Revista Tecnológica ESPOL – RTE, Vol. xx, N. xx, pp-pp, (Mes, 200x), ISSN: 0257-1749.

Análisis Técnico-Económico del uso de las diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por Petroproducción

Johan M. Díaz Rodríguez (1), Christian A. Sánchez Rodríguez(1), Héctor Román F. (3),
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (1)
Director de tesis (3)

Escuela Superior Politécnica del Litoral
Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, Ecuador
jdiaz@espol.edu.ec, casanche@espol.edu.ec, hroman@espol.edu.ec

Resumen

El presente trabajo es un Análisis Técnico-Económico del uso de las diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por Petroproducción, cuyo objetivo fundamental fue el determinar que Sistema de Punzonamiento es el más eficiente y el más recomendado en términos económicos y rentables para futuros trabajos que se realicen tanto en Petroproducción como en otras empresas. La importancia de que la operación de cañoneo resulte más eficiente radica básicamente en las penetraciones alcanzadas y por ende en las razones de productividades estimadas a partir de estas, sin dejar de tomar en cuenta el daño total generado por las diferentes técnicas en estudio. Razón por la que se hace un análisis a los principales parámetros de punzonamiento bajo los cuales fueron operadas las técnicas de cañoneo y se las evaluó también dándoles otros parámetros, con el propósito de encontrar diferencias en la efectividad entre cada una de ellas, que nos permitan dirimir entre una y otra. Para lograrlo se seleccionaron doce pozos del campo Sacha, correspondientes en igual número a los Sistemas de Cañoneo Convencional, TCP Bajo-balance y PURE, haciéndoles análisis de penetración, razón de productividad y daño total de formación. Todo esto usando software y técnicas modernas, en los que se llega a determinar que las Técnicas TCP Bajo-balance y PURE generan mejores Eficiencias de Productividad en comparación con la Técnica Convencional; y en todas las situaciones, el sistema con mayores Razones de Productividades dará las mejores tasas de flujo, además el Sistema Convencional produce más daño de formación que las otras dos técnicas. Aunque entre los Sistemas TCP Bajo-balance y PURE no se generan resultados en el análisis técnico que permitan establecer un criterio de elección.

Palabras Claves: *Sistemas de Cañoneo, Eficiencia de Productividad, Razón de productividad, Petroproducción, penetración, daño total, Sacha, Bajo-balance, Sobre-balance.*

Abstract

The following work is a Technical-Economical Analysis of the use of the different perforating systemss on the fields operated by Petroproduccion, which fundamental objective was to determine which Perforating System is the most efficient and most recommended in terms of economy and reliability for future projects in Petroproduccion as well as in other companies. The importance for the perforating operation to result more efficient basically relies on the amount of penetrations reached; therefore, it relies on the productivity ratios which are estimated based on the amount of penetrations, without leaving behind the total damage generated by the different techniques in study. This is the reason why an analysis is done to the main parameters of perforation which were used to operate the perforating techniques, and they were also evaluated given other parameters with the sole purpose of finding the differences in effectiveness between each and everyone of them, which allowed us to differentiate between one and other. To make it possible, twelve oil wells were selected from Sacha corresponding in equal number to the Conventional Perforating Systems, TCP Under-balance y PURE, performing a penetration analysis, productivity ratio and total formation damage. All this was done using software and modern techniques which helped determine that TCP Under-balance and PURE techniques generate better Productivity Efficiency in comparison to the Conventional Technique; in all this situations, the system with the higher Productivity Ratios will give better flow rate; additionally, the Conventional Technique produces more formation damage than the other two techniques. However, TCP Under-Balance and PURE systems do not generate results in the technical analysis that could let us establish an election criteria.

Keywords: *Perforating Systems, Productivity Efficiency, Productivity Ratio, Petroproducción, penetration, formation damage, Sacha, Underbalance, Overbalance.*

1. Introducción

La correcta selección del sistema de disparos es de importancia relevante ya que de esto dependerá la productividad del pozo y la disminución de intervenciones adicionales. Por tal motivo los punzonamientos de pozos de petróleo o gas, deben diseñarse de modo que se minimice las futuras reparaciones y se alargue al máximo la vida útil del pozo.

En la actualidad, la tecnología en la construcción de cargas y sistemas de disparos ha evolucionado rápidamente, y es posible encontrar en el mercado un gran número de opciones y proveedores, como son: Cañoneo Convencional (Wireline), Sistema TCP (Tubing Conveyed Perforating) Bajo-balance y Sistema PURE (Perforating for Ultimate Reservoir Exploitation).

La optimización de la producción demanda diseños cuidadosos, para obtener disparos conductores limpios. Un diseño óptimo se refiere a la elección del mejor y mas eficiente sistema de disparos, cargas, cañones, fase, diámetro de los orificios, densidad de disparo, y asimismo la determinación del sistema de Completación y Producción que asegure una buena relación de productividad, aun después de que un porcentaje de los punzonamientos se taponen a medida que produce el pozo.

Este trabajo analiza técnica y económicamente los Sistemas de Cañoneo con sus respectivos parámetros de operación empleados en Petroproducción, y llega a establecer diferencias en los resultados de Relaciones de Productividades y daño de formación que permiten dirimir entre las técnicas en estudio.

En el estudio, se presentan los procedimientos seguidos, cálculos, conclusiones y recomendaciones con un carácter de ingeniería de la forma más clara posible, para que sirva como un documento de consulta y referencia para próximos proyectos y para que pueda ser utilizado por cualquier persona que quiera reforzar sus conocimientos en Operaciones de Cañoneo de Pozos.

2. Metodología

El presente estudio analiza los principales parámetros de punzonamiento bajo los cuales fueron operadas las técnicas de cañoneo en estudio y se las evaluó también dándoles otros parámetros (mayor penetración), con el propósito de encontrar diferencias en la efectividad entre cada una de ellas, que nos permitan dirimir entre una y otra. Para lograrlo se seleccionaron doce pozos del campo Sacha, correspondientes en igual número a los Sistemas Convencional, TCP Bajo-balance y PURE, haciéndoles análisis de penetración, razón de productividad y daño total de formación. Todo esto mediante el empleo del software SPAN (Schlumberger Perforanting Análisis) y la aplicación del Método Simple para la Estimación de Productividad de un pozo, propuesto por James E. Brooks; dichos pozos seleccionados se tabulan a continuación:

Tabla 1. Pozos Cañoneados con Wireline.

CAMPO	POZO	INTERVALO	DIÁMETRO DE CAÑÓN	DPP	ARENA
SACHA	121	9548' – 9565'	5"	4	NAPO "U"
		9770' – 9786'	5"	4	NAPO "T"
SACHA	127	9829' – 9865'	5"	4	H sup.
		9882' – 9884' 9888' – 9896'	5"	4	H inf.
SACHA	132	9416' – 9460'	4 ½"	4	NAPO "U"
SACHA	134	9425' – 9444'	4 ½"	4	NAPO "U"
		9652' – 9662' 9670' – 9684'	5"	8	NAPO "T"
		9833' – 9839' 9846' – 9856'	4 ½"	8	H sup.

Tabla 2. Pozos Cañoneados con TCP Bajo-balance.

CAMPO	POZO	INTERVALO	DIAMETRO DE CAÑÓN	DPP	ARENA
SACHA	154 D	10150' – 10160'	4 ½"	5	Hi
SACHA	159	8700' – 8708'	4 5/8"	5	BT
		9420' – 9456'	4 5/8"	5	Ui
		9810' – 9836'	4 5/8"	5	Hs
SACHA	161	9856' – 9876' 9880' – 9888'	4 5/8"	5	Hs
		9912' – 9923'	4 5/8"	5	Hi
SACHA	162	9494' – 9478'	4 5/8"	5	Ui
		9872' – 9888' 9899' – 9904'	4 5/8"	5	Hs
		9942' – 9928'	4 5/8"	5	Hi.

CAMPO	POZO	INTERVALO	DIAMETRO DE CAÑÓN	DPP	ARENA
SACHA	42	8631' – 8643'	4 ½"	5	BT
SACHA	186 D	9408' – 9456'	4 ½"	5	Ui
		9834' – 9846'	4 ½"	5	Hs
		9863' – 9880'	4 ½"	5	Hi
SACHA	189	9464' – 9490'	4 ½"	5	Ui
		9880' – 9886'	4 ½"	5	Hs
		9896' – 9904'	4 ½"	5	Hi
SACHA	191	9816' – 9832'	4 ½"	5	Hs
		9847' – 9856'	4"	5	Hi

Tabla 3. Pozos Cañoneados con PURE.

3. Análisis Técnico.

3.1 Análisis a partir de un Método Simple para la estimación de la productividad de un pozo.

Este Método Simple para la estimación de la productividad de un pozo fue propuesto por James E. Brooks, SPE, Schlumberger Perforating and Testing.

Este método se basa en un análisis adimensional, en el cual se asume que las variables dominantes en la determinación de la productividad son: longitud de penetración (P), densidad de disparos (N), diámetro del túnel de perforación (d), anisotropía o tasa de permeabilidad horizontal para permeabilidad vertical de la formación (α), diámetro del pozo (D), longitud de la zona dañada (L), y daño causado por la perforación del jet (bc). Se asume también que no hay diferencia apreciable en productividad causada por la fase del cañón. Tanto que las perforaciones son distribuidas a lo largo un patrón espiral.

Debido a la normalización de datos se generan resultados similares para los casos de pozo con daño y sin daño, por lo cual no se tiene problemas en cuanto a las incertidumbres que ocasionan la obtención de ciertos parámetros.

Pero primeramente se debe tener en cuenta las siguientes definiciones:

Razón de productividad (PR): Es la razón del flujo actual a través de las perforaciones, Q, para la del flujo, QD, en un agujero abierto teniendo un diámetro igual al del pozo, D.

Eficiencia de productividad o productividad normalizada (PR/PR∞): La cual tiene valores entre 0 y 1 (cero a 100% de eficiencia, respectivamente), dependiendo de los parámetros de perforación y formación en particular.

Razón de productividad máxima (PR∞): Se define como la productividad basada en un flujo, Q∞, en el pozo de un cañón idealizado teniendo penetración P, y una densidad de disparos infinita (N→∞).

$$PR\infty = \frac{Q\infty}{QD} = \ln(Df/D)/\ln[Df/(D+2P)] \quad \text{(Ec. 1)}$$

Es de gran importancia que se haya aclarado estas definiciones ya que en este estudio se usará esta razón de productividad normalizada para calcular la eficiencia de los cañones de perforación.

El firme agrupamiento de los 270 datos en el estudio de James E. Brooks dieron soporte a su contexto de que esta forma de normalización de parámetros pueden ser tratados como una sola variable dependiente en la determinación de la eficiencia de productividad. Donde βo es dicha variable, la cual es el producto de dos parámetros adimensionales y esta dado por la siguiente ecuación

$$\beta o = PN^{3/2}d^{1/2}\alpha^{-5/8} \quad \text{(Ec.2)}$$

Un buen ajuste para la curva obtenida por la normalización de los parámetros de cañoneo puede ser aproximado por la ecuación

$$PR/PR\infty = 0.97[1-\exp-(\beta o/4.4)^{0.38}] \quad \text{(Ec. 3)}$$

Debido a la forma de ecuación escogida los valores mayores de βo tienden a un valor asintótico que es un poco menor al valor ideal de 1, esto se debe a las asunciones del método; mientras más cerca se este de este valor mayor será la productividad del pozo. Y en todas las situaciones, el sistema de cañoneo con mayores PR dará las mejores tasas de flujo.

El procedimiento a seguir en este tipo de análisis técnico para nuestro estudio es el siguiente:

1. A partir de los parámetros de cañoneo que se tuvieron en la perforación de cada pozo con su respectiva técnica, se calcularán los valores de βo para diferentes longitudes de penetración empleando la ecuación 2. (Se asume anisotropía igual a 1).
2. Luego con los valores de βo ya calculados, se construirá la curva PR/PR∞ para cada pozo, usando la ecuación 3.
3. Finalmente los valores de PR/PR∞ correspondientes a la penetración alcanzada durante el cañoneo para cada pozo y a la penetración “máxima” que se tiene actualmente en el mercado (otra opción), se las multiplica por el valor de PR∞ del mismo pozo calculado a partir de la ecuación 1, obteniendo de esta manera sus valores de rozón de productividad, PR.

A continuación se muestra los datos y la curva obtenida para los pozos Sacha 159, 161 y 162.

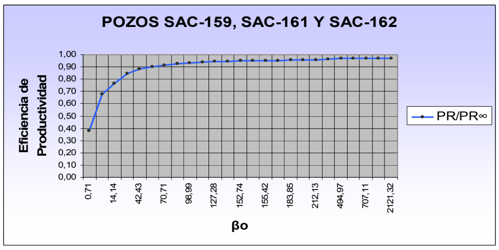

Figura 1. Gráfica de la PR/PR∞ para los pozos SACHA-159, SACHA-161 Y SACHA-162

Tabla 4. Valores de PR/PR∞ para los pozos SACHA-159, SACHA-161 Y SACHA-162

	POZOS SACHA-159, SACHA-161 Y SACHA-162					
	P (pulgadas)	N (disp/pies)	d (pulgadas)	α	βo	PR/PR∞
	0,1	5	0,4	1	0,707	0,381
	1	5	0,4	1	7,071	0,677
	2	5	0,4	1	14,142	0,766
	4	5	0,4	1	28,284	0,842
	6	5	0,4	1	42,426	0,879
	8	5	0,4	1	56,569	0,901
	10	5	0,4	1	70,711	0,915
	12	5	0,4	1	84,853	0,925
	14	5	0,4	1	98,995	0,933
	16	5	0,4	1	113,137	0,939
	18	5	0,4	1	127,279	0,943
	20	5	0,4	1	141,421	0,947
SAC-161	21,6	5	0,4	1	152,735	0,949
SAC-159	21,96	5	0,4	1	155,281	0,950
SAC-162	21,98	5	0,4	1	155,422	0,950
	24	5	0,4	1	169,706	0,952
	26	5	0,4	1	183,848	0,954
	28	5	0,4	1	197,990	0,956
	30	5	0,4	1	212,132	0,958
	50	5	0,4	1	353,553	0,965
	70	5	0,4	1	494,975	0,968
	90	5	0,4	1	636,396	0,969
	100	5	0,4	1	707,107	0,969
	200	5	0,4	1	1414,214	0,970
	300	5	0,4	1	2121,320	0,970

Una vez seguido el procedimiento detallado anteriormente para todos los pozos seleccionados, los resultados de las Razones de Productividad para cada pozo son los siguientes:

Tabla 5. Valores de PR para los pozos cañoneados con Wireline

WIRELINE							
POZOS	re (pies)	Df (pies)	D (pulg)	P	PR∞	PR/PR∞	PR
121	786,67	1573,34	9,84	12,1	1,324	0,901	1,193
	786,67	1573,34	9,84	26	1,568	0,941	1,475
127	851,37	1702,74	9,84	15,87	1,388	0,929	1,290
	851,37	1702,74	9,84	26	1,554	0,949	1,475
132	946,52	1893,04	9,84	15,47	1,370	0,926	1,269
	946,52	1893,04	9,84	26	1,537	0,948	1,457
134	888,56	1777,12	9,84	15,54	1,378	0,927	1,277
	888,56	1777,12	9,84	26	1,547	0,948	1,467

Tabla 6. Valores de PR para los pozos cañoneados con TCP Bajo-balance

TCP BAJO-BALANCE							
POZOS	re (pies)	Df (pies)	D (pulg)	P	PR∞	PR/PR∞	PR
154D	888,56	1777,12	6,96	26,46	1,635	0,955	1,561
	888,56	1777,12	6,96	26	1,627	0,955	1,554
159	813,64	1627,28	6,96	21,96	1,574	0,950	1,495
	813,64	1627,28	6,96	26	1,644	0,954	1,568
161	882,54	1765,08	6,96	21,6	1,555	0,949	1,475
	882,54	1765,08	6,96	26	1,629	0,954	1,554
162	838,25	1676,5	6,96	21,98	1,570	0,950	1,491
	838,25	1676,5	6,96	26	1,638	0,954	1,563

Tabla 7. Valores de PR para los pozos cañoneados con PURE

PURE							
POZOS	re (pies)	Df (pies)	D (pulg)	P	PR∞	PR/PR∞	PR
42	935,04	1870,08	6,96	23,61	1,579	0,953	1,505
	935,04	1870,08	6,96	26	1,618	0,956	1,547
186	888,56	1777,12	6,96	19,61	1,518	0,949	1,441
	888,56	1777,12	6,96	26	1,627	0,956	1,556
189	888,56	1777,12	6,96	21,81	1,557	0,952	1,483
	888,56	1777,12	6,96	26	1,627	0,956	1,556
191	888,56	1777,12	6,96	21,36	1,549	0,951	1,474
	888,56	1777,12	6,96	26	1,627	0,956	1,556

En contexto general se puede observar que los pozos cañoneados con TCP Bajo-balance y PURE presentan resultados más satisfactorios en productividad que la técnica de Wireline, debido a que el valor de la Eficiencia de Productividad en estas dos técnicas se acercan mucho más al valor asintótico de 0.97, quedando a tan solo 1.9% y 1.875% en promedio respectivamente, mientras que para la técnica Wireline éste valor se establece a un 4.925% del valor asintótico.

Esa diferencia porcentual entre las Eficiencias de Productividades entre Wireline y las otras dos técnicas que no excede el 3%, es suficiente para que se establezca que si se hubiese llegado a una penetración de 26 pulg. , se hubiese obtenido un incremento de producción en estos pozos de cerca del 15%, mientras que en las otras dos técnicas este aumento en la producción en los pozos hubiese llegado tan solo al 5%.

La diferencia entre Wireline y las otras dos técnicas es notoria, pero se observa también que entre TCP y PURE no se generan resultados en el análisis técnico que permitan dirimir entre un sistema y otro.

Si bien es cierto que la asunción de anisotropía igual a 1 sobreestima el flujo en estas situaciones; para los valores de anisotropías 5 y 10 la tendencia entre las diferencias de Eficiencias de Productividades se mantiene entre los Sistemas de Cañoneo, aunque como es de esperar con valores de PR menores.

3.2 Análisis a partir del daño total encontrado luego del disparo.

Para una mejor visualización de los valores correspondientes a los daños totales de los pozos seleccionados, se muestran a continuación en el siguiente gráfico en la que se destaca la técnica con la cual fueron cañoneados.

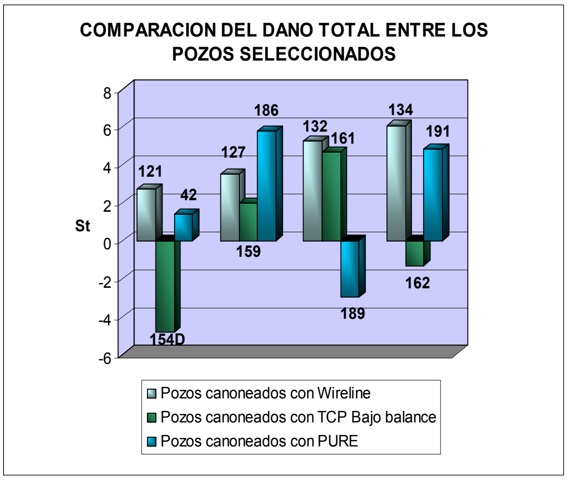

Figura 2. Comparación del daño total entre los pozos seleccionados.

A partir de los valores de St de los pozos se puede establecer un análisis cualitativo de la eficiencia de las técnicas de cañoneo, debido a que se puede observar claramente que los pozos que fueron cañoneados con Wireline presentan valores de daño siempre positivos y algo elevados, mientras que los pozos cañoneados con TCP Bajo-balance y PURE alternan valores positivos y negativos, muy similares, los cuales redundarán en una mayor producción en los pozos cañoneados con estos dos métodos.

Esto se debe a que como se mencionó anteriormente con Wireline no tenemos la limpieza de las perforaciones que se puede obtener con TCP Bajo-balance y con PURE, por el hecho que primero no limpiamos la zona compactada, luego después de realizado el disparo, los fluidos de matado entran a la formación y si esos fluidos no son compatibles, se puede crear un daño de formación adicional.

La calificación de cualitativo de este análisis se lo dan las diferentes incertidumbres que se manejan al no poder estimar claramente los diferentes tipos de daños.

4. Análisis Económico

Diseñar la satisfacción de necesidades económicas y lograr operaciones competitivas en organizaciones de los sectores privado y público depende del balance prudente entre lo que es técnicamente posible y lo que es aceptable económicamente. Sin embargo, no hay un método abreviado para alcanzar este balance entre factibilidad técnica y la económica. De esta manera, los métodos del análisis económico deben utilizarse para proporcionar resultados que ayuden a conseguir un balance aceptable.

4.1 Detalles de los costos de operación referidos a cada método

A continuación se presentara los costos aproximados de los tres métodos de cañoneo en análisis, que son: Wireline Convencional, TCP Bajo balance y TCP PURE.

Tabla 8. Costos promedios de cañoneo con Wireline

COSTOS PROMEDIOS DE CANONEO CON WIRELINE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Camión Standard	Km	110	$3.00	330
Cargo Básico	UND	1	$2,303.50	2303.5
Equipo de presión por instalación	UND	1	$243.90	243.9
Equipo de presión por bajada	CORRIDA	1	$135.50	135.5
4 5/8" 5 dpp Cañoneo profundidad	ft	9000	$0.62	5580
4 5/8" 5 dpp Cañoneo intervalo	ft	30	$301.60	9048
		TOTAL		17640.9

Tabla 9. Costos promedios de cañoneo con TCP Bajo-balance

COSTOS PROMEDIOS DE CANONEO CON TCP BAJO BALANCE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Tools transportation	Km	110	$3.50	385
Engineer Transportation	Km	110	$2.00	220
Servicio Power Jet	Ft	30	$815	24450
Positrieve 7 inc o menor primeras 8 hrs	UND	1	$1,200	1200
Positrieve 7 inc o menor 8 hrs adicionales	UND	1	$250	250
Espaciador	Ft	0	$240	0
Cabeza de disparo	UND	1	$5,000	5000
Barra para detonación mecánica	UND	1	$1,000	1000
Válvula de aislamiento de tubería	UND	1	$1,000	1000
Marca radioactiva	UND	1	$300	300
Válvula de producción	UND	1	$600	600
Especialista TCP	DIAS	2	$850	1700
			TOTAL	36105

Tabla 10. Costos promedios de cañoneo con PURE

COSTOS PROMEDIOS DE CANONEO CON TCP PURE				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Tools transportation	Km	110	$3.50	385
Engineer Transportation	Km	110	$2.00	220
Servicio Power Jet	Ft	30	$815	24450
Positrieve 7 inc o menor primeras 8 hrs	UND	1	$1,200	1200
Positrieve 7 inc o menor 8 hrs adicionales	UND	1	$250	250
Espaciador	Ft	0	$240	0
Cabeza de disparo	UND	1	$5,000	5000
Barra para detonación mecánica	UND	1	$1,000	1000
Válvula de aislamiento de tubería	UND	1	$1,000	1000
Marca radioactiva	UND	1	$300	300
Válvula de Producción	UND	1	$600	600
Especialista TCP	DIAS	2	$850	1700
Servicio de Cañoneo Pure	Ft	30	$1,222.50	36675
			TOTAL	72780

Los valores que se encuentran sombreados de color amarillo son los costos variables de cada método y los valores sin sombrear, son costos fijos.

Cabe recalcar que está sin incluir el valor de registro por correlación de profundidad CCL para el caso de Wireline Convencional, y el registro de correlación de rayos Gamma para los casos de TCP Bajo-balance y PURE.

Un valor que se debería considerar es el costo extra por tratamiento de operación que bordea los $20000 para el caso especial de Wireline convencional, ya que como se ha mencionado anteriormente se cañonea en condición de sobre-balance.

Partiendo del hecho de que los valores totales mostrados en la tabla de costos referidos a cada método fueron realizados bajo similares condiciones, tales como: el mismo kilometraje para transportar materiales, el mismo tipo y diámetro de canon, igual densidad de disparos (DPP) y la misma profundidad e intervalo a cañonear; podemos realizar la siguiente comparación:

- Realizar un trabajo de Cañoneo mediante la técnica de TCP Bajo Balance es aproximadamente 2 veces más costoso que haberlo efectuado con la técnica Wireline Convencional, sin embargo es 2 veces mas económico que la técnica TCP Pure.
- Además se puede concluir que efectuar un trabajo de Cañoneo con la técnica TCP Pure es aproximadamente 4 veces más costosa que la técnica Wireline Convencional.

4.2 Análisis económico a partir de un método simple para la estimación de la productividad

A partir del análisis técnico realizado en la sección 3 acerca de este mismo tema, podemos realizar el respectivo análisis económico teniendo como base la simulación en la profundidad de penetración para cada pozo en estudio con un tipo de carga diferente en comparación con la carga que realmente se utilizó.

En la mayoría de los casos, se tomo como punto de comparación la carga Power Jet Omega 4505 HMX, ya que es la carga que en la actualidad alcanza una mayor penetración.

El objetivo de este análisis económico es determinar la tasa de producción que se obtendría si se hubiese realizado el trabajo de cañoneo con una carga de mayor penetración que en este caso seria la Power Jet Omega 4505 HMX. Una vez conocido este valor se puede comparar ambas tasas de producción, calcular el diferencial entre ellas y por consiguiente se puede obtener las ganancias diarias correspondientes.

A continuación se presentara una tabla resumida por cada método, en la cual se muestra el numero de pozo, los dos tipos de cargas utilizadas en la simulación, la penetración que alcanza cada una de las cargas, la relación de productividad (PR) correspondiente, la tasa promedio (Qpr), la tasa que se obtendría a hueco abierto (Qd), el incremento de tasas (ΔQ), incremento porcentual, y las ganancias que se obtendrían si se hubiera elegido la carga con mayor penetración.

Tabla 11. Incremento porcentual en producción en los pozos cañoneados con Wireline mediante el empleo de cargas de alta penetración

WIRELINE								
POZOS	TIPO DE CARGA	P (pulgadas)	PR	Qpr (BPPD)	Qd (BPPD)	ΔQ (BBPD)	Ganancia($)	Incremento porcentual
121	37J RDX	12.1	1.193	1109	929.59	228.45	9138.00	20.60
	PJ OMEGA 4505 HMX	23.83	1.438	1337.45				
127	51B HJ II RDX	15.87	1.290	495	383.72	58.59	2343.60	11.84
	PJ OMEGA 4505 HMX	24.06	1.442	553.59				
132	51B HJ II RDX	15.47	1.269	357	281.32	38.92	1556.80	10.90
	PJ OMEGA 4505 HMX	22.88	1.407	395.92				
134	51B HJ II RDX	15.54	1.277	531	415.82	58.32	2332.80	10.98
	PJ OMEGA 4505 HMX	23	1.418	589.32				

Tabla 12. Incremento porcentual en producción en los pozos cañoneados con TCP Bajo-balance mediante el empleo de cargas de alta penetración

TCP BAJO BALANCE								
POZOS	TIPO DE CARGA	P (pulgadas)	PR	Qpr (BPPD)	Qd (BPPD)	Q (BBPD)	Ganancia($)	Incremento porcentual
154D	PJ OMEGA 4505 HMX	26.460	1.561	1290	826.28	-61.31	-2452.40	-4.75
	PJ 4505 HMX	22.18	1.487	1228.69				
159	51J UJ HMX	21.96	1.495	348	232.72	17.29	691.60	4.97
	PJ OMEGA 4505 HMX	26.08	1.570	365.29				
161	51J UJ HMX	21.6	1.475	879	595.78	43.60	1744.00	4.96
	PJ OMEGA 4505 HMX	25.67	1.549	922.6				
162	51J UJ HMX	21.98	1.491	341	228.70	17.21	688.40	5.05
	PJ OMEGA 4505 HMX	26.11	1.566	358.21				

Tabla 13. Incremento porcentual en producción en los pozos cañoneados con PURE mediante el empleo de cargas de alta penetración

TCP PURE								
POZOS	TIPO DE CARGA	P (pulgadas)	PR	Qpr (BPPD)	Qd (BPPD)	Q (BBPD)	Ganancia($)	Incremento porcentual
42	PJ OMEGA 4505 HMX	23.610	1.505	227	150.81	-6.93	-277.20	-3.05
	PJ 4505 HMX	21.03	1.459	220.07				
186	PJ 4505 HMX	19.610	1.441	207	143.65	10.27	410.80	4.96
	PJ OMEGA 4505 HMX	23.46	1.512	217.27				
189	PJ 4505 HMX	21.810	1.483	296	199.66	14.93	597.20	5.04
	PJ OMEGA 4505 HMX	26.1	1.557	310.93				
191	PJ 4505 HMX	21.360	1.474	497	337.29	25.43	1017.20	5.12
	PJ OMEGA 4505 HMX	25.56	1.549	522.43				

En el análisis técnico previo, se obtuvieron los valores de relación de productividad (PR) para cada una de las cargas. Conocidos estos valores, se pudo obtener la tasa promedio que se lograría si se hubiese elegido la carga que alcance una mayor penetración. Encontrada la tasa promedio, se puede calcular el incremento de tasa, y por ende las ganancias.

De acuerdo con los valores de incremento porcentual obtenidos para cada pozo, se puede concluir que es muy conveniente utilizar cargas de alta penetración, ya que a pesar de que son más costosas que las otras, se obtienen grandes ganancias con lo que se puede recuperar la inversión en muy poco tiempo.

Los costos de las cargas Power Jet Omega 4505 y Power Jet 4505 son $2249 y $815 por pie respectivamente. Por ejemplo si queremos conocer en que tiempo recuperamos la inversión realizada para el caso del pozo Sacha 186, observamos las ganancias diarias que se obtienen y la inversión adicional realizada. Para este caso la inversión se puede recuperar aproximadamente en 3.5 días. A partir del cuarto día todo lo que se obtenga es utilidad. (El valor asumido para el barril de petróleo fue de $40).

5. Conclusiones

De lo expuesto anteriormente se concluye lo siguiente:

- 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 el diseño y tipo de cargas utilizadas.
- Diseñar los sistemas de tal manera que el valor de penetración alcanzada maximice en lo que sea técnica y económicamente posible el valor de Eficiencia de Productividad.
- Cañonear pozos con las técnicas de TCP Bajo-balance y PURE genera mejores Razones de Productividad en comparación con la técnica de Wireline; y en todas las situaciones, el sistema de cañoneo con mayores PR dará las mejores tasas de flujo.
- Emplear cargas de alta penetración logra un incremento en la producción del 10.98 al 20.6% para pozos que fueron cañoneados con el Sistema Wireline.
- Emplear cargas de alta penetración logra un incremento del 5% en producción para pozos que fueron cañoneados con los Sistemas TCP Bajo-balance y PURE.
- Elegir una carga de alta penetración es económicamente rentable, justificando dicha inversión con el incremento en producción.
- La Técnica de Wireline genera más daño de formación que las técnicas TCP Bajo-balance y PURE.
- Realizar un trabajo de Cañoneo mediante la técnica de TCP Bajo Balance es aproximadamente 2 veces más costoso que haberlo efectuado con la técnica Wireline Convencional, sin embargo es 2 veces mas económico que la técnica TCP Pure bajo similares parámetros de operación requeridos.
- Para los valores de Anisotropía 5 y 10 la tendencia entre las diferencias de Eficiencias de Productividades se mantienen entre las Técnicas de Cañoneo, aunque con valores menores de PR.
- La diferencia entre Wireline y las otras dos técnicas es notoria, siendo estas últimas las que ofrecen mejores resultados, pero se observa también que entre TCP y PURE no se generan resultados en el análisis técnico que permitan dirimir entre un sistema y otro.

6. Agradecimientos

Se agradece a Miguel Angel Cevallos, Ingeniero de la compañía Schlumberger, por la apertura y facilidades brindadas para la realización de este estudio, así como también a todo el personal del Departamento de Ingeniería en Petróleo del Campo Sacha de Petroproducción que permitió que este trabajo sea posible.

7. Referencias

[1] Halliburton Energy Services, Perforating Solutions, U.S.A., 2005.
[2] James E. Brooks, SPE, Schlumberger Perforating and Testing; "A Simple Method for Estimating Well Productivity", paper SPE 38148, 1997.
[3] Bakker E., Behrman L., Milton P., Salsman A., Stutz L. & Underdown D; "La nueva dinámica de operaciones de disparos en condiciones de bajo balance", Oilfield Review, Primavera 2003/2004.
[4] Behrman L., Brooks J., Farrant S., Fayard A., Brown A., Michael C., Smith P. & Underdown D; "Técnicas de Diseño de Disparos para Optimizar la Productividad", Oilfield Review, Verano 2000.
[5] Economides M., Hill D. & Economides C.; Petroleum Production System, U.S.A., 1994.
[6] Craft B. & Hawkins F., Applied Petroleum Reservoir Engineering, Prentice Hall, 1959.
[7] Forero A., Baker Atlas; "Conceptos y Técnicas de Cañoneo", 2002.
[8] Gordillo S., "Análisis Técnico de la Eficacia del punzonamiento con Cargas de Alta Penetración en los Campos de Petroproducción", Tesis no publicada, FIGEMPA, Universidad Central, 2006.
[9] Román H., Apuntes de Facilidades de Superficie, ESPOL, 2005.