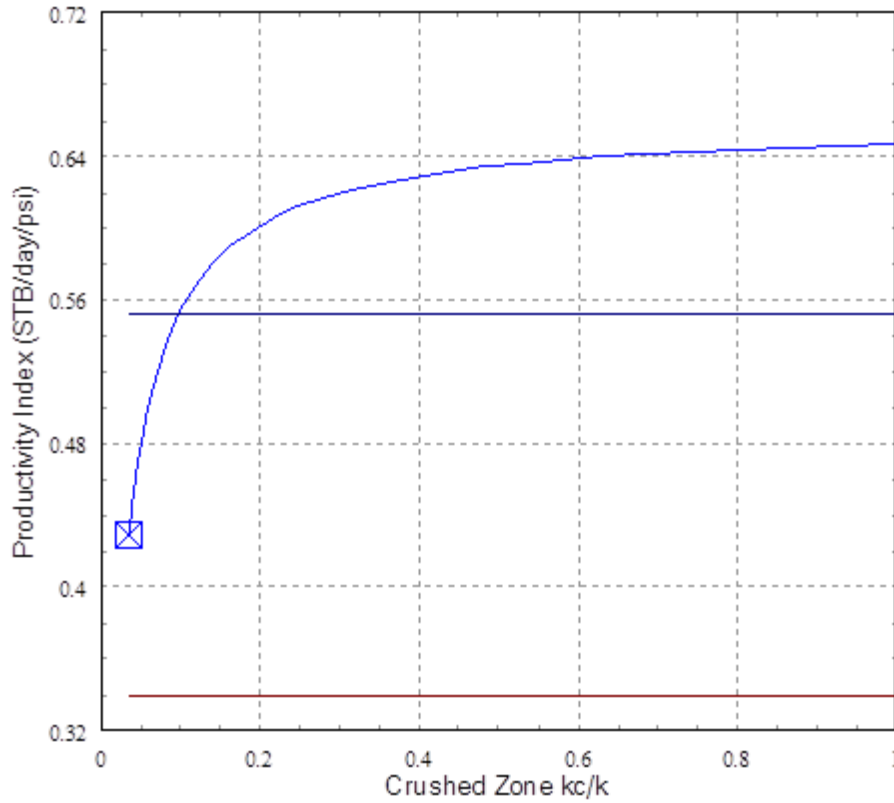
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62
 Flow Rate: 14.6 STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Crushed Zone kc/k



- 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia. Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

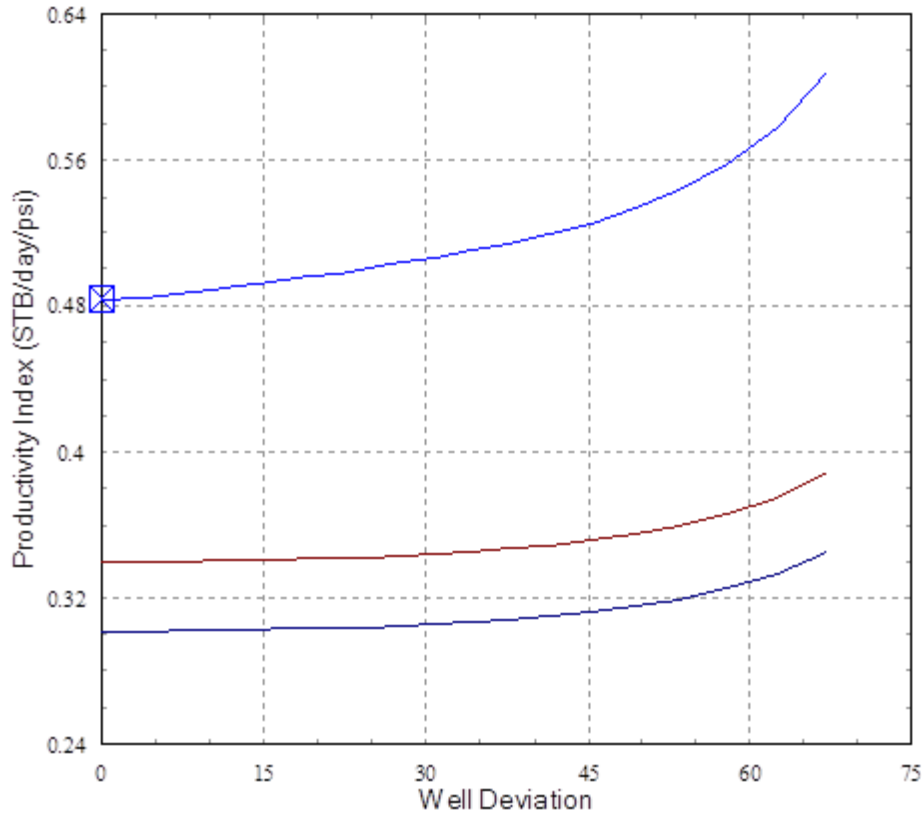
kh:	100.00	md
kh/cv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.6	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Well Deviation



- 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

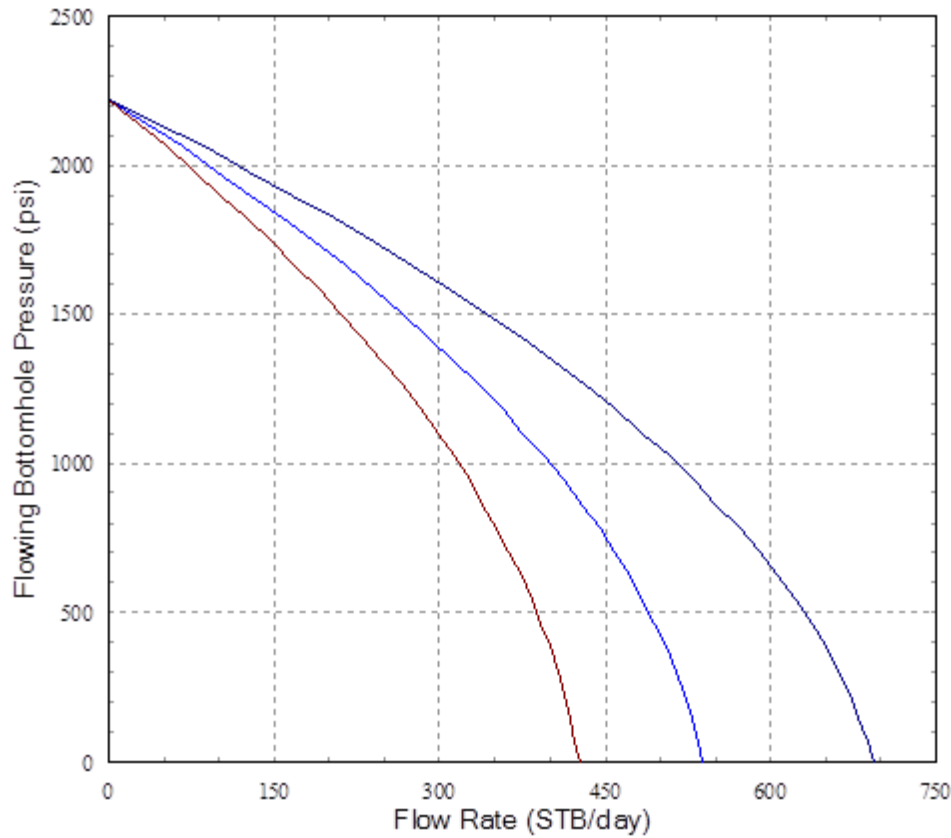
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm3
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.6	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer models for perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Depth Pwf vs Flow Rate (IPR)



- 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

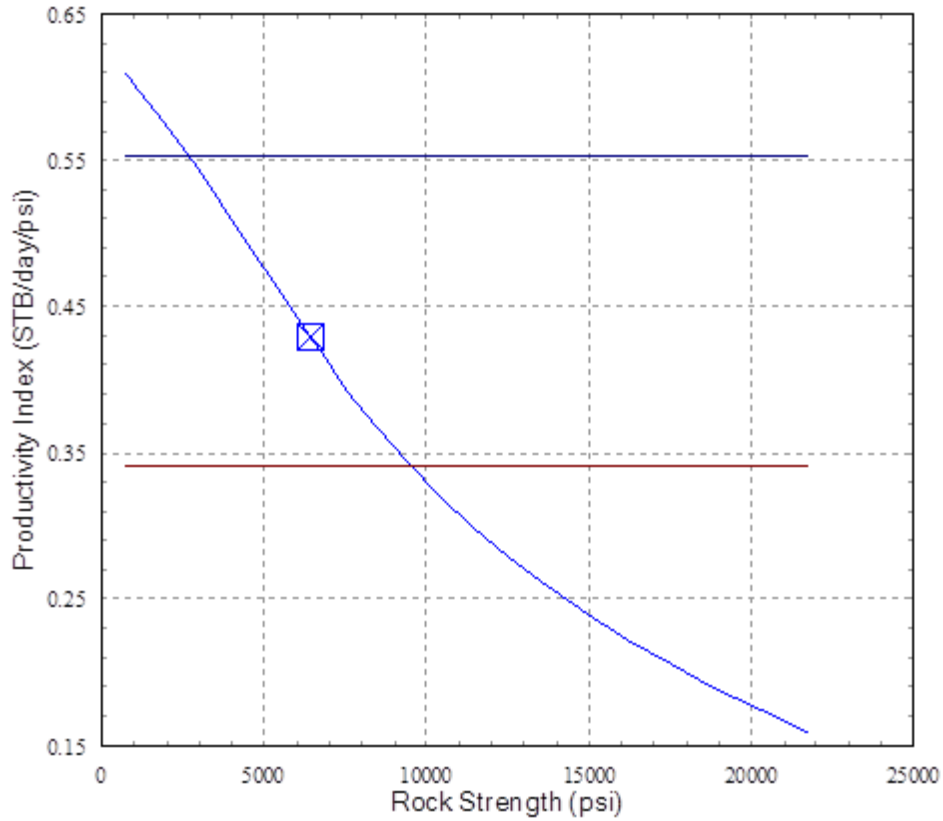
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 kd/kc: 0.20
 Well Damage: 8 in
 Fluid: Oil
 Gravity (Density): 15.0 deg API
 Form Volume Factor: 1.13 bbl/STB

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Rock Strength



- 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	k _c /k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

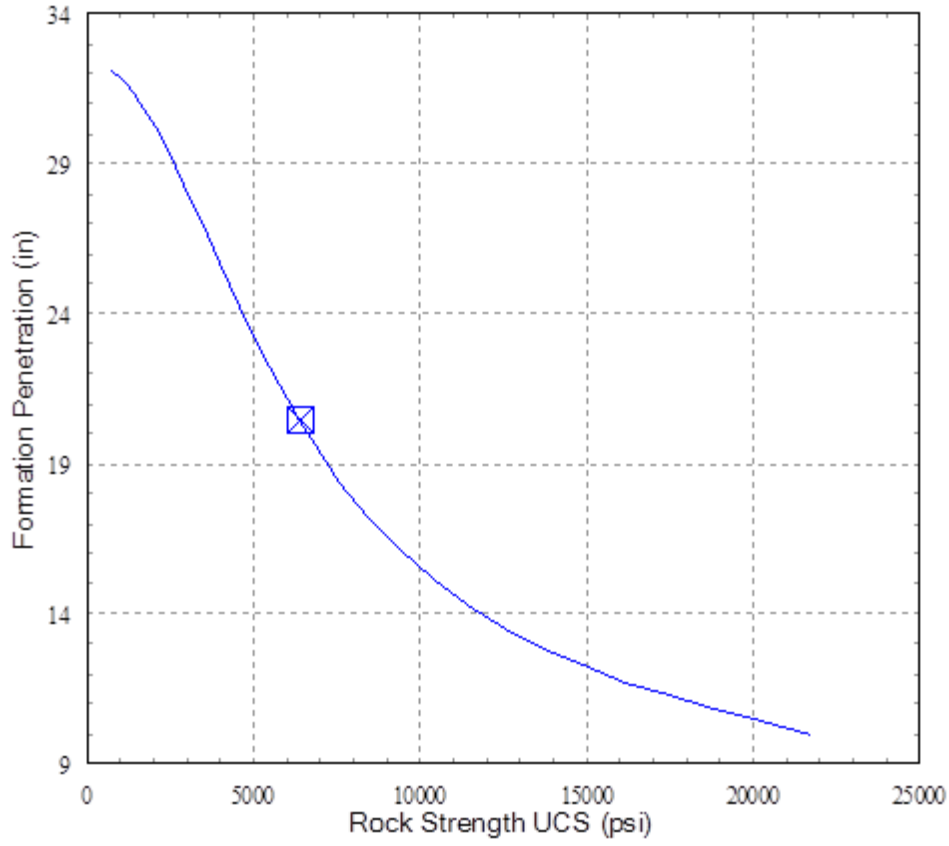
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
k _d /k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.6	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Penetration vs Rock Strength



— 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX

Gun #	API Pen (in)	Total Pen Avg (in)	Form Pen Avg (in)
1	33.42	21.59	20.44 [^]

[^] Concrete-based Model

Formation

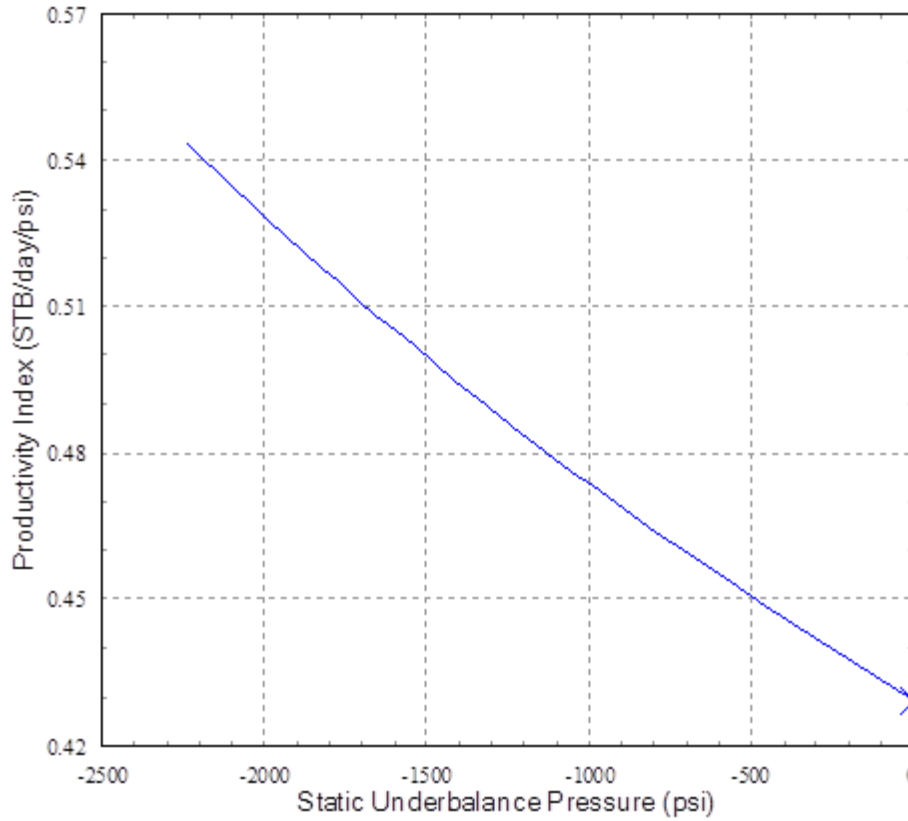
Rock Type: Sandstone
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 Well Damage: 8 in

Tubular(s)

OD (in)	Weight (lbm/ft)	Grade	Annulus	Density (ppg)
7	29.00	L80	Cement	15.86

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Static Underbalance Pressure



— 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	60	5.00	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

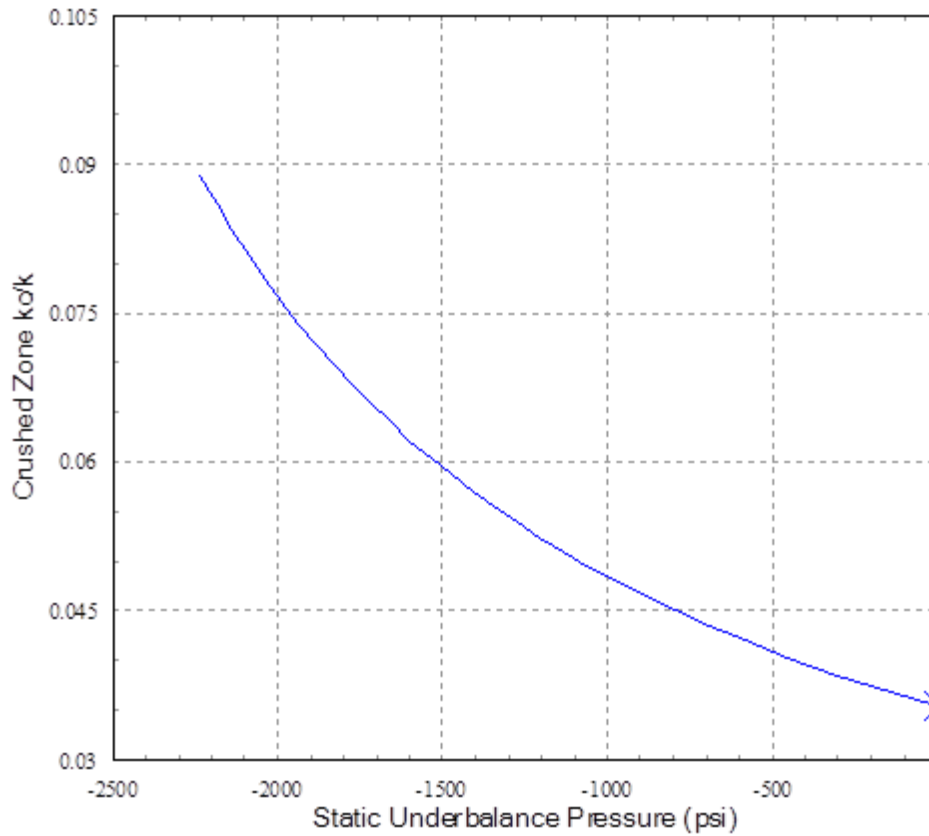
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.6	STB/day

Recent research and field results indicate that a static underbalance alone is insufficient to achieve clean perforations. A PURE design to achieve a dynamic underbalance immediately after perforating will deliver perforations with a kc/k of about 1 and is the preferred method of perforating job design. Typically, a kc/k from 0.05 to 0.3 is obtainable with a traditional static underbalance job design. SPAN results are based on "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE30081 (L. Behrmann). Results are provided in good faith without warranty.

Crushed Zone k_d/k vs Static Underbalance Pressure



— 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX

Gun #	Static UB/OB (psi)	k_d/k	Form Pen/Dia Avg (in)	Comp Len (ft)	Comp %
1	0	0.04	20.44/1.14 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

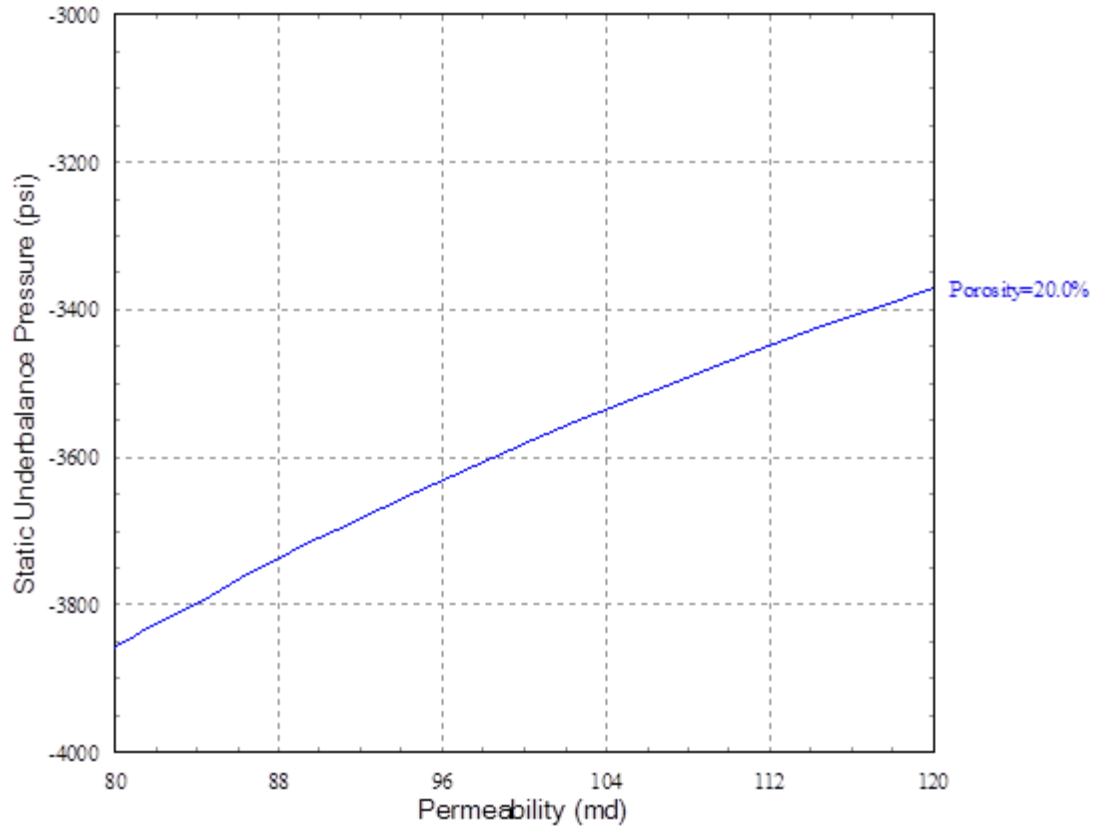
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
k_d/k :	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	14.6	STB/day

Recent research and field results indicate that a static underbalance alone is insufficient to achieve clean perforations. A PURE design to achieve a dynamic underbalance immediately after perforating will deliver perforations with a k_d/k of about 1 and is the preferred method of perforating job design. Typically, a k_d/k from 0.05 to 0.3 is obtainable with a traditional static underbalance job design. SPAN results are based on "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE 30081 (L. Behrmann). Results are provided in good faith without warranty.

Optimum Underbalance vs Permeability and Porosity



- 5" HSD, 51B HyperJet II, RDX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Chrg Dia (mm)	Form Pen Avg (in)	Form Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	51.00	20.44 [^]	1.14	20.0	100

[^] Concrete-based Model

Formation

Rock Type:	Sandstone
Porosity:	20.0 %
k _h :	100.00 md
k _v :	20.00 md
Rock UCS:	6403 psi
Vertical Stress:	5000 psi
Pore Pressure:	2234 psi

Completion

Well Deviation:	0 deg
Formation Thickness (TVD):	20.0 ft
Wellbore Length:	20.0 ft
Drainage Area:	31.42 acre
Diets Shape Factor:	31.62
Flow Rate:	14.6 STB/day

Recent research and field results indicate that a static underbalance alone is insufficient to achieve clean perforations. A PURE design to achieve a dynamic underbalance immediately after perforating will deliver perforations with a k_{eff} of about 1 and is the preferred method of perforating job design. Typically, a k_{eff} from 0.05 to 0.3 is obtainable with a traditional static underbalance job design. SPAN results are based on "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE 90081 (L. Behrmann). Results are provided in good faith without warranty.

**ANEXO C SIMULACIÓN SYSTEM PERFORATING ANALYSIS “SPAN” TUBING
CONVEYED PERFORATING MEJORADO “TCP MEJORADO”**

SPAN Rock
Perforating Analysis

Company : UIS
Well : CASO BASE (TCP MEJORADO)
Field :
Engineer : AArias4
Date : September 9, 2012

Schlumberger

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Company: UIS

Well: CASO BASE (TCP MEJORADO)

Penetration Report

Completion

Borehole Diameter:	8.5 in	Wellbore Fluid:	Brine
Form Top (TVD):	4990.0 ft	Fluid Density:	8.763 ppg
Form Bottom (TVD):	5010.0 ft		

Tubular(s)

Casing #	Outer Diameter (in)	Weight (lbm/ft)	Grade	Inner Diameter (in)	Tubing Position	Stand-off	Annulus Material	Annulus Density (ppg)	Csg Str Remain (%)
1	7	29.00	L80	6.184	Centered		Cement	15.86	82

Formation

Rock Type:	Sandstone	Rock Strength (UCS):	6403 psi
Porosity:	20.0 %	Vertical Stress:	5000 psi
Bulk Density:	2.31 g/cm ³	Pore Pressure:	2234 psi
Formation Fluid:	Oil	Wellbore Damage:	8 in

Perforating System(s)

Perf #	Phasing Angle (deg)	Shot Density (spf)	Gun Position	Total Pen Average (in)	Form Pen Average (in)	Form Dia Average (in)	EHDia Average (in)	AOF (in ² /ft)
1	120	12.00	Centered	14.59 ^	13.43 ^	1.13	0.53	2.6379

^ Concrete-based Model: Based on traditional API Section 1 results converted to downhole conditions

Gun System(s)

#	Name	Chg Wt (g)	Gun OD (in)	API Pen (in)	API EH (in)	Comment
1	6" HSD, 41B HyperJet II, HMX	22.0	6	21.07	0.38	RP43 4th Ed

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Company: UIS

Well: CASO BASE (TCP MEJORADO)

Productivity Report

Completion

Well Deviation:	0 deg	Drainage Area:	31.42 acre
Form Top (TVD):	4990.0 ft	Dietz Shape Factor:	31.62
Form Bottom (TVD):	5010.0 ft	Formation Height (TVD):	20.0 ft
Borehole Diameter:	8.5 in	Completion Percentage:	100 %
Wellbore Fluid:	Brine	Perf to Form Top (TVD):	0.0 ft
Fluid Density:	8.763 ppg		

Formation

Rock Type:	Sandstone	Formation Fluid:	Oil [GLR=436 SCF/STB]
Porosity:	20.0 %	Gravity (Density):	15.0 deg API
Horizontal Permeability:	100.00 md	Form Volume Factor:	1.13 bb/STB
Vertical Permeability:	20.00 md	Viscosity:	7.20 cp
kd/kc	0.20	Pore Pressure:	2234 psi
Wellbore Damage:	8 in	Formation Temperature:	158 deg F

Perforating System(s)

Perf #	Loaded Length (ft)	Phasing Angle (deg)	Shot Density / Open Perfs (spf/%)	Eff Shot Density (spf)	Crush Zone k _c /k	Crush Zone (in)	Form Pen Avg (in)	Form Dia Avg (in)	EH Dia Avg (in)
1	20.0	120	12.00/100	12.00	0.05	0.50	13.43 ^	1.13	0.53

^ Concrete-based Model: Based on traditional API Section 1 results converted to downhole conditions

Perf #	Eff Skin	Darcy Skin	Perf Skin	Crush Zone Skin	Deviation Skin	Partially Open Skin	Non-Darcy Coef (1/STB/day)	Non-Darcy Skin	PR	PI * (STB/day) (/psi)	Flow * Rate (STB/day)
1	1.02	1.02	1.02	0.83	0.00	0.00	2.057e-5	2.982e-4	0.87	0.48	16.3
OH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.652e-6	7.757e-5	1.00	0.55	18.8
OH _{drag}	4.23	4.23	0.00	0.00	0.00	0.00	2.261e-5	2.321e-4	0.62	0.34	11.6

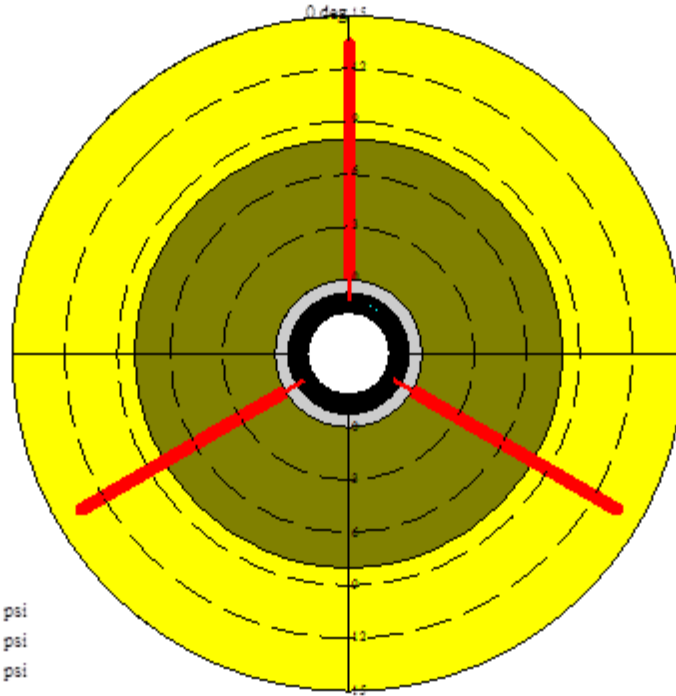
1. 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX

* At the stable bottom hole flowing pressure P_{wf}=2200 psi

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Perforating System

6" HSD, 41B HyperJet II, HMX, 22.0 g, OD 6 in
120° Phasing, 12.00 spf



Rock Type: Sandstone
Rock UCS: 6403 psi
Vertical Stress: 5000 psi
Pore Pressure: 2234 psi

Brine
Cement
Damaged Zone
Formation

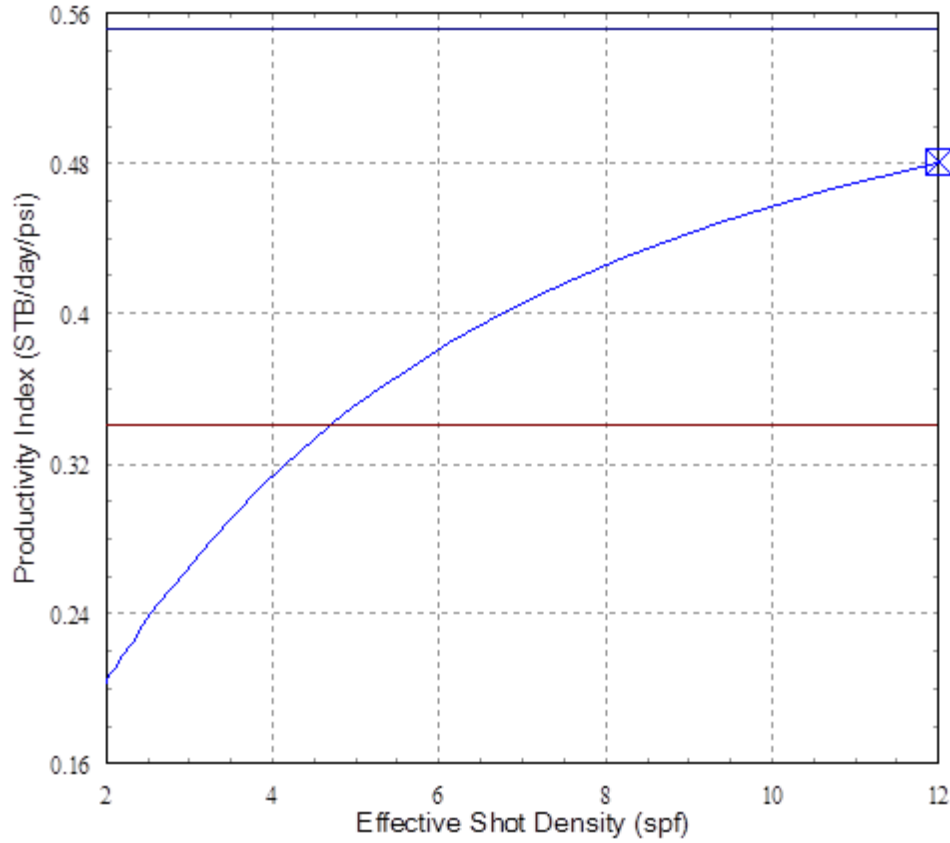
Angle (deg)	Clearance (in)	Total Pen ^ (in)	Form Pen ^ (in)	Form Dia (in)	Csg EH Dia (in)
0	0.09	14.59	13.43	1.13	0.53
120	0.09	14.59	13.43	1.13	0.53
240	0.09	14.59	13.43	1.13	0.53
Average	0.09	14.59	13.43	1.13	0.53
AOF (m ² /ft)					2.6379

at 12.00 spf

API Pen 21.07 in, EH Dia 0.38 in, RP43 4th Ed
^ Concrete-based Model

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Effective Shot Density



- 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kr/k	Form Pen/Dia Avg (m)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	120	12.00	0.05	13.43/1.13^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

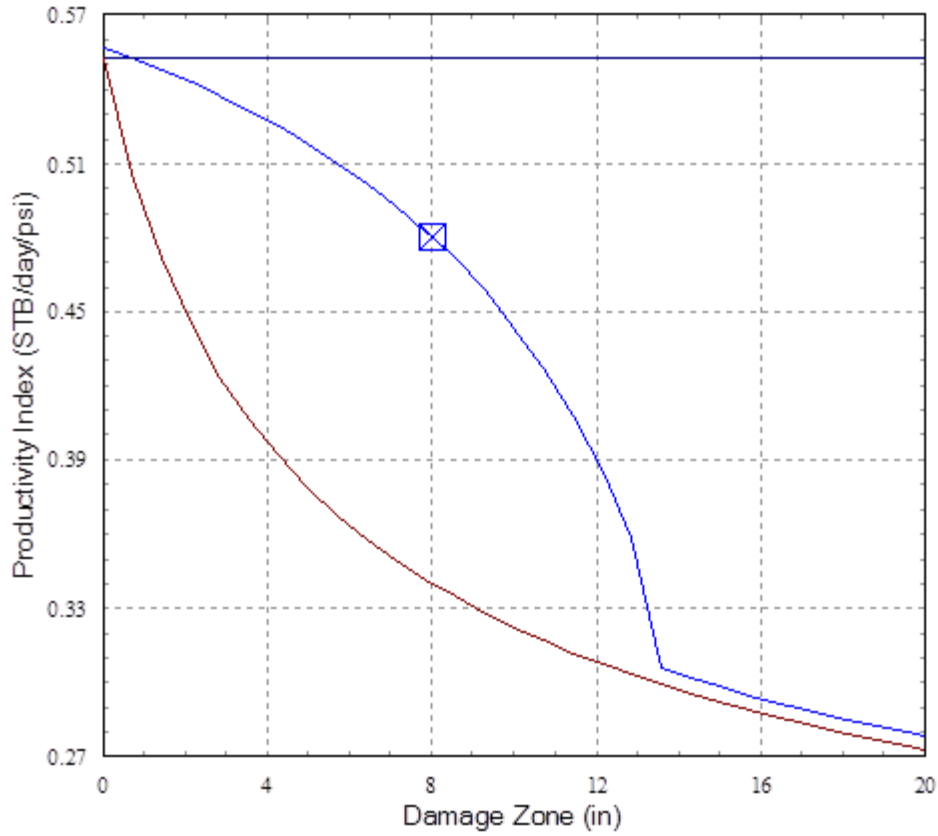
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62
 Flow Rate: 16.3 STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer model of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Damage Zone



- 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	lc/lc	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	120	12.00	0.05	13.43/1.13 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

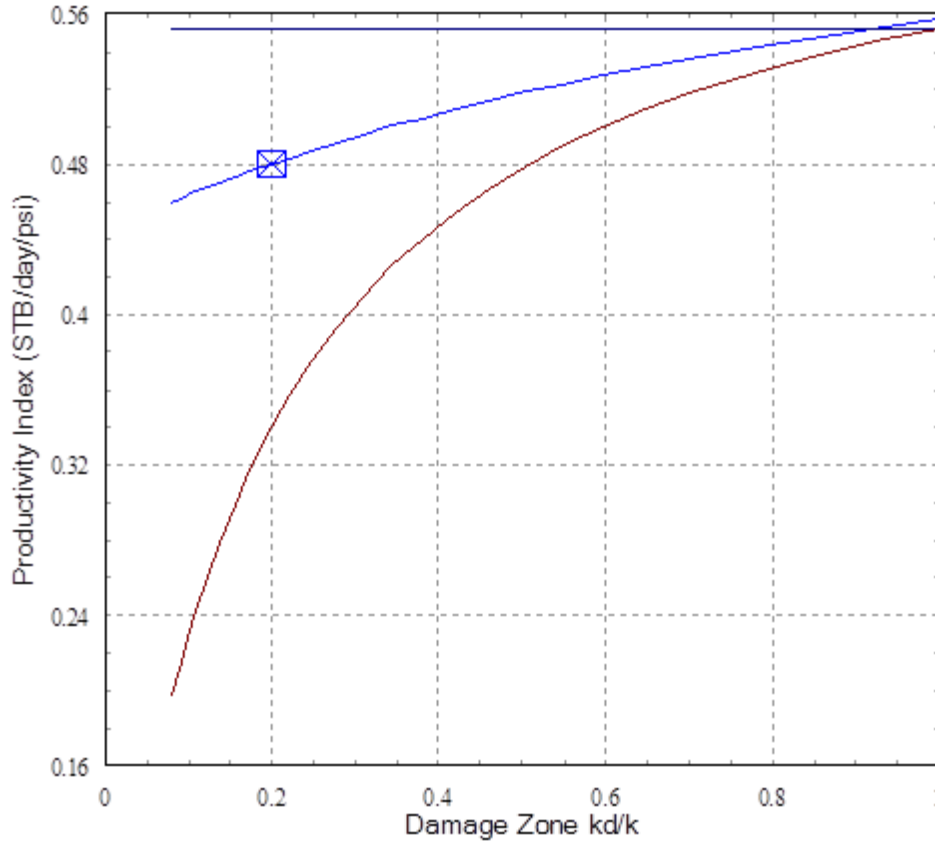
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/kc	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	16.3	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Damage Zone kd/k



- 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kd/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	120	12.00	0.05	13.43/1.13 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

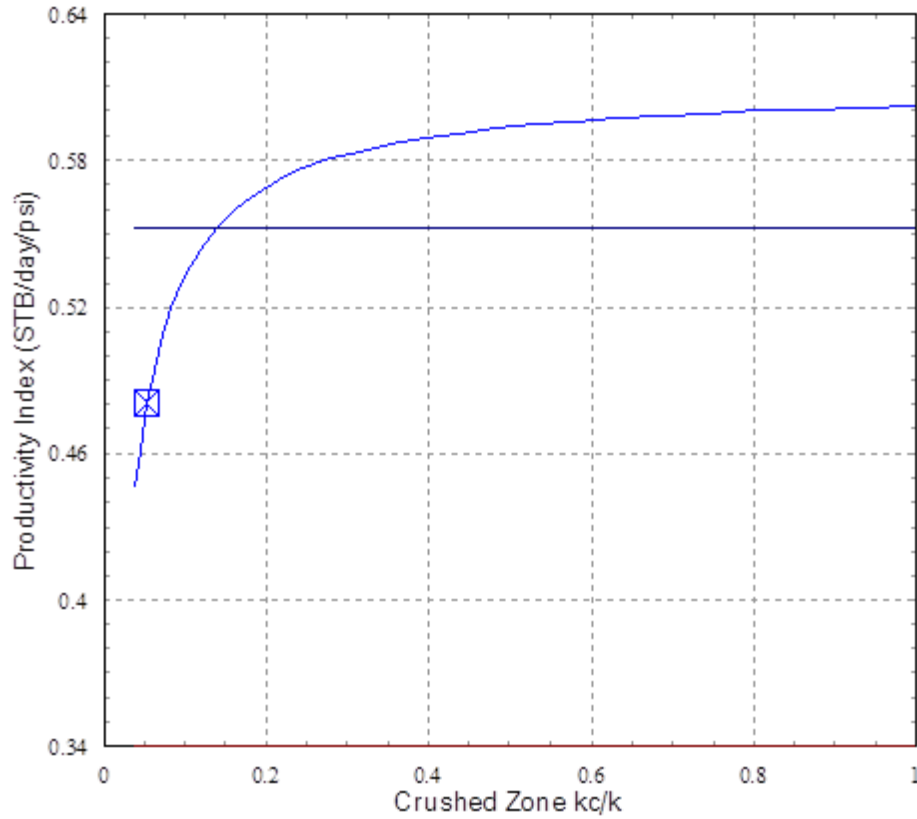
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62
 Flow Rate: 16.3 STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Crushed Zone kc/k



- 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kc/k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	120	12.00	0.05	13.43/1.13^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

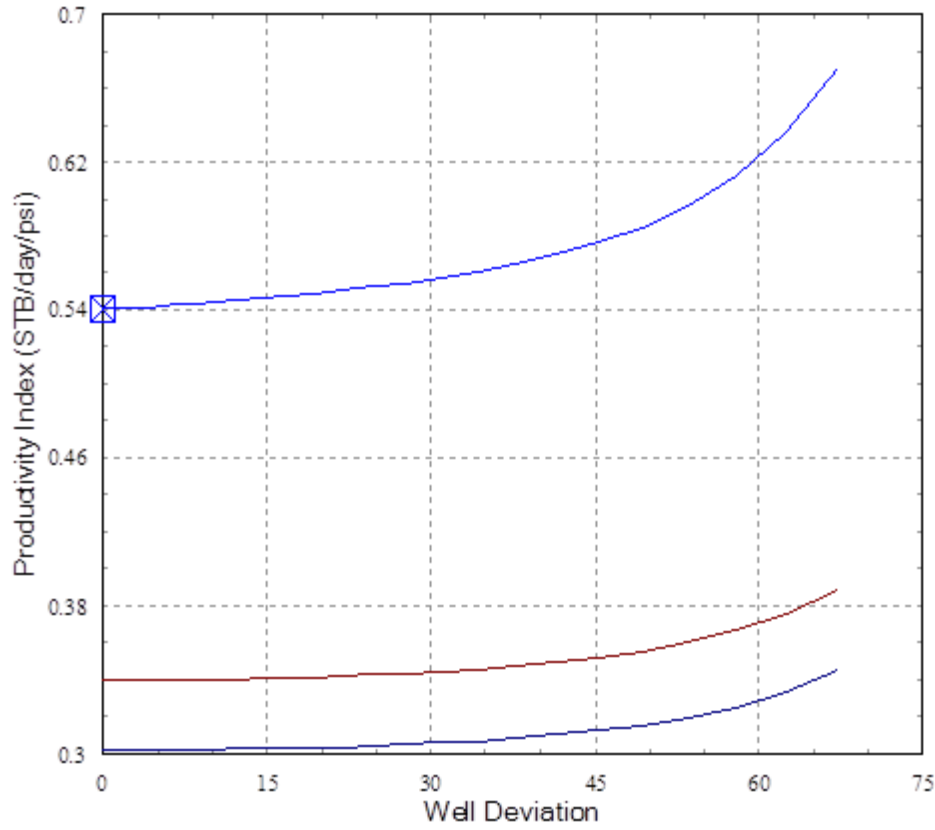
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	16.3	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer models of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Well Deviation



- 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	k _w /k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	120	12.00	0.05	13.43/1.13	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

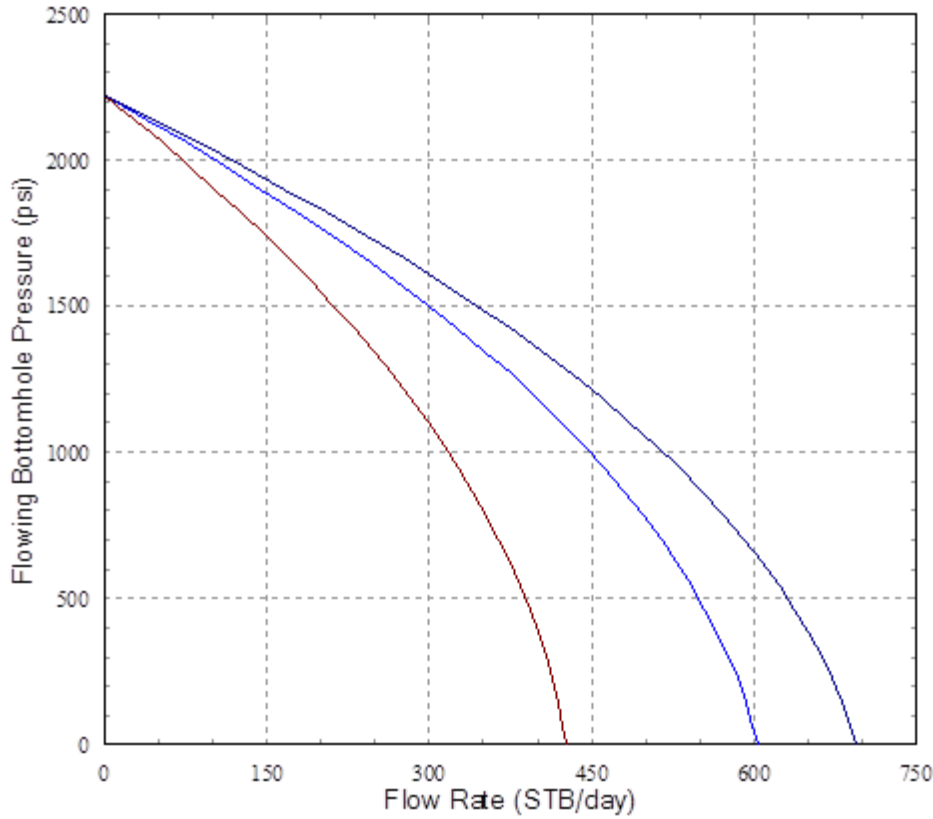
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
k _d /k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	16.3	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Depth Pwf vs Flow Rate (IPR)



- 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	k _c /k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	120	12.00	0.05	13.43/1.13 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

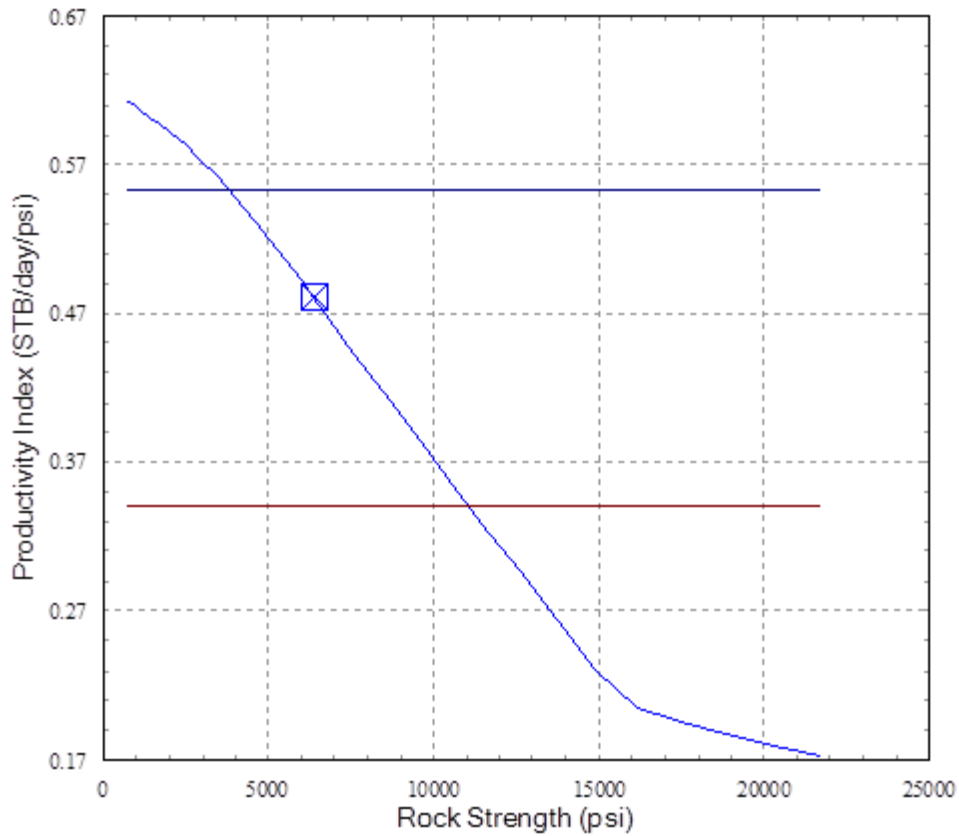
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in
 Fluid: Oil
 Gravity (Density): 15.0 deg API
 Form Volume Factor: 1.13 bbl/STB

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Rock Strength



- 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX
- Open Hole without Damage
- Open Hole with Damage

Gun #	Phasing	Effect (spf)	k _o /k	Form Pen/ Dia Avg (in)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	120	12.00	0.05	13.43/1.13 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

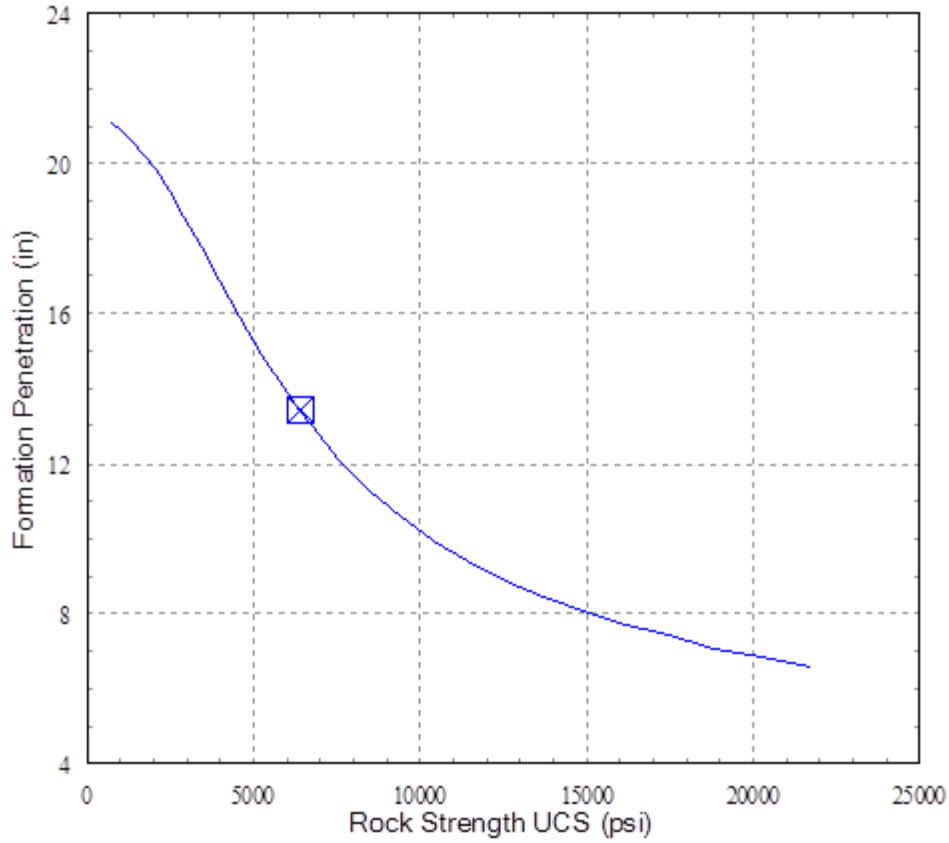
kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm ³
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	16.3	STB/day

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Penetration vs Rock Strength



— 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX

Gun #	API Pen (in)	Total Pen Avg (in)	Form Pen Avg (in)
1	21.07	14.59	13.43 [^]

[^] Concrete-based Model

Formation

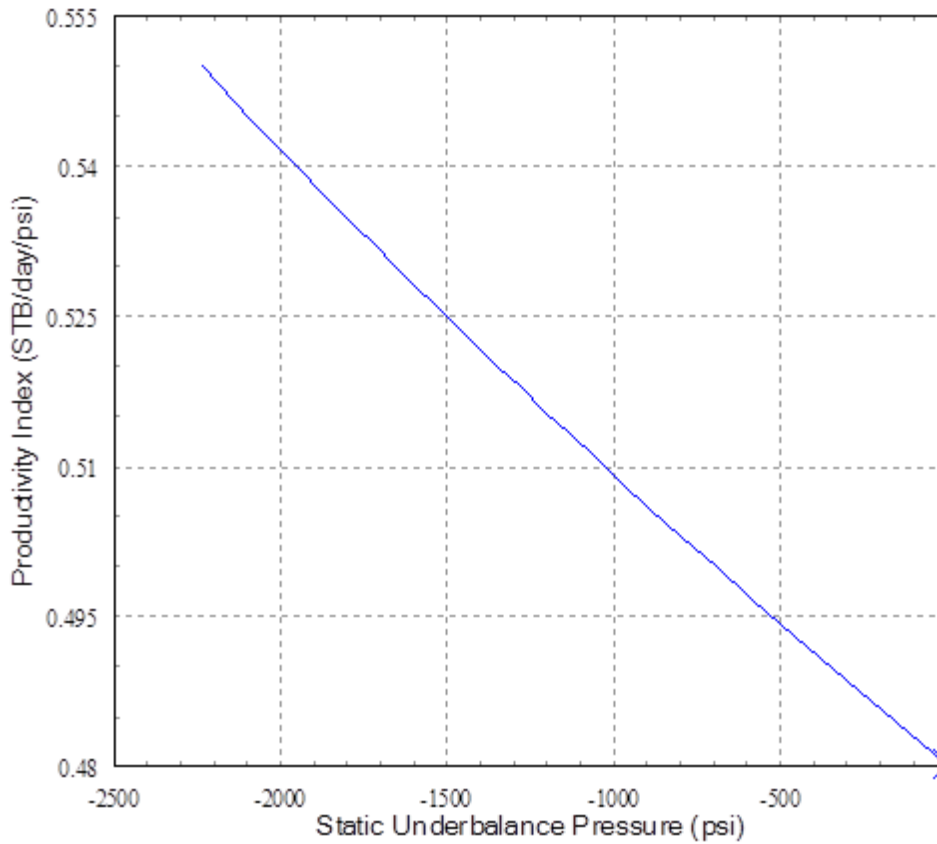
Rock Type: Sandstone
 Bulk Density: 2.31 g/cm³
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 Well Damage: 8 in

Tubular(s)

OD (in)	Weight (lbm/ft)	Grade	Annulus	Density (ppg)
7	29.00	L80	Cement	15.86

Results are based on API and other test data of Schlumberger perforating systems as well as computer modeling of perforated completions. Results are provided in good faith without warranty.

Productivity Index vs Static Underbalance Pressure



— 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX

Gun #	Phasing	Effect (spf)	kd/k	Form Pen/Dia Avg (m)	Comp Len Avg (ft)	Comp %
1	120	12.00	0.05	13.43/1.13^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

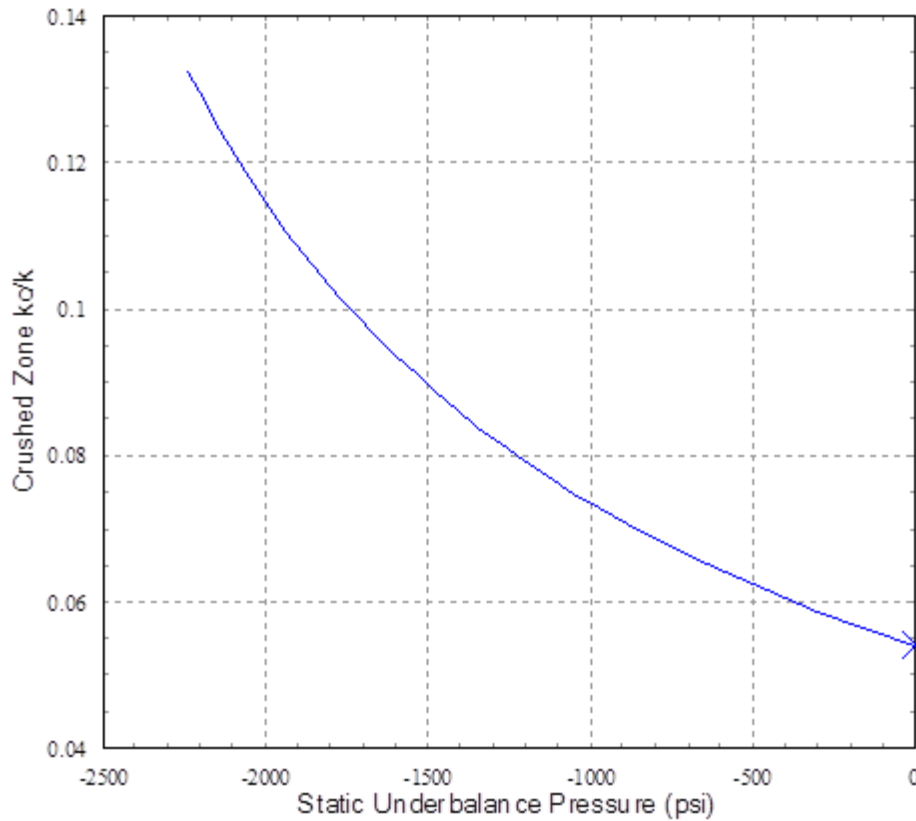
kh: 100.00 md
 kh/kv: 5.00
 Bulk Density: 2.31 g/cm3
 Rock UCS: 6403 psi
 Vertical Stress: 5000 psi
 Pore Pressure: 2234 psi
 kd/k: 0.20
 Well Damage: 8 in

Completion

Well Deviation: 0 deg
 Formation Thickness (TVD): 20.0 ft
 Wellbore Length: 20.0 ft
 Drainage Area: 31.42 acre
 Dietz Shape Factor: 31.62
 Flow Rate: 16.3 STB/day

Recent research and field results indicate that a static underbalance alone is insufficient to achieve clean perforations. A PURE design to achieve a dynamic underbalance immediately after perforating will deliver perforations with a kd/k of about 1 and is the preferred method of perforating job design. Typically, a kd/k from 0.05 to 0.3 is obtainable with a traditional static underbalance job design. SPAN results are based on "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE 30081 (L. Beirmann). Results are provided in good faith without warranty.

Crushed Zone kc/k vs Static Underbalance Pressure



— 6" HSD, 41B HyperJet II, HMX

Gun #	Static UB/OB (psi)	kc/k	Form Pen/Dia Avg (in)	Comp Len (ft)	Comp %
1	0	0.05	13.43/1.13 ^	20.0	100

^ Concrete-based Model

Formation

kh:	100.00	md
kh/kv:	5.00	
Bulk Density:	2.31	g/cm3
Rock UCS:	6403	psi
Vertical Stress:	5000	psi
Pore Pressure:	2234	psi
kd/k:	0.20	
Well Damage:	8	in

Completion

Well Deviation:	0	deg
Formation Thickness (TVD):	20.0	ft
Wellbore Length:	20.0	ft
Drainage Area:	31.42	acre
Dietz Shape Factor:	31.62	
Flow Rate:	16.3	STB/day

Recent research and field results indicate that a static underbalance alone is insufficient to achieve clean perforations. A PURE design to achieve a dynamic underbalance immediately after perforating will deliver perforations with a kc/k of about 1 and is the preferred method of perforating job design. Typically, a kc/k from 0.05 to 0.3 is obtainable with a traditional static underbalance job design. SPAN results are based on "Underbalance Criteria for Minimum Perforation Damage", SPE 30081 (L. Behrmann). Results are provided in good faith without warranty.