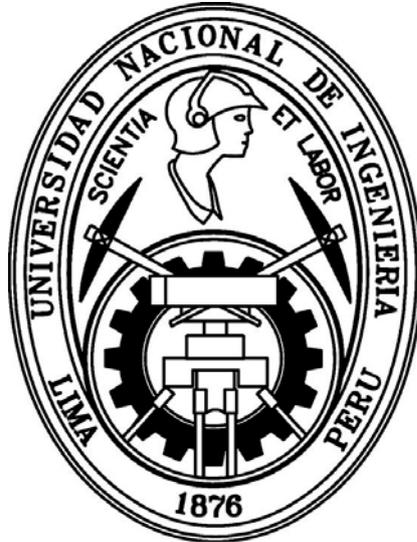


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

**Facultad de Ingeniería de Petróleo,
Gas Natural y Petroquímica**



**“MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE SÓLIDOS
DEL EQUIPO DE PERFORACIÓN DE POZOS
DE PETRÓLEO Y GAS GMP-10”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE PETROLEO Y GAS NATURAL**

ELABORADO POR:

Christian Gianfranco Vera Beteta

PROMOCION: 2012 - II

LIMA - PERÚ

2013

DEDICATORIA

A Dios y mi Familia por su amor incondicional
y por ser cada día los protagonistas en
mi desarrollo como Persona.

AGRADECIMIENTO

Al Área de Exploración-Producción y Perforación de GMP,
que sin el apoyo de todos no hubiera sido posible
la realización del presente trabajo.

SUMARIO

Los Sólidos Indeseables incrementan los Costos de Perforación de muchas formas en adición al aumento de Costos del Fluido de Perforación. Si no son controlados de forma adecuada, ellos llevan directamente a problemas tales como Daño a la Formación, Problemas en la Perforación y Cementación de pozos, mayor Desgaste de las partes internas de Bombas de Lodo y líneas de superficie, y mayores desechos de Perforación.

Por ello, es necesario remover dichos sólidos hasta un porcentaje aceptable, pues es muy complicado poder eliminarlos de forma exclusiva en su totalidad. Para ello, existen básicamente 3 mecanismos, los cuales nos ayudaran a reducir el porcentaje de sólidos de un fluido de perforación. Estos son: por dilución, por zarandeo y por asentamiento o centrifugación. Por ello, se realizó la Evaluación del Sistema de Control de Sólidos del Equipo de Perforación GMP-10 mediante el uso de los parámetros siguientes:

- Medición de Densidad y Caudal de Descarga de los Hidrociclones.
- Análisis granulométrico por Sedígrafo de 2 muestras de lodo.
- Informe de Equipos de Control de Sólidos, National Oil Well Varco.
- Reporte Diario de Lodo de Pozos perforados en los años 2011 y 2012.

Además, se evaluó la condición de las bombas centrifugas alimentadoras de los hidrociclones, y las bombas de lodos, por medio del Cálculo del Caudal de ambas.

Se logró identificar un porcentaje de sólidos eliminados, por los equipos mencionados, mucho menores a lo que sus capacidades pueden desechar, por lo cual se hacía necesario la dilución y el desalojo del lodo de la trampa de arena e incluso del tanque del desarenador. Además, se observó que la velocidad de penetración disminuía a medida que el porcentaje de sólidos incrementaba y había mayor desgaste de las partes internas de la bomba de lodo.

A partir de lo anterior, se realizó el diagnóstico del desgaste producido en las partes internas de las bombas, y las eficiencias de los equipos que componen el sistema de control de sólidos a las condiciones de operación actuales.

Consecuentemente, se recomendó lo siguiente para poder mejorar la remoción de sólidos:

- Implementación de un Possum Belly.
- Compra de mallas corrugadas de 140, 170 y 200 API.
- Préstamo interno de 02 Desarenadores de Poliuretano termoplástico.
- Implementación de 02 Impulsores de mayor diámetro y una bomba centrífuga completa.
- Prestación de servicios de una centrífuga decantadora.

Finalmente, se determinaron los costos de inversión para la implementación de los equipos, como la retribución generada por el ahorro obtenido en costos de química de lodo, costos de tarifa operativa de perforación, entre otros. Por otro lado, los beneficios en costos de compra y/o mantenimiento de partes internas de bombas de lodo fueron estimados de los reportes del almacén de perforación para pozos con y sin el uso de centrífuga decantadora.

INDICE

	Página
Dedicatoria	i
Agradecimiento	ii
Sumario	iii
Índice	v
Introducción	1
Capítulo I: Planteamiento del Problema	2
i. Problemática	2
ii. Formulación del Problema	2
iii. Justificación	3
iv. Hipótesis General	3
v. Hipótesis Específicas	4
vi. Identificación de Variables	4
vii. Operacionalización de Variables	5
viii. Matriz de Consistencia	8
Capítulo II: Marco Teórico	9
i. Antecedentes	9
a. Perspectiva Histórica	9
b. Mejora de la Productividad	15
c. Mejora de la Vida Operativa en Partes Internas de Bombas de Lodos	18
ii. Bases Teóricas	19
a. Fundamentos	19
b. Porcentaje de Sólidos vs Peso de Lodo	21
c. Porcentaje de Sólidos – Calculo	21
d. Puntos de Corte	22
e. Zarandas Vibratorias	22
f. Tanques de Asentamiento	24

g. Degasificadores	24
h. Hidrociclones	24
i. Eficiencia de los Hidrociclones	25
j. Limpiadores de Lodo	25
k. Centrifugas	25
l. Bombas Centrifugas	26
m. Beneficios de un Buen Control de Sólidos	26
n. Factores que afectan la Velocidad de Penetración – Propiedades de Lodo	27
o. Daño a la Formación	27
p. Distribución del Tamaño de Partícula por Análisis de Difracción	29
Capítulo III: Metodología de la Investigación	30
i. Mediciones de Densidad y Caudal de Descarga de los Hidrociclones en el Pozo 12259	30
ii. Análisis Granulométrico por Sedígrafo de 2 Muestras de Lodo	32
iii. Caudal de las Bombas Centrifugas y las Bombas de Lodo	33
iv. Informe de Equipos de Control de Sólidos GMP-10	39
v. Salidas del Almacén de Partes de Bombas de Lodo en el 2012	41
vi. Reporte Diario de Lodo de Pozos Perforados en el 2011 y 2012	42
vii. Reporte Diario de Velocidad de Penetración de Pozos Perforados en el 2011 y 2012	42
viii. Recomendación Final	42
Capítulo IV: Diseño del Modelo	46
i. Flow Line – Possum Belly	46
ii. Zarandas	46
iii. Degasificador	46
iv. Desarenador	47
v. Deslimador y Limpiador de Lodo	47
vi. Bomba Centrifuga	48
vii. Centrifuga Decantadora	48
viii. Alcances Operativos	51

Capítulo V: Análisis de Resultados	53
i. Evaluación Técnica	53
a. Aumento del ROP Neto	53
b. Menores Volúmenes de Fluido de Perforación utilizados	57
c. Vida operativa de las partes de las bombas de lodo prolongadas	57
d. Otros	58
ii. Evaluación Económica	60
a. Inversión	60
b. Retribución	61
c. Flujo de Caja	65
 Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones	 66
i. Recomendaciones	68
ii. Conclusiones	70
 Bibliografía	 72
 ANEXO	 74
 Anexo I – Grafica de Peso de Lodo vs Porcentaje de Sólidos, 2011-2012	
Anexo II – Grafica de Porcentaje de Sólidos vs ROP Neto, 2011-2012	
Anexo III – Dimensiones del Possum Belly	
Anexo IV – Grafica de Porcentaje de Sólidos vs Profundidad, 2011-2012	
Anexo V – Tabla Comparativa de Pozos con y sin Control de Sólidos, 2011-2012	
Anexo VI – Flujo de Caja	
Anexo VII - Comparación de Costo estimado versus Reales de los 3 primeros pozos perforados en el 2013	

INTRODUCCION

El Control de Sólidos es una técnica usada en perforación de pozos para proporcionar fluidos de perforación acondicionados. El costo de mantenimiento, limpieza y costo de eliminación del Fluido de Perforación así como también el costo total de la Perforación puede ser reducido enormemente cuando se utilizan las técnicas apropiadas de Control de Sólidos. Estos hechos fueron reconocidos en la Industria del Petróleo a fines del Siglo XIX cuando se utilizaron tanques de lodo abiertos para separar los recortes del pozo. Esto se logró mediante una serie de represas pequeñas y tanques de asentamiento que permitían que los sólidos se asienten de forma natural por gravedad. Luego, el lodo limpio fluía al tanque de succión para ser re-bombeado dentro del pozo. Esta fue la primera técnica de Control de Sólidos.

La siguiente innovación en Control de Sólidos llegó cuando las Zarandas Vibratorias fueron introducidas a inicios de la década de 1930 para la Industria del Petróleo. Estas fueron derivadas de tecnología utilizada en la Industria de la Minería. Además, continúa siendo actualmente la pieza primaria del Equipo de Control de Sólidos usado en la Industria.

Otra máquina prestada de la Industria de la Minería en la década de 1930 fue el cono clasificador o hidrociclón. Junto a las zarandas vibratorias, éste ha llegado a ser una parte integral del Sistema de Control de Sólidos en la actualidad. En adición a las zarandas e hidrociclones, el uso de centrifugas de alta velocidad ha contribuido significativamente a la habilidad de una operación de perforación en reducir la cantidad de lodo a ser preparado y las adiciones de barita o diesel para mantener proporciones óptimas de sólidos de alta y baja gravedad.

Avances recientes en Control de Sólidos incluyen la creación de un Sistema de Circuito Cerrado que permite un mayor control ambiental y la reducción en el potencial de derrames de fluidos de perforación.

En la presente Tesis, se hace hincapié en las Zarandas, Hidrociclones y Centrifuga.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

i. Problemática.

En las operaciones recientes de perforación del Equipo GMP-10, se están reportando porcentajes de sólidos elevados en el fluido de perforación. Además, el contenido de sólidos incrementa desproporcionalmente en relación al peso de lodo a medida que se van alcanzando mayores profundidades.

Esto es un indicio de que no están siendo removidos los recortes de perforación de cierto tamaño por los equipos de control de sólidos, causando que sean parte del sistema de lodo y haciéndose cada vez de menor tamaño a medida que son remolidos al pasar por las boquillas de la broca.

ii. Formulación del Problema.

Existen varias razones por lo cual ocurre el problema mencionado anteriormente, las cuales son explicadas a continuación:

- Los equipos que conforman el Sistema de Control de Sólidos en el equipo de perforación GMP – 10 fueron diseñados en años donde las brocas tricónicas eran las predominantes en un conjunto de fondo convencional que tenía una penetración (10 ft/hr aproximadamente) menor en comparación con los conjuntos de fondo direccional (Motor de Fondo) de hoy que utilizan brocas PDC (Diamante Policristalino).
- La intercomunicación habida entre los tanques de lodos impide que los equipos de control de sólidos puedan procesar al fluido de perforación de forma selectiva de acuerdo al tamaño de los sólidos.
- La presión de entrada y el caudal de alimentación de las bombas centrifugas de los Equipos de Control de Sólidos, no son las adecuadas, para una eficiencia de remoción óptima.
- Las mallas de las zarandas tienen un API *mesh number* no apropiado.
- La no utilización de una centrifuga decantadora para remover los sólidos tamaño de limos y arcilla o coloidal, pues la mayoría de formaciones perforadas son lutitas que contienen estas partículas.

iii. Justificación.

Las consecuencias generadas debido a una remoción de sólidos deficiente son:

- Primero, la incapacidad de retener sólidos durante la etapa inicial de la perforación, hará que cierta cantidad de sólidos sea parte del sistema de lodo, siendo circuladas una y otra vez. Consecuentemente, las partículas se irán reduciendo de tamaño a medida que son re-circuladas, convirtiéndose en sólidos finos que son los más perjudiciales pues tienen mayor profundidad de invasión al reservorio, generando Daño a la Formación que disminuye la Productividad del mismo.
- Segundo, la operación en sí de perforación se ve afectada por un contenido elevado de sólidos debido a que aumenta la viscosidad del lodo, resultando en una velocidad de penetración reducida. Además, se incrementan los riesgos de pérdida por circulación (aumento de peso del lodo) y pega por presión diferencial (los sólidos aportan en la formación de un revoque permeable).
- Tercero, los Equipos de Bombeo y líneas de superficie también se ven afectados por un alto contenido de sólidos pues las piezas metálicas se desgastan (erosión) y los costos de mantenimiento y reparación son considerables. El desgaste ocurre principalmente en las camisas y pistones por la fricción entre las paredes de estas piezas y los sólidos suspendidos en el lodo cuando éste es bombeado.
- Cuarto, como consecuencia de la dilución frecuente para poder compensar una deficiente eficiencia de remoción de sólidos por parte de los equipos, se tendrán excesivos desechos de perforación (Lodo y recortes), lo cual conllevará a mayores costos en el manejo de estos y también un mayor Impacto Ambiental.

iv. Hipótesis General.

La Implementación de la Mejora en el Sistema de Control de Sólidos del Equipo de Perforación GMP – 10 permitirá que se tenga menor Daño al Reservorio, aumento de la Velocidad de Penetración y reducción de los riesgos de Pérdida de Circulación y Pega de Tubería por Presión Diferencial en Perforación, y prolongará la Vida Operativa de las partes internas de la Bomba de Lodos y líneas de superficie.

v. Hipótesis Específicas.

- a. El Daño al Reservorio se reducirá por la disminución de la Invasión de Sólidos Finos a la Formación, productos de la Recirculación de los Sólidos.
- b. La Velocidad de Penetración aumentará al evitar que la Viscosidad del Fluido de Perforación aumente como consecuencia de un mayor Porcentaje de Sólidos.
- c. El Riesgo de Pérdida de Circulación será menor si se evita que aumente el Peso del Fluido de Perforación debido a un alto Porcentaje de Sólidos en el.
- d. El Riesgo de Pega de Tubería por Presión Diferencial será menor si no se permite la formación de un Revoque Permeable generado por un Porcentaje de Sólidos elevado.
- e. La Vida Operativa de las partes internas de la Bomba de Lodo y líneas de superficie será mayor si se tiene un Fluido de Perforación con menor Porcentaje de Sólidos en suspensión.

vi. Identificación de Variables.

HIPOTESIS

VARIABLES

General

Daño al Reservorio
 Velocidad de Penetración
 Pérdida de Circulación
 Pega de Tubería por Presión Diferencial
 Vida Operativa de partes de Bomba de Lodo

Específica a

Invasión de Sólidos Finos

Específica b

Viscosidad del Fluido de Perforación

Específica c

Peso del Fluido de Perforación

Específica d

Revoque

Específica e

Porcentaje de Sólidos en el Fluido de Perforación

vii. Operacionalización de Variables.

a. Daño al Reservorio

i. **Indicador:** Permeabilidad y Radio del Daño.

ii. **Formula:** $S = \left(\frac{k}{k_{skin}} - 1 \right) * \ln\left(\frac{r_{skin}}{r_w}\right)$

iii. **Información Requerida:** Permeabilidad Inicial (mD) y Radio del Pozo (ft).

iv. **Fuente de Información:** Análisis de núcleos, correlaciones y registros eléctricos.

b. Velocidad de Penetración

i. **Indicador:** *Rate of Penetration*.

ii. **Formula:** $ROP = \frac{MD_2 - MD_1}{T_2 - T_1}$

iii. **Información Requerida:** Intervalo perforado medido (ft) y Tiempo utilizado (hrs).

iv. **Fuente de Información:** Cartillas de Perforación (*Charts*) y Mediciones durante la perforación (*Measurement while Drilling*).

c. Perdida de Circulación

i. **Indicador:** Flujo de retorno y Presión en Superficie.

ii. **Formula:** $WHP = P_h + \Delta P_f$

iii. **Información Requerida:** Caudal de Bombeo (gpm), Caudal de Retorno (gpm), Densidad del Lodo (ppg), Profundidad Vertical (ft), Presión de Fricción y de Fractura (psi).

iv. **Fuente de Información:** Factor de Bombeo, Salida del *Flowline*, Reporte de Campo, *Charts*, Manómetro del Perforador y Correlaciones.

d. Pega de Tubería por Presión Diferencial

- i. Indicador:** Carga del Gancho y Torque de la Mesa Rotaria.
- ii. Formula:** Cualitativo.
- iii. Información Requerida:** Tensión en el Gancho (lbf) y Torque durante la Perforación o los viajes (lbf-ft).
- iv. Fuente de Información:** Registrador de Carga (Martin Decker) y Registrador de Torque.

e. Vida operativa de partes de Bomba de Lodo

- i. Indicador:** Tiempo Operativo.
- ii. Formula:** Cualitativo.
- iii. Información Requerida:** Intervalo de tiempo entre el cambio de las partes (hrs).
- iv. Fuente de Información:** Mantenimiento de Perforación.

f. Invasión de Sólidos Finos

- i. Indicador:** Análisis Granulométrico del Fluido de Perforación por Sedígrafo.
- ii. Formula:** Cualitativo.
- iii. Información Requerida:** Muestra de Fluido de Perforación.
- iv. Fuente de Información:** Laboratorio (Compañía LCV).

g. Viscosidad del Fluido de Perforación

- i. Indicador:** Viscosímetro Fan.
- ii. Formula:** $\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300}$
- iii. Información Requerida:** Lecturas de Diales a 600 y 300 rpm.
- iv. Fuente de Información:** Laboratorio de Campo.

h. Peso del Fluido de Perforación

- i. Indicador:** Balanza de brazo de Fluido de Perforación.
- ii. Formula:** Cualitativo.
- iii. Información Requerida:** Lectura del brazo de la balanza.
- iv. Fuente de Información:** Mediciones de Campo.

i. Revoque

- i. Indicador:** Ensayo de Filtrado.
- ii. Formula:** Cualitativo.
- iii. Información Requerida:** Espesor del Revoque (mm).
- iv. Fuente de Información:** Laboratorio de Campo.

j. Porcentaje de Sólidos en el Fluido de Perforación

- i. Indicador:** Ensayo de Retorta
- ii. Formula:** $\%S = V_{total} - V_{liq}$
- iii. Información Requerida:** Volumen de liquido (cc).
- iv. Fuente de Información:** Laboratorio de Campo.

viii. Matriz de Consistencia.

Problema		Mejorar el Sistema de Control de Sólidos del Equipo de Perforación GMP-10			
Objetivo	Mejorar la Productividad del Reservorio	Mejorar la Velocidad de Penetración	Prolongar la Vida Operativa de las partes de Bombas de Lodo y Líneas de Superficie	Reducir los Riesgos de Pérdida de Circulación	Reducir los Riesgos de Pega de tubería por Presión Diferencial
Hipótesis	El Daño al Reservorio se reducirá por la disminución de la Invasión de Sólidos Finos a la Formación, productos de la Recirculación de los Sólidos	La Velocidad de Penetración aumentará al evitar que la Viscosidad del Fluido de Perforación aumente como consecuencia de un mayor Porcentaje de Sólidos	El Riesgo de Pérdida se Circulación será menor si se evita que aumente el Peso del Fluido de Perforación debido a un alto Porcentaje de Sólidos en el	El Riesgo de Pega de Tubería por Presión Diferencial será menor si no se permite la formación de un Revoque Permeable generado por un Porcentaje de Sólidos elevado	La Vida Operativa de las partes de la Bomba de Lodo será mayor si tiene un Fluido de Perforación con menor Porcentaje de Sólidos en suspensión
VARIABLES	Invasión de Sólidos Finos	Viscosidad del Fluido de Perforación	Peso del Fluido de Perforación	Revoque	Porcentaje de Sólidos en el Fluido de Perforación
Operación-análisis	Análisis Granulométrico del Lodo por Sedígrafo	Viscosímetro Fan	Balanza de Lodo	Ensayo de Filtrado	Ensayo de Retorta
Metodología	Se realizó el diagnóstico del Desgaste en las partes de las Bombas de Lodo, y las Eficiencias de los equipos del sistema de control de sólidos a las condiciones de operación actuales. Se evaluaron los parámetros de flujo óptimos para los Hidrociclones mediante el uso de un Software de Simulación en Ingeniería. Se adquirieron equipos para poder mejorar el Sistema de Control de Sólidos. Finalmente, se hizo una estimación tanto de los costos de inversión para la implementación de la mejora como la retribución generada por el ahorro obtenido en costos de química de lodo y costos de tarifa operativa de perforación. Por otro lado, los beneficios en costos de compra y/o mantenimiento de camisas y pistones de bombas, fueron estimados de los reportes del almacén de perforación para pozos con y sin el uso de centrifugas decantadoras.				

CUADRO N° 1.1 Matriz de Consistencia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

i. Antecedentes.

Perspectiva Histórica.

A mediados del Siglo XVIII se utilizó fluido de perforación en perforación a percusión para suspender los recortes hasta que sean recogidos del hueco perforado. Con la llegada de la perforación rotaria a la industria de perforación de pozos petroleros, se entendió bien que el fluido de perforación sirve para enfriar la broca y suspender los recortes perforados para remoción del pozo.

En la década de 1890, se fueron agregando arcillas al fluido de perforación y por aquellos tiempos se descubrió Spindletop (un campo petrolero de domo de sal ubicado en la parte sur de Beaumont, en Texas, Estados Unidos) en 1901, se consideró necesario tener sólidos suspendidos (arcillas) en el fluido de perforación para soportar las paredes del pozo. Estos sólidos (arcillas) resultaron de la disgregación de formaciones penetradas por la broca.



Figura 2 - 1. Diques y Tanques de Lodo en Tierra

Si las formaciones penetradas no conseguían generar suficiente arcilla en el proceso de perforación, la arcilla era extraída de la superficie de una fuente cercana y agregada al fluido de perforación. Estos fueron lodos nativos creados ya sea por "formaciones que hacen lodo" o, como se menciona, por adición de materiales específicos de una fuente en superficie.

El fluido de perforación era recirculado y se agregaba agua para mantener el mejor peso y viscosidad para condiciones de perforación específicas. Los recortes, o pedazos de formación (pequeñas rocas) que no fueron disueltos por el agua requerían ser removidos del fluido de perforación para continuar la operación de perforación.

Bajo la única discreción del perforador o jefe de equipo, se enterró un sistema de tanques y zanjas, en tierra, en la locación para separar los recortes del fluido de perforación por asentamiento gravitacional (la gravedad forzaba a los recortes a depositarse en los tanques y zanjas). Este sistema incluía un dique desde el pozo, o posiblemente un niple de campana, tanques de asentamiento, y un tanque de succión de donde el lodo "limpio" era recogido por la bomba de lodo y recirculado.



Figura 2 - 2. Salida del Lodo de Pozo a Superficie sin Equipos de Control de Sólidos

El lodo era circulado a través de estos tanques, y algunas veces una partición era colocada en los tanques de asentamiento para acelerar la remoción de arena y recortes indeseados. Esta partición extendió de uno a dos pies del fondo del tanque, forzando así a todo el lodo a moverse hacia abajo, bajo la partición, y hacia arriba otra vez para fluir en la zanja hacia el tanque de succión. Se asentaba bastante del material pesado, por gravedad, en el fondo del tanque.

Con el tiempo, los tanques se llenaban con los recortes y el fluido se volvía muy espeso para bombear debido a los recortes finamente molidos que eran llevados por el fluido de perforación. Para remediar este problema, se colocaron boquillas en los tanques de asentamiento para mover el lodo inutilizable a un tanque de reserva. Luego, se agregaba agua para aligerar el lodo y proseguir con la perforación.

A finales de la década de 1920, los perforadores empezaron a ver como otras industrias resolvían problemas similares. Se descubrió que las plantas de separación de minerales y vertederos de carbón estuvieron usando equipos específicos, de los cuales fueron adoptados dos de ellos:

El "tambor giratorio" o cribas tipo barril (llamados cribas trommel), fueron ampliamente usados con las primeras subestructuras de poca altura. El lodo fluyendo hacia la maquina giraba una rueda de paletas que rotaban el tambor de la criba, a través del cual el fluido de perforación pasaba. La criba usada en esos tiempos fue muy gruesa, de malla 4 a 12. Estas unidades fueron muy populares porque no se requería electricidad y los tanques de asentamiento no se llenaban tan rápido.

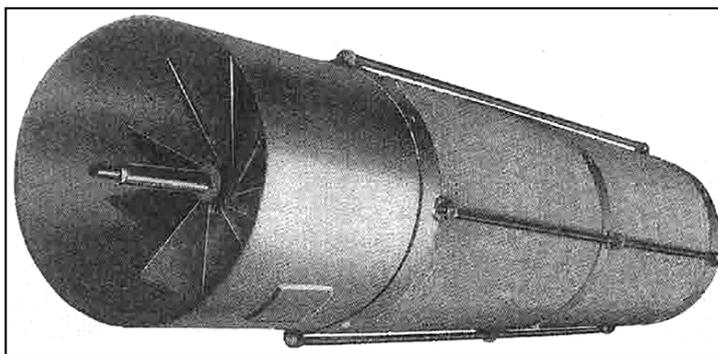


Figura 2 - 3. Criba Trommel

La "criba vibradora", o zaranda, fue el otro equipo adoptado. Las primeras zarandas se usaron generalmente en aplicaciones de dimensiones de secado y pasaron muchas modificaciones antes de alcanzar el tipo y tamaños básicos para perforación. El nombre "Shale Shaker" fue adoptado para distinguir la diferencia entre zarandas (clasificadores) usadas en la minería y zarandas de lutita usadas en perforación de pozos de petróleo pues ambos se obtenían de los mismos proveedores.



Figura 2 - 4. Primeros diseños de Zarandas Vibradoras

A finales de la década de 1920 e inicios de 1930, grandes compañías petroleras organizaron laboratorios de investigación y empezaron a explorar los problemas de perforación de pozos. Ellos empezaron a entender que los recortes más pequeños, o partículas, dejadas en el fluido de perforación eran también perjudiciales para el procesos de perforación y otra máquina de separación de mineral se introdujo de la industria minera - el cono clasificador.

Esta máquina, combinada con el concepto de un separador centrifugo tomado de la industria lechera, llego a ser el hidrociclón desarenador.



Figura 2 - 5. Desarenadores

Usando el diseño existente del desarenador, un cono clasificador de 4 in fue presentado a inicios de los 60's. Los resultados fueron mejores que los esperados e incluyeron mayor vida de la broca, reducción de los costos de reparación de bombas, aumento de las velocidades de penetración, y menores costos del lodo. Estos pequeños hidrociclones fueron conocidos como "deslimadores" pues ellos removían limos (15-30 micrones).

Posteriormente, la mayoría de las investigaciones de compañías petroleras reconocieron los problemas asociados con ultrafinos (coloides) en tamaños de 10 micrones o menos. Las centrifugas habían sido usadas por años en muchas industrias y fueron adaptadas para operaciones de perforación a inicios de los 50's. Ellos fueron usados por primera vez en lodos densificados para remover y desechar coloides -

partículas finas menores a 2-4 micrones - y para conservar la barita de mayor tamaño de partícula (material densificante) y algunos sólidos perforados.

A inicios de los 70's, el limpiador de lodo fue desarrollado como una adición al desarenador y deslimador para reducir perdidas en la fase liquida costosa. Los hidrociclones descargan un "slurry", incluyendo la fase liquida, que puede ser costosa en el tiempo. El limpiador de lodo toma la descarga de un banco de hidrociclones e introduce el "slurry" a una zaranda vibratoria de malla muy fina y pre-tensionada. La fase liquida costosa y la mayoría de barita pasaba a través de la malla y volvía al sistema mientras los sólidos mas grandes eran desechados. Esta fue la primera aplicación exitosa de una zaranda, unida a una estructura rígida, usando cribas muy finas.

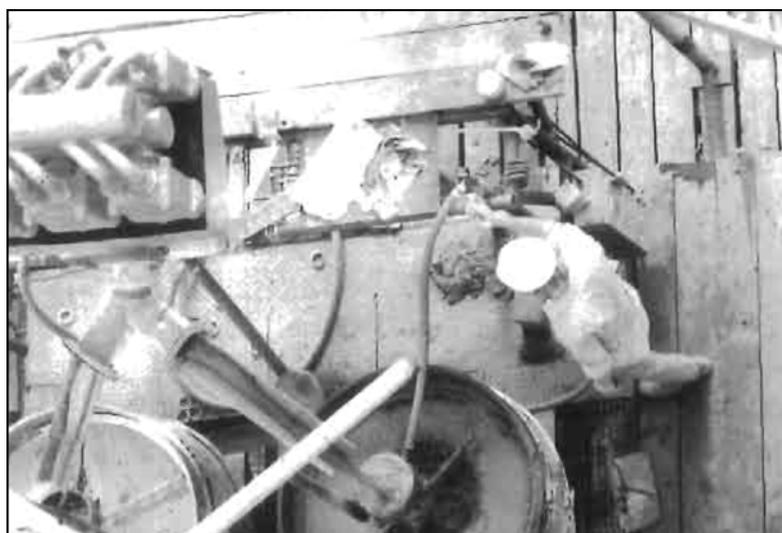


Figura 2 - 6. Diseños Iniciales de Limpiador de Lodo

Un desarrollo más reciente, presentado en los 80's, es la zaranda lineal. Los desarrollos en la tecnología de cribas han hecho posible que cribas pre-tensionadas sean estratificadas para obtener cortes muy precisos mientras se mantiene una vida económica de la criba. El movimiento lineal es el mejor movimiento de transporte para separar los sólidos de la criba, y es posible llevar recortes "cuesta arriba".

Una aplicación de las zarandas de movimiento lineal es zarandear la descarga de los desarenadores y deslimadores en vez de usar un limpiador de lodo. Este dispositivo es llamado "acondicionador de lodo".

La tecnología actual incluye la conservación de liquido - dewatering o floculación de sólidos - que separa la fase liquida de los sólidos y retorna una corriente de agua casi limpia al sistema de lodo. Este proceso incluye una centrifuga decantadora con

polímeros pre-mezclados inyectados a la línea de alimentación de la centrifuga causando floculación. Los sólidos son coalescidos dentro de la centrifuga resultando en la separación de los sólidos del liquido, y los sólidos son luego desechados.



Figura 2 - 7. Unidad de *Dewatering*

Una innovación reciente para propósitos ambientales y mayor retención de líquido, es el secador. La descarga de la zarandas lineales, desarenadores y deslimadores es fluida a través de otra zaranda vibratoria con cribas más finas (bajo la malla 450, o 32 micrones) y usualmente una mayor superficie de zarandeo. Cualquier líquido que escape puede ser retenido en el sumidero. La bomba del sumidero retorna el liquido al sistema activo, usualmente hacia el tanque de alimentación de la centrifuga.

Estos sistemas o combinación de varios ítems discutidos, satisfacen la mayoría de los requerimientos ambientales y conservan las fases liquidas costosas. El efecto deseable es cerrar el circuito en descargas liquidas, dejando una masa solida semi-seca o poco húmeda a remover para eliminación.

Una reciente innovación puesta a disposición en la Costa del Golfo es la "cadena de gumbo" o cinturón de criba gumbo. Es usada para desechar gumbo y recortes grandes y flexibles típicos de la perforación en costa y offshore.

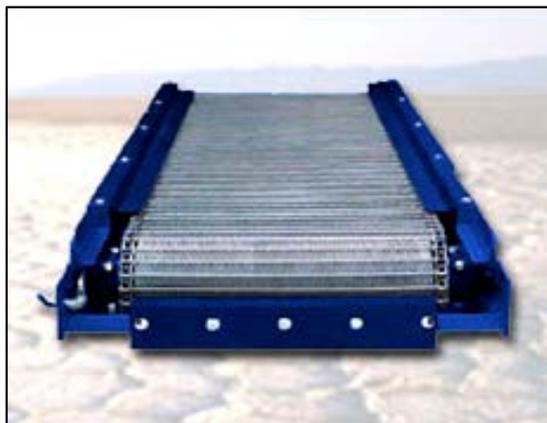


Figura 2 - 8. *Gumbo Chain*

Mejora de la Productividad.

De acuerdo a estudios previos, publicados en la Sociedad de Ingenieros de Petróleo (*The Society of Petroleum Engineers, SPE*), se presentan los siguientes:

Determinación Cuantitativa de la Invasión de Sólidos y Daño de Formación usando el Escáner CAT y Suspensiones de Baritina: (*Quantitative Determination of Solids Invasion and Formation Damage Using CAT Scan and Barite Suspensions*):

Se muestran los resultados de un estudio experimental del daño a la permeabilidad de la formación por invasión de sólidos extraños e inertes, simulados por partículas de barita. El uso de barita facilitó el análisis de Tomografía Asistida por Computadora (CAT), de sólidos en la roca (determinación de la distancia de penetración) pues el método es de alta resolución para el Bario.

Se desarrollaron pruebas de flujo de laboratorio usando dos tipos de núcleos de areniscas: uno libre de afloramiento de arcilla y otro con bajo contenido de arcilla, ambos fueron núcleos de formaciones petrolíferas. Estos núcleos fueron analizados usando SEM, XRD, y Distribución de Tamaño Poral. La Distribución de Tamaño de Partícula de la barita suspendida en la salmuera (NaCl) del afluente y efluente fueron medidas por Análisis de Tamaño de Partícula (laser PSA).

La profundidad de penetración invadida por sólidos de barita fue detectada y cuantificada al escanear con CAT las muestras de núcleos durante los ensayos de daño de roca.

En términos prácticos del efecto *skin* (razón de reducción de permeabilidad) y el radio de la zona dañada (profundidad de invasión de partícula) se puede relacionar a un mecanismo particular de daño en la forma mostrada en el siguiente gráfico:

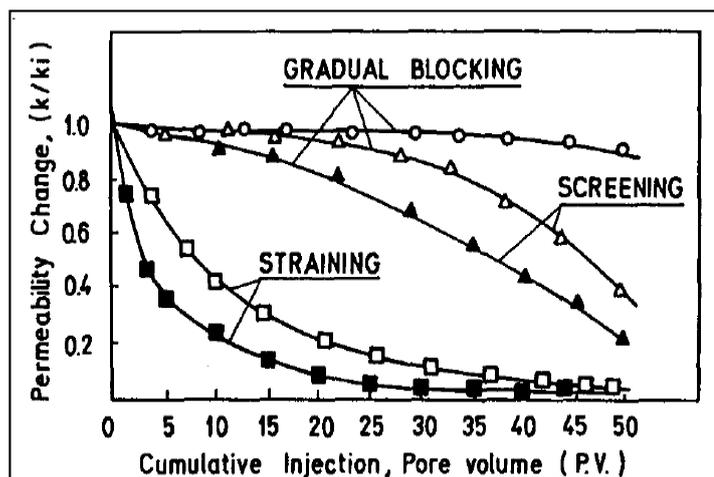


Figura 2 - 9. Manifestación de 3 Mecanismos de Captura de Partícula en las Graficas de Daño de la Permeabilidad

Un fluido de perforación no-dañante mejora la calidad del Hueco y la Productividad en Pozos Convencionales del Activo Mehsana, en la Cuenca North Cambay: (Nondamaging Drilling Fluid Enhances Borehole Quality and Productivity in Conventional Wells of Mehsana Asset, North Cambay Basin)

El Activo Mehsana de ONGC, en la cuenca North Cambay en india, enfatizó una producción de petróleo incrementada con el uso de un Fluido de Perforación No Dañante (NDDF). Su aplicación, fue el método más directo para controlar el daño a la formación durante la perforación en el campo Linch para las zonas productivas.

Se muestra la formulación, optimización de campo y aplicación de NDDF en 3 pozos. También se mencionan las restricciones en la aplicación y su solución por coordinación y uso ingenioso de los recursos disponibles. Los huecos en calibre mostraron buena calidad de registros. Los pozos han dado una productividad notoriamente incrementada en términos de producción con activación instantánea.

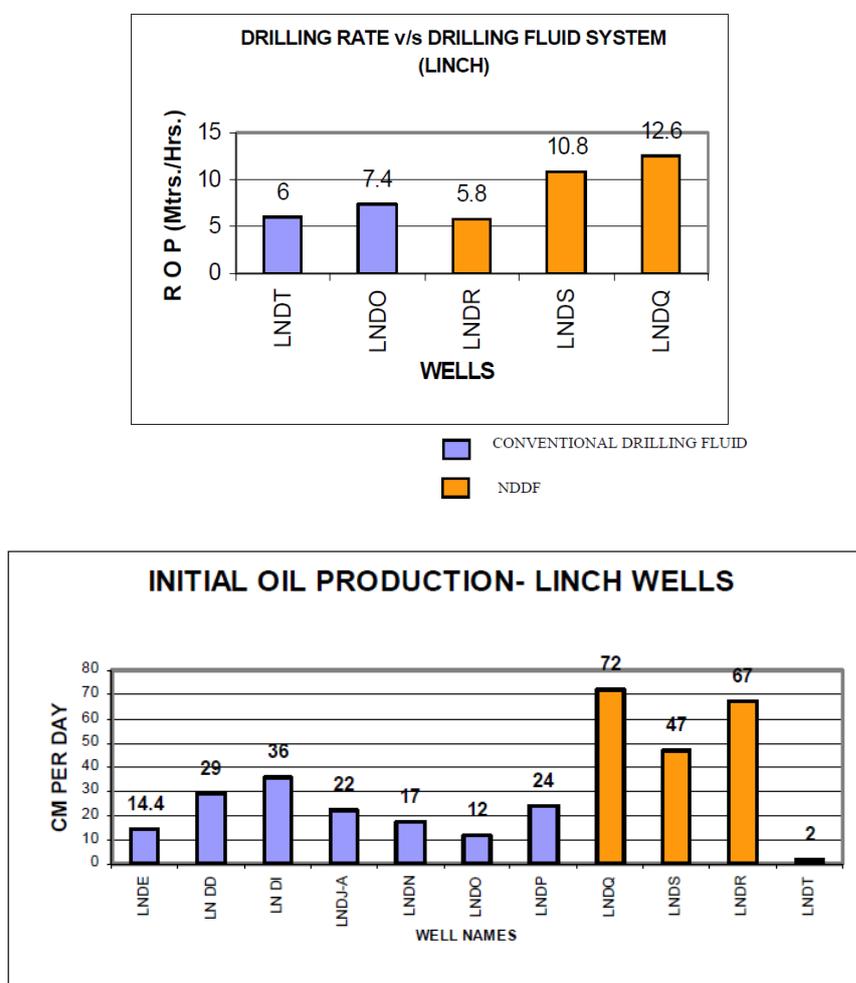


Figura 2 - 10. Graficas comparativas de aumento de ROP y Producción Inicial para 3 Pozos del Campo Linch

Las distribuciones ingenieriles de tamaño de partícula durante la perforación minimiza el daño al pozo en reservorios de arenisca: (Engineered Particle-Size Distribution While Drilling Helps Minimize Wellbore Damage in Sandstone Reservoirs)

Se presenta un plan detallado de gestión de lodo que incluye el diseño del fluido y el monitoreo del tamaño de partícula para ayudar a minimizar el daño a la formación y mejorar la productividad del pozo. Este plan de gestión fue exitosamente demostrado en 29 pozos donde el operador implemento un Drill-in Fluid (DIF) a base aceite y un analizador de distribución de tamaño de partícula (PSD) en el campo mientras se perforaban los reservorios.

El DIF a base aceite fue formulado con un relación aceite-agua de 70/30 y luego tratado con agente puenteante (Carbonato de calcio) de tamaño dado. El analizador de PSD fue utilizado continuamente durante la perforación para monitorear y mantener valores de PSD óptimos en el DIF. Mantener controlado el ROP fue esencial durante la perforación de una sección del reservorios junto a la adición cada hora de carbonato de calcio de tamaños adecuados y utilizando de forma eficiente los equipos de control de sólidos durante todo el tiempo de la perforación.

Al llegar a la profundidad total (TD), el conjunto de fondo fue cambiado y la sección entera fue rimada hasta el TD. Se bombeo un lavador hacia el zapato del revestidor y luego retorno al fondo sin bombear para simular las condiciones del hoyo que podrían ocurrir durante la corrida de mallas.

Los resultados de la prueba indicaron mínimo daño de skin y buenos caudales estables de producción.

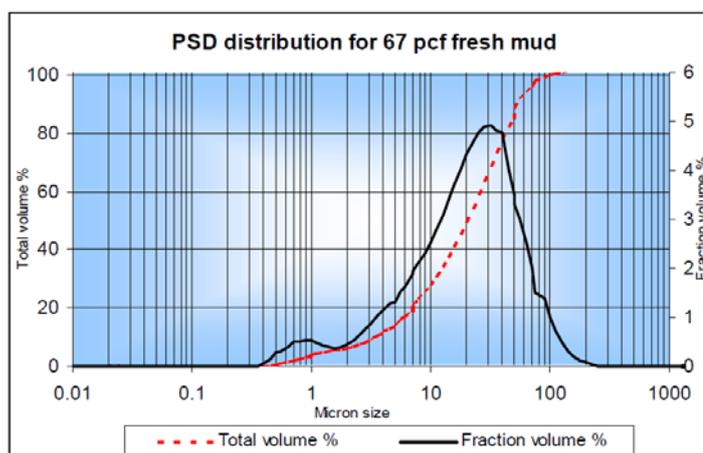


Figura 2 - 11. Distribución del Tamaño de Partícula para DIF fresco de 67 lb/ft³

Mejora de la Vida Operativa en Partes Internas de Bombas de Lodos.

Del *Paper* del ASTM STP 946, "La Erosividad Relativa de lechadas de Carbón-Aceite, Carbón-Agua y Coque de Petróleo con aceite" (*The Relative Erosivity of Coal-Oil, Coal-Water, and Petroleum Coke-Oil Slurries*), se determinó la erosividad relativa (definida como el cociente de la variación de pérdida de masa de un espécimen dado probado en un *slurry* y la variación de pérdida de masa en otro *slurry*) para *slurries* de carbón con agua, carbón con aceite y coque de petróleo con aceite.

La veta de coque Pittsburgh No. 8 y el coque de azufre medio Whiting, ambos molidos para pasar una malla 200, fueron utilizados con aceite combustible de alto punto de inflamación. Las viscosidades de los *slurries* fueron medidos antes y después de los ensayos, y la superficie dañada fue examinada usando el microscopio electrónico de barrido. Se notaron los efectos de la concentración del *slurry* (carga de sólidos), velocidad y material objetivo.

Se observó evidencia de la erosión - corrosión para *slurries* con estabilizadores añadidos y para *slurries* base agua. La erosividad incrementó en el orden siguiente: coque con aceite, carbón con aceite, carbón con agua y con carga de sólidos incrementada hasta 50%, después de lo cual se observó una disminución.

Por lo anterior, puede inferirse que si tenemos menor cantidad de sólidos en el lodo, se tendrá un menor desgaste erosivo en las partes internas de las bombas de lodo y líneas de superficie, con ello, mejorando la vida operativa de las mismas.

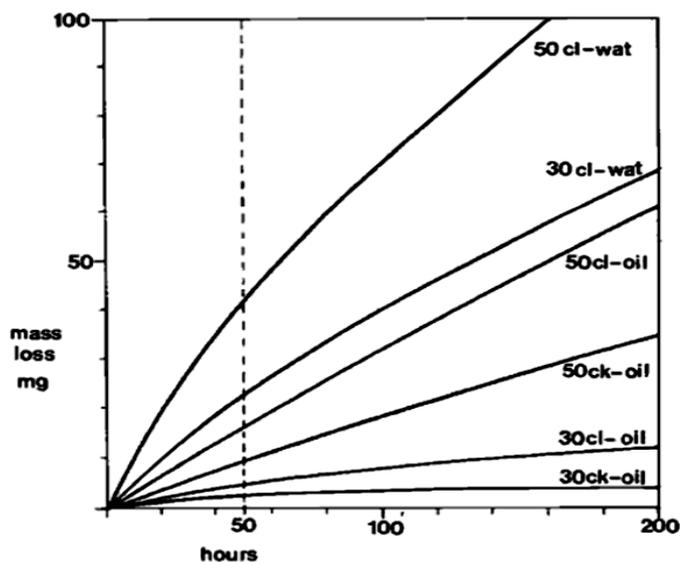


Figura 2 - 12. Curvas de Pérdida de Masa versus Tiempo para pruebas de erosión de especímenes de acero inoxidable en varios *slurries*

ii. Bases Teóricas.

Fundamentos. El sistema básico de control de sólidos para lodos no densificados con degasificador se muestra en la Figura 2-13. Está conformado por las zarandas, el tanque de asentamiento, el desarenador, el deslimador y el limpiador de lodo.

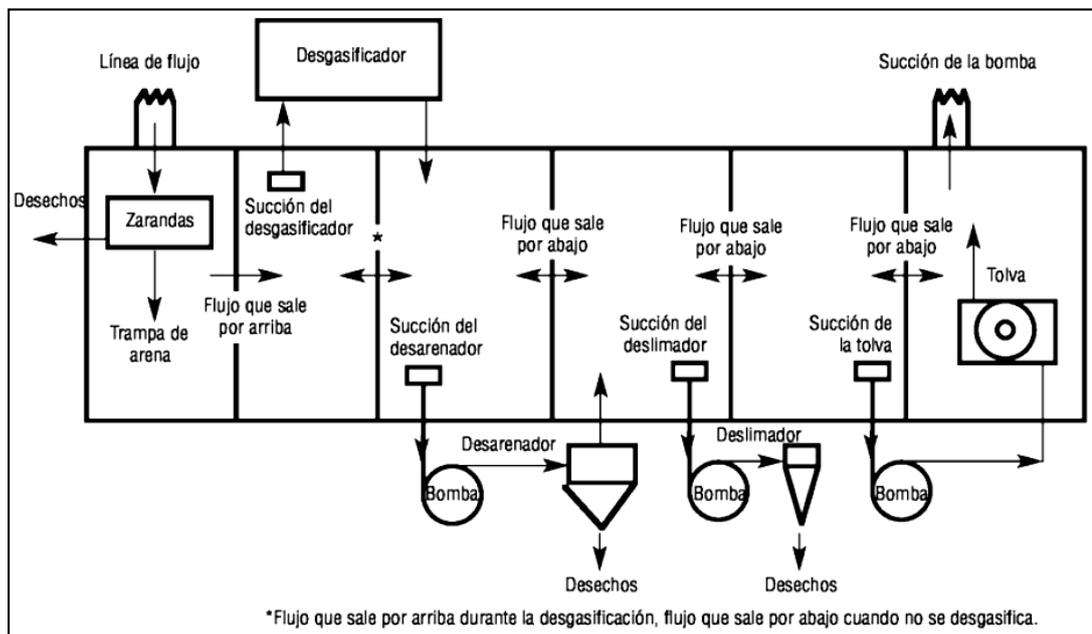


Figura 2 - 13. Sistema Básico para lodo no densificado con degasificador

Para controlar el contenido de sólidos se usa uno o varios de los métodos o mecanismos básicos de separación de sólidos:

Dilución. Cuando se adiciona agua a un sistema de lodo. El costo se genera al convertir tal cantidad de agua en lodo de densidad y contenido químico apropiado.

La primera regla para un costo de dilución mínimo es mantener el sistema de lodo a un volumen mínimo. La segunda regla establece que el lodo debería ser diluido hacia el contenido de sólidos deseados en un solo paso en lugar de una serie de pequeños pasos.

Sedimentación. Cuando se aprovecha el hecho que sólidos de diferentes tamaños y densidades asientan a diferentes velocidades. Para conseguir esto, se utilizan los Tanques de Asentamiento o Trampas de Arenas, las cuales están localizadas debajo de las zarandas y reciben el fluido, entregándolo al siguiente tanque por reboce.

La velocidad de asentamiento de una partícula aumenta como una función del aumento de la fuerza gravitacional, del diámetro de la partícula, de la diferencia en

densidad de la partícula y el fluido, y de la disminución de la viscosidad del fluido. Esto se nota en la “Ley de Stokes” mostrada a continuación:

$$V_s = \frac{g_c * D_s^2 * (\rho_s - \rho_f)}{46.3 * \mu}$$

Donde V_s : Velocidad de asentamiento (ft/seg), g_c : constante de gravedad (ft/seg²), D_s : diámetro del sólido (ft), ρ_s y ρ_f : densidad del sólido y fluido (lb/ft³), μ : viscosidad del líquido (cp).

A medida que el peso del lodo aumenta, los tiempos de asentamiento llegan a ser mayores; el desarrollo del esfuerzo de gel detendrá completamente el asentamiento de todas las partículas demasiado pequeñas para vencerlo.

Zarandeo. Cuando se utiliza un movimiento vibratorio (lineal, circular o elíptico) para eliminar los sólidos del lodo. Para tal fin, se usan las zarandas, las cuales son los dispositivos más importantes de control de sólidos pues su costo es relativamente bajo (renta del equipo y reemplazo de mallas) y son la primera barrera de retención de sólidos. Algunos términos generales usados para describir las mallas de las zarandas son:

- MALLA: Es el número de aberturas por pulgada lineal. Además del número de malla, se usan varios tamaños de alambre y patrones de tejido que afectan el tamaño de la abertura y el caudal para un tamaño de malla dado.
- AREA ABIERTA: El área no ocupada por los alambres.
- CONDUCTANCIA: Es la capacidad de caudal o permeabilidad relativa por espesor unitario de una malla (según API RP13E).

Centrifugación. Cuando se genera un movimiento rotacional del lodo en un cono, resultando en una fuerza centrífuga que concentra los sólidos en la pared de éste. Dicha capa densa viaja hacia la salida del cono y es expulsada de éste, mientras que el lodo remanente se dirige hacia la dirección opuesta. El desarenador, deslimador, limpiador de lodo y la centrifuga decantadora utilizan este mecanismo.

Para una óptima separación, existen 2 parámetros. El primero es la cabeza hidrostática, el cual depende de la presión de entrada del flujo (por la bomba centrífuga) y de la densidad del lodo; mientras que el segundo es el tipo de salida (spray o sogá).

Porcentaje de Sólidos vs. Peso del lodo. El contenido de sólidos tiene una relación directa con el peso del lodo. Por ello, la Figura 2 - 14, muestra el rango recomendado de contenido total de sólidos para el caso de lodos base agua.

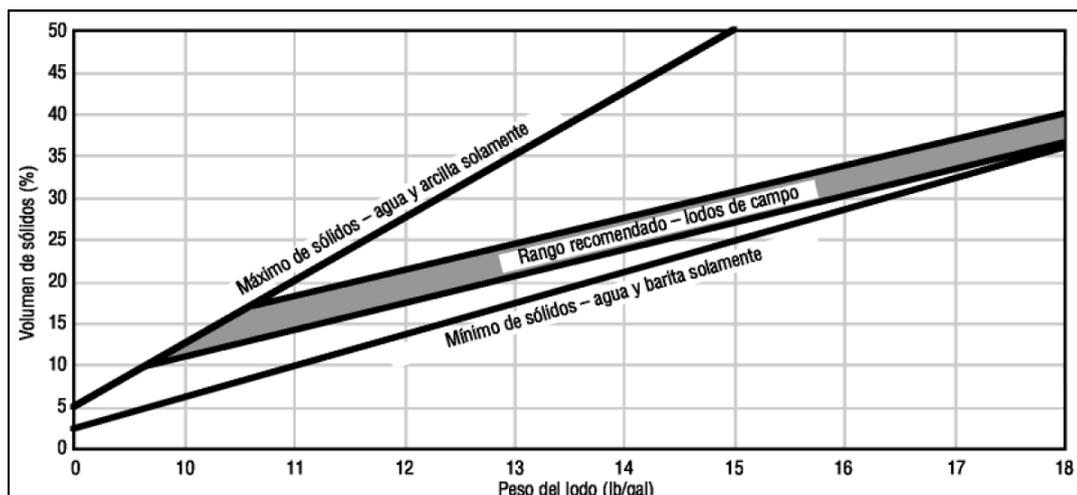


Figura 2 - 14. Rango Recomendado de Sólidos en Base Agua

Porcentaje de Sólidos - Calculo.

- Método Analítico: En lodos base agua que solo contienen sólidos de baja gravedad específica (de 2.65 en promedio) se utiliza:

$$\% \text{ Sólidos Totales} = \frac{\rho_{\text{lodo}} - 8.33}{1.65 * 8.33}$$

Luego, se halla el % LGS (*Low Gravity Solids*) corregido por contenido de sales (de tablas) en función a los ppm de Cloruros y a al porcentaje de agua en la Retorta.

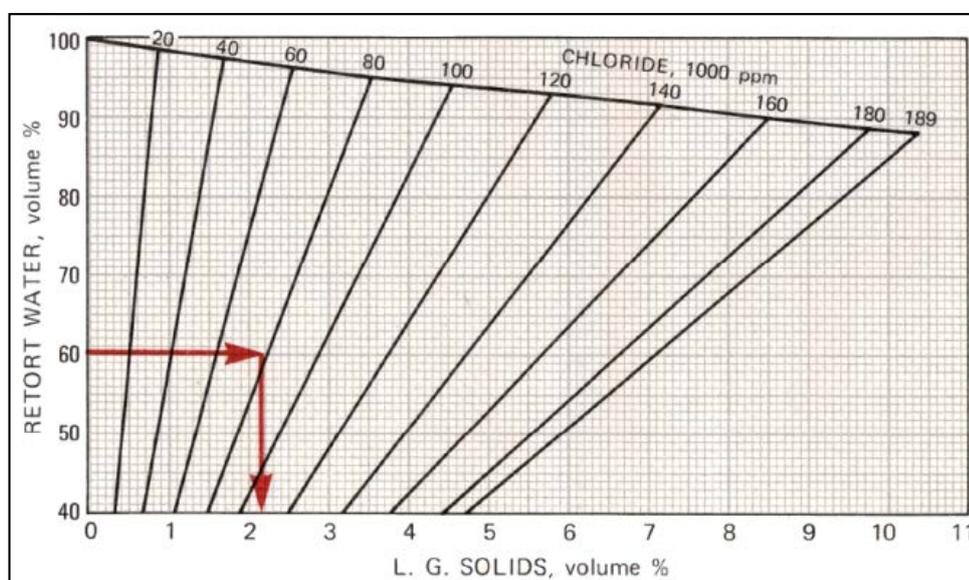


Figura 2 - 15. Gráfica para hallar el % LGS corregido a partir del %W y ppm del lodo.

$$\% \text{ Bentonita} = \frac{\text{CEC} - \% \text{ Sólidos Totales}}{8}$$

$$\% \text{ Sol. Perforados} = \% \text{ LGS.} - \% \text{ Bent.}$$

- **Método de la Retorta:** Provee un medio para separar y medir los volúmenes de agua, petróleo y sólidos contenidos en una muestra de fluido base agua. En la retorta, un volumen conocido de una muestra de lodo es calentado hasta vaporizar los componentes líquidos, que luego son condensados y colectados en un recipiente graduado. Los volúmenes de líquido son determinados de forma directa de las lecturas de fases en el recipiente. El volumen total de sólidos (suspendidos y disueltos) es obtenido por diferencia.

Puntos de Corte. Son usados para indicar el desempeño de los equipos de control de sólidos. Por ejemplo, un Punto de Corte D50 es la intersección del punto dato 50% en el eje Y, y el tamaño en micras correspondiente en el eje X en la curva de punto de corte. Este punto de corte indica el tamaño de partícula en la entrada al equipo de control de sólidos que tendrá un 50% de chance de pasar por el equipo y un 50% de chance de ser removido del equipo.

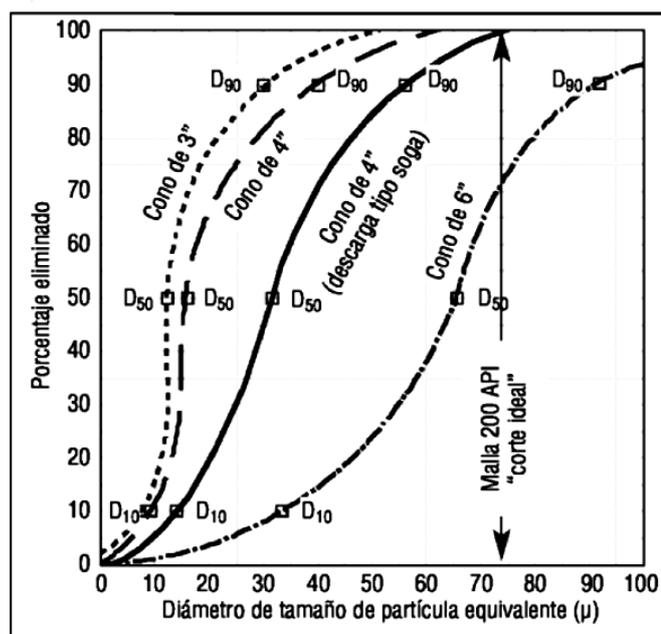


Figura 2 - 16. Gráfica de Punto de Corte típica de los Hidrociclones

Zarandas Vibratorias. Por lo general, usan un tanque posterior (comúnmente conocido como *Possum Belly* o Caja de Lodo) para recibir el fluido de perforación del *flowline*.

El lodo fluye sobre una presa y es distribuida uniformemente sobre la superficie de la malla. Las mallas están montadas en una canasta que vibra para contener el caudal de lodo y el movimiento de los sólidos separados. La canasta descansa en miembros aisladores de vibración, como resortes helicoidales, resortes de aire o soportes de caucho flotador. Los miembros aisladores de vibración están sostenidos por el *skid*. Debajo de la canasta, un platillo colector es usado para canalizar el *underflow* de las mallas al sistema activo.

El desempeño de las zarandas es afectado por el tipo de movimiento, longitud del *stroke* de la cubierta y la velocidad de rotación del motor. La forma y dirección axial del movimiento de vibración sobre la cubierta es controlado por la posición de los vibradores en relación a la cubierta y la dirección de rotación del vibrador.

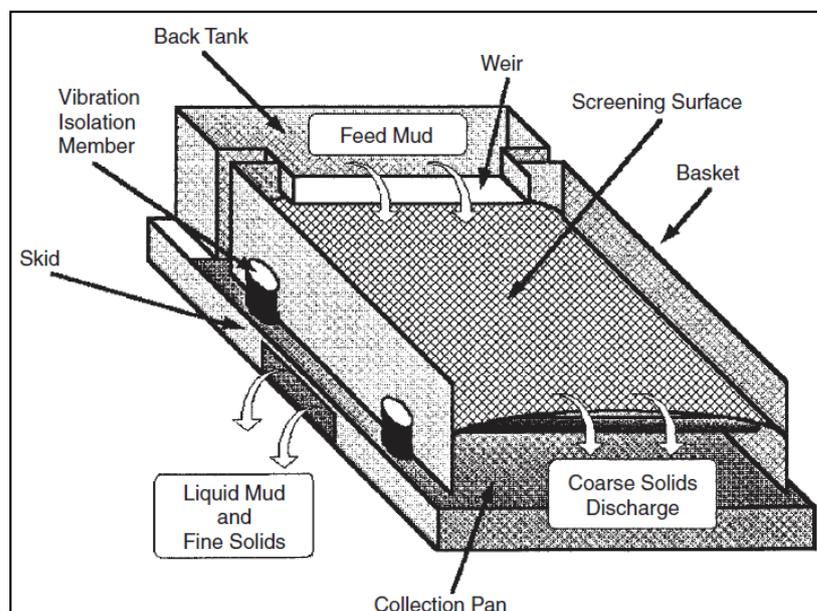


Figura 2 - 17. Zaranda con tanque posterior

Los elementos del diseño de una zaranda vibradora se concentran en muchos aspectos de la máquina, tales como:

Forma del movimiento: Elíptico desbalanceado, circular, lineal, elíptico balanceado.

Sistemas de Vibración: posición, orientación y número de vibradores usados.

Diseño de la cubierta: soporte y ajuste de mallas tensionadas (*over- and underslung*).

Fuerza G: depende de la longitud del *stroke*, y de la velocidad de rotación del motor.

Sistemas de alimentación: Sistema de generación eléctrica del Taladro.

Tanques de asentamiento. Inmediatamente debajo de las zarandas, está el primer tanque, llamado de asentamiento o trampa de arena. El fluido que pasa a través de las zarandas fluye directamente hacia este compartimiento. El fluido no es agitado en este compartimiento. Esto permite que los sólidos asienten. El fluido rebosa desde la trampa de arena hacia el siguiente compartimiento, que debería ser el tanque de succión del degasificador.

Degasificadores. Su propósito es remover el gas del lodo, por ello, tiene capacidad limitada para manejar grandes cantidades. Pueden ser atmosféricos o de vacío, en general para lodos no densificados y densificados, respectivamente. En ambos casos, el lodo se hace colisionar con platillos o serie de estos, para liberar el gas.

Hidrociclones. Son dispositivos mecánicos simples y de fácil mantenimiento sin partes móviles. La separación se realiza por transferencia de energía cinética de entrada en una fuerza centrífuga en el interior del cono. La fuerza centrífuga actúa sobre el lodo para separar rápidamente los sólidos perforados y otras partículas de acuerdo con la Ley de Stokes.

Deberían ser diseñados para proveer remoción máxima de sólidos con mínima pérdida de líquido. Por lo general, son más eficientes cuando los sólidos tienen un diámetro mayor a 10 micras y son esféricos en forma. Si los sólidos son planos, como la mica, el movimiento tiende a ser aleatorio y dependiente de si la superficie o borde plano es hacia la fuerza gravitacional creada en el vórtice.

Dentro de éste grupo, se incluye a los equipos siguientes:

Desarenadores: Unidades diseñadas para separar sólidos perforados en el rango de 50 a 80 micras y Barita en el rango de 30 a 50 micras. Deberían ser utilizados en lodos no densificados cuando las zarandas no sean capaces de tener malla 140 API o más finas. Son usados principalmente para remover altos volúmenes de sólidos asociados a la rápida perforación de topes de hueco de gran diámetro.

El uso de los desarenadores es generalmente discontinuado luego que se hayan agregado al lodo Barita y otros polímeros costosos, porque se desecharan grandes porciones de éstos materiales.

Deslimadores: Son manufacturados en una variedad de dimensiones, desde 2 hasta 6 pulgadas, y hacen separaciones de sólidos perforados en el rango de 12 a 40 micras, mientras que para la Barita el rango es de 8 a 25 micras. Se diferencia del desarenador únicamente por el tamaño del cono, pues opera en exactamente los mismo principios.

Eficiencia de los Hidrociclones. Es obtenido por medio de los siguientes parámetros:

Densidad de la Descarga (lb/gal). Haciendo uso de la balanza de lodo al tomar una muestra representativa.

Caudal de la Descarga (seg/qt). Contando el tiempo que demora en llenarse un cuarto de galón.

Se realiza la medición para cada cono, luego se compara. Si se tienen caudales iguales, el que tiene mayor densidad será el más eficiente. Si se tienen densidades iguales, el que tiene mayor caudal será el más eficiente.

Limpiadores de Lodo. Son una combinación de hidrociclones montados sobre una zaranda vibratoria con pequeñas aberturas. Su uso principal siempre ha sido la remoción de sólidos perforados de mayor tamaño que la Barita.

Centrifugas. Son dispositivos mecánicos usados para acondicionar el lodo al dividir el fluido en corrientes de alta y baja densidad, permitiendo una ser separada de la otra. La división es causada por sedimentación acelerada.

A medida que el lodo pasa a través de un *bowl* de rápida rotación, la fuerza centrífuga mueve a las partículas pesadas hacia las paredes del *bowl*, donde son arrastradas hacia el *underflow* por un taladro concéntrico, también llamado *conveyor*, que rota a una velocidad ligeramente menor que el *bowl*.

Con este equipo se puede conseguir una Fuerza G de 400 a 3000. Por ello, es posible reducir la concentración de sólidos de tamaño coloidal, los cuales son los causantes de generar problemas de viscosidad del lodo y de pobres condiciones de hueco, debido a la elevada área superficial que estos poseen.

Para lodos no densificados, que contienen bajo contenido de sólidos y donde el tamaño de partícula no es causa principal de preocupación, el objetivo de centrifugar es la remoción de sólidos perforados.

Sin embargo, con un inevitablemente elevado contenido de sólidos en lodos densificados, el aumento del esfuerzo de gel y viscosidades, así como la degradación de la calidad del revoque asociado con la disminución de tamaño de partícula con el tiempo, puede llevar a serios problemas. Este problema, es causado por la creciente concentración de coloides o partículas de tamaño cercano al coloidal que son muy finos para ser separados del fluido base. En este contexto, las centrifugas son usadas para remover selectivamente estos sólidos finos.

Bombas Centrifugas. Son máquinas que imparten Energía Cinética a los fluidos líquidos. En relación a su desempeño hidráulico, se componen básicamente del Impulsor (móvil) y el Estator (estático). En particular, las bombas de flujo radial son diseñadas para producir un patrón de flujo por medio de un Impulsor radialmente hacia fuera y perpendicular al eje de la bomba.

La rotación del Impulsor causa que el fluido dentro de éste, rote a alta velocidad, entregándole energía cinética. Existen 3 diseños básicos de impulsores: uno cerrado que tiene una cubierta (pared que rota) delante y detrás del Impulsor, otro semi-cerrado que tiene una cubierta en un lado y es ensamblado cerca de la pared estacionaria del Estator en el otro lado, y por último, uno abierto que podría o no tener parte de una cubierta en un lado y es ensamblado cerca de la pared del estator en el otro lado.

Las funciones del Estator de la bomba son: dirigir el fluido hacia el ojo del Impulsor por medio de la entrada de succión, minimizar la recirculación de fluido desde la descarga del Impulsor a la succión de éste, y capturar la descarga de fluido desde el Impulsor en la Voluta para utilizar, de la manera más eficiente, el trabajo desarrollado por el Impulsor y dirigir el fluido fuera de éste.

Beneficios de un Buen Control de Sólidos. Son los siguientes:

- Se reducen los reemplazos de las partes de la bomba de lodos, y la bomba opera con mayor eficiencia.

- Menor torque en la sarta de perforación y menor arrastre que conllevan a menor desgaste en la sarta y menores "key-seat" (el mayor potencial para pega de tubería).
- La bajada del "Casing" es más fácil. Los trabajos de cementación son mejores y se requiere de menores cementaciones forzadas.
- La vida de la broca se extiende debido a menor abrasión.
- Las velocidades de penetración pueden aumentar.
- Se reducen las diluciones para mantener bajo el peso del lodo. Esto no solo se manifiesta en menores costos de fluido de perforación, sino también en menores volúmenes de fluido de perforación y con ello menores desechos de lodo y menor volumen de éstos en las pozas.
- Las adiciones del material densificante se realizan con poca o ninguna dificultad.
- Las herramientas de fondo se asientan y liberan con poco o ninguna interferencia de los recortes perforados.

Factores que afectan la Velocidad de Penetración - Propiedades del Lodo. Las propiedades del fluido de perforación reportadas a afectar la velocidad de penetración incluyen: densidad, propiedades reológicas de flujo, características de filtración, concentración y distribución de tamaño de sólidos, y composición química.

La velocidad de penetración tiende a disminuir con el aumento de la densidad de fluido, viscosidad y contenido de sólidos. Por otro lado, tiende a aumentar con la creciente velocidad de filtrado. La densidad, contenido de sólidos y características de filtración del lodo controlan la presión diferencial sobre la zona de roca triturada debajo la broca.

Daño a la Formación. La invasión de los sólidos del lodo disminuye la productividad en dos formas principales:

- Taponamiento de las gargantas de los poros por formación de revoques internos.
- Incremento de la presión capilar al reducir el radio de los poros.

Los sólidos presentes en fluido de perforación pueden ser:

- Sólidos agregados para cumplir funciones específicas, para impartir al fluido las propiedades deseadas. Generalmente, su tamaño de partícula es menor de una

micra, excepto la barita y los materiales de control de pérdida de circulación. El tamaño de partícula de la barita varía entre 1 y 74, y los materiales de control de pérdida son de mayor tamaño todavía.

- Sólidos cortados de las formaciones atravesadas; su tamaño de partícula varía entre 1 y 100 micras, y mayores.

Los tamaños típicos de los sólidos cortados de la formación se muestran en la tabla siguiente:

DESCRIPCIÓN	TAMAÑO (μm)
Cortes grandes	Más de 440
Arena	74 - 440
Limo	2 - 74
Arcilla	0,5 - 2
Coloides	0,001 - 0,5

CUADRO N° 2.1. Clasificación del Tamaño de Partículas

El medio poroso actúa como un filtro y por lo tanto, las partículas sólidas pueden invadirlo, dependiendo de su tamaño, del diámetro promedio de las gargantas de los poros y de la presión diferencial aplicada. Dependiendo del tamaño, las partículas pueden formar un revoque en la cara del medio poroso, hacer un revoque interno en las cercanías de la cara expuesta al flujo, o invadir profundamente el medio, si son mucho menores que el diámetro promedio de garganta. También, hay que tomar en cuenta la concentración de sólidos en el fluido de invasión, ya que, aún cuando sean muy pequeños, si hay alta concentración, podrán formar puentes en cualquier estrechamiento dentro del poro y reducir la permeabilidad.

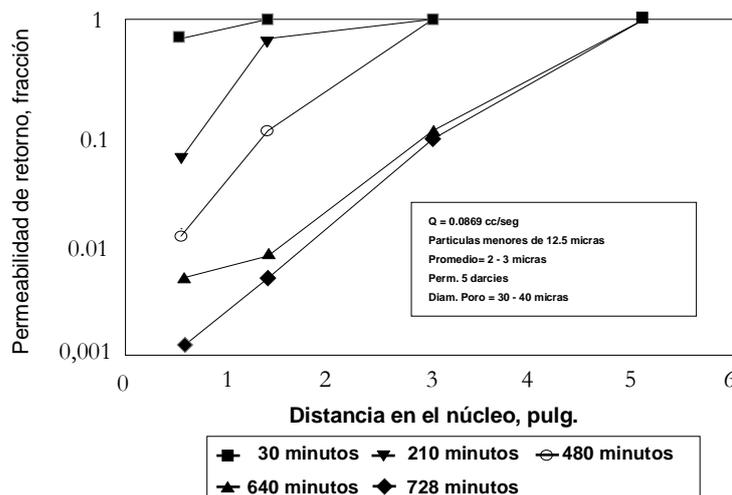


Figura 2 - 18. Efecto de la invasión de partículas sólidas en la permeabilidad

En la figura 2-18, se puede observar el efecto de la invasión, a muy baja tasa, de un fluido en un núcleo de Berea de 6 pulgadas de largo, 5 mD de permeabilidad absoluta, y un diámetro promedio de garganta de poro de 30 a 40 micras, por un fluido que contiene partículas de tamaño promedio de 2 a 3 micras. Dependiendo del tiempo de inyección, se observa un efecto de taponamiento en las primeras 2 pulgadas del núcleo.

Como una regla general, puede decirse que si el diámetro promedio de las partículas es mayor que $1/3$ del diámetro promedio de los poros, las partículas formarán un revoque externo sobre la cara de la formación permeable. Si el tamaño de las partículas está comprendido entre $1/3$ y $1/10$ del diámetro promedio de los poros, entonces se formará un revoque interno, el cual es el peor de los casos, porque ocurre dentro del radio crítico. Y si las partículas son menores que $1/10$ del tamaño del poro, entonces habrá invasión profunda, cuya severidad dependerá de la concentración de las partículas.

Distribución del Tamaño de Partícula por Análisis de Difracción. Se basa en la medida del ángulo e intensidad de luz que es dispersada por partículas en la trayectoria de una haz laser que pasa a través de una muestra diluida de lodo. La intensidad versus los datos de ángulo de dispersión son procesados vía un algoritmo para generar la concentración de partículas dentro de un conjunto de intervalos de tamaño fijos. Esta técnica genera resultados aceptables para partículas que se encuentran desde aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ hasta $700\ \mu\text{m}$ en tamaño.

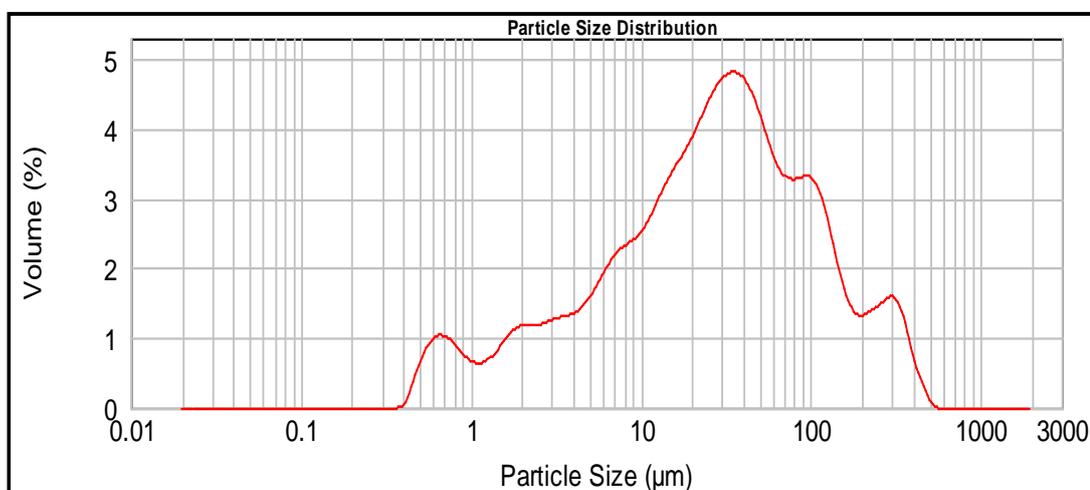


Figura 2 - 19. Tamaño de Partícula (μm) versus Porcentaje en Volumen

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La Investigación se realizó en las oficinas de Graña y Montero Petrolera (GMP), en Lima; y en las locaciones de los pozos 12259 y 12205, en el Lote I en Talara, Piura.

Se realizó el Diagnóstico del desgaste en las partes de las Bombas de Lodo National 8P-80 y Ellis Williams 850, y el desempeño de las Zarandas Vibratorias, Desarenador, Deslimador, Limpiador de lodo y sus respectivas Bombas Centrifugas a las condiciones de operación actuales. Para ello, se hizo uso de los siguientes parámetros y/o pruebas:

- **Mediciones de Densidad y Caudal de Descarga de los Hidrociclones en el Pozo 12259.**

Dichas mediciones se realizaron en la locación, durante la perforación (ninguna durante las conexiones) del Pozo 12259 en la sección de 8.5" para el Desarenador de 2 Conos (2 pruebas), Deslimador de 8 Conos (2 pruebas) y Limpiador de Lodo de 10 Conos (1 prueba). Se hizo uso de los siguientes instrumentos:

1. Balanza de Brazo: Medidor de la densidad del fluido de perforación en libras por galón, que para estar calibrado debe marcar 8.33 lb/gal para agua pura.
2. Jarra toma muestra: Utilizada para poder obtener una muestra de lodo. Tiene un volumen de 946 cc o 1/4 de galón.
3. Cronómetro: Instrumento de medición indirecta de caudal.

La "Velocidad de Descarga Total" fue calculada por medio del promedio armónico entre las velocidades de descarga respectivas de los conos de cada hidrociclón.

La "Densidad de Descarga Promedio" fue hallada usando el promedio aritmético entre las densidades de descarga correspondientes a los conos de cada hidrociclón.

La "Tasa de Masa de Sólidos Perforados" se estimó a partir del "Diámetro del Huevo Promedio", que fue hallado con el Registro *Caliper*, y del "ROP Promedio", que se calculó de los pies perforados en el tiempo que tardó perforar el intervalo.

El "Porcentaje de Sólidos Eliminados" representa la relación entre los "Sólidos Descargados" (Secos) y la "Tasa de Masa de Sólidos Perforados".

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones:

Parámetros \ Hidrociclón	Desarenador		Deslimador		Limpiador de Lodo	Unidad
Diámetro De Cono	12		4		4	In
Día	25/03/2012	27/03/2012	25/03/2012	27/03/2012	25/03/2012	-
Hora	10:20	10:40	16:20	11:42	22:15	Hr
Presión De Cabeza	45.00	47.50	42.00	42.00	39.00	Psia
Cabeza de Alimentación	74.28	76.25	69.63	67.42	64.66	Ft
Velocidad de Descarga Total	18.11	45.74	18.47	26.61	14.51	sec/qt
Densidad de Descarga Promedio	15.70	14.60	13.83	14.25	14.58	lb/gal
Intervalo	7550 - 7580	8259 - 8290	7672 - 7703	8259 - 8290	7795 - 7827	Ft
Caudal	387.86	369.82	360.80	369.82	360.80	gal/min
ROP Promedio	25.00	13.01	27.76	13.01	18.11	ft/hr
Diámetro Del Huevo Promedio	8.79	8.59	8.88	8.59	8.97	In
% Sólidos - Zaranda - Retorta	13.00	14.00	13.00	14.00	14.00	%
Formación	PETACAS (lutita)	ANCHA (lutita-arena)	PETACAS (lutita)	ANCHA (lutita)	ANCHA (lutita-arena)	-
Densidad Desarenador (Succión)	11.65	11.98	11.60	11.98	11.60	Ppg
Densidad Deslimador (Succión)	11.65	11.98	11.60	11.98	11.60	Ppg
Densidad Limpiador de Lodo (Succión)	11.52	11.93	11.55	11.92	11.60	Ppg
Densidad de Lodo (1era Succión)	11.50	11.93	11.60	11.92	11.60	Ppg
Underflow Total	0.83	0.33	0.81	0.56	1.03	gal/min
Sólidos Descargados Totales	373.73	187.84	414.99	173.91	600.42	lb/hr
Tasa de Masa de Sólidos Perforados	1742.9	866.0	1975.2	866.0	1315.0	lb/hr
% Sólidos Eliminados	21	22	21	20	46	%

CUADRO N° 3.1. Mediciones de Densidad y Caudal de Descarga de Hidrociclones

- **Análisis Granulométrico por Sedígrafo de 2 Muestras de Lodo.**

Se realizó esta Prueba de Laboratorio para determinar la Distribución del Tamaño de las Partículas en el Lodo en la etapa final de la perforación (dado que es más representativo) de los Pozos 12248 y 12259, que fueron perforados con el Equipo GMP-08 y GMP-10, respectivamente. Las muestras se recolectaron a la salida de la zaranda.

El Sedígrafo es un calibrador de tamaño que determina la concentración de las partículas remanentes en profundidades decrecientes de sedimentación en una celda que contiene la suspensión. La atenuación por el asentamiento de la suspensión es medida como función del tiempo y la altura.

La Interpretación de los resultados de la prueba nos indican que existe una mayor concentración de partículas de tamaño ultrafino ($10\ \mu\text{m}$), que puede entenderse como la consecuencia de las formaciones de lutitas perforadas (arcillas) y la recirculación de los recortes que se hacen cada vez más pequeños.

Además, existen partículas coloidales ($0\text{-}2\ \mu\text{m}$), que junto a un diferencial de presión dado, podrían generar daño en formaciones con gargantas porales de mayor diámetro.

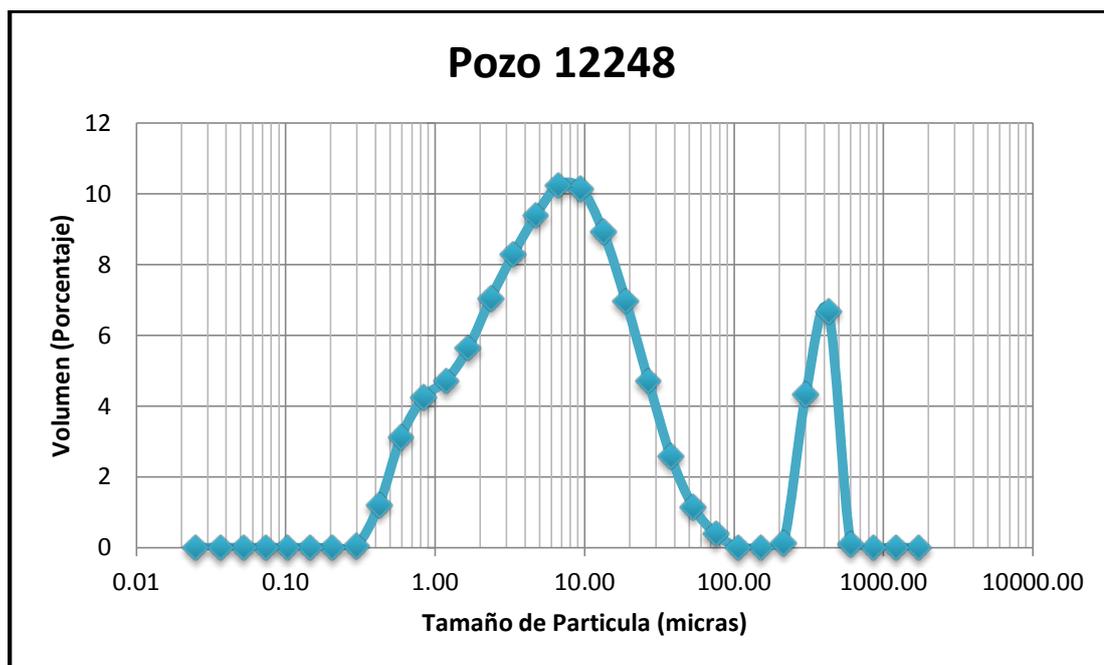


Figura 3 - 1. Distribución de Tamaño de Partícula de una muestra de lodo sin el uso de centrifuga decantadora.

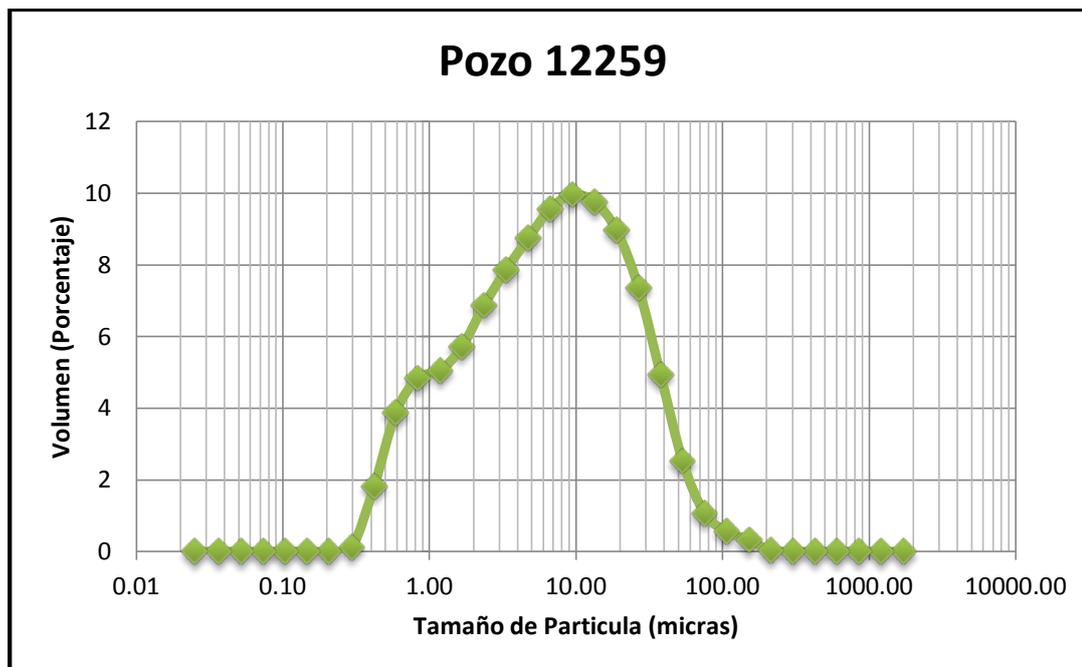


Figura 3 - 2. Distribución de Tamaño de Partícula de una muestra de lodo con el uso de centrifuga decantadora.

Ambos Pozos muestran una curva similar para partículas de tamaño menor a 100 μm , pero solo el 12248 tiene partículas de mayor tamaño, dado que no se utilizó centrifuga decantadora para este pozo, mientras que para el 12259, sí.

- **Caudal de las Bombas Centrifugas y las Bombas de Lodo.**

Las mediciones fueron calculadas en la locación, durante la perforación del Pozo 12205. Antes de realizar las pruebas, se aprovechó el hecho que habían terminado de cementar la primera sección de 16", pues durante el fragüe del cemento se vota el Lodo Bentónico y se lavan los tanques del lodo, lo cual facilitó la medición del volumen y capacidad de estos últimos. Los resultados fueron los siguientes:

Tanque	Ancho (in)	Largo (in)	Altura 1 (in)	Altura 2 (in)	Volumen Total (bbl)	Factor (gal/in)
Sand Trap	89	119	22	55	42.0	45.85
Desarenador	114	119	47	55	71.3	58.72
Deslimador	124	119	47	55	77.6	63.87
Limp. De Lodo	167	119	47	53	102.4	86.02
1era Succión	114	119	47	53	69.9	58.72
Pildorero	49	119	47	53	30.0	25.24
Tanque de Reserva	195	102	55.5	55.5	113.8	86.10

CUADRO N° 3.2. Dimensiones y Volúmenes de los tanques de Lodo.

También se pudo medir la dimensión y profundidad en el tanque de la succión y descarga de las bombas centrífugas que alimentan a los hidrociclones.

Tanque	Succión	Descarga
-	<i>Diámetro x Tipo x Profundidad del tope</i>	<i>Diámetro x Altura desde la Brida al Pto. Medio</i>
Desarenador	6" x Recta x 37.5"	5" x 41.5"
Deslimador	6" x Codo x 37.5"	5" x 73"
Limp. De Lodo	6" x Codo x 37.5"	5" x 86"
1era Succión	6" x Codo x 37.5"	5" x 33.5" + Codo
Tk Reserva	6" x Codo x 44"	5" x 42.5"

CUADRO N° 3.3. Dimensiones de las líneas de succión y descarga de las bombas centrífugas de los Hidrociclones.

Luego, se realizaron unas pruebas de flujo a las bombas de lodo para poder evaluar su eficiencia actual. Se hizo uso del Tanque del Pildorero de 31.2 bbl de volumen y de una regla de metal graduada (para medir el nivel en el tanque); además, con el apoyo del Jefe de Equipo y el personal de la cuadrilla de perforación se desarrollo 1 prueba para cada bomba de lodos.

Sin embargo, se evaluó que no eran representativas dado que el encendido y apagado de las bombas no era instantáneo. Por tal motivo, se decidió realizar pruebas continuas, en donde se esperó que el flujo, en el tanque, sea estable.

Bomba	2		3		Unid.
Marca / Tipo / Potencia	Ellis Williams / Triplex / 850 HP				-
Diámetro de Laina	7.0				in
Longitud de Carrera	9.5				in
Tiempo de Flujo	1.0				min
Strokes/Minuto	79		82		-
Nivel Inicial	11.42	24.41	16.54	28.35	In
Nivel Final	24.40	37.00	28.35	39.76	In
Caudal ideal	375.1		389.3		Gpm
Caudal real	321.2	311.5	292.0	282.3	Gpm
Eficiencias	85.6	83.0	75.0	72.5	%
EFICIENCIA PROMEDIO	84.3		73.8		%

CUADRO N° 3.4. Datos de la Bomba de Lodos y de la Prueba de flujo para calculo de Eficiencia con Precarga.

Para ambas bombas se hicieron 3 pruebas, desde la bomba hacia el tanque del pildorero. Además, se realizaron 2 pruebas en sentido inverso con la Bomba 2, con la finalidad de evaluar la eficiencia proporcionada por la bomba centrífuga que la precarga, que resulto ser 12.1%.

Bomba	2				Unid.
Marca / Tipo / Potencia	Ellis Williams / Triplex / 850 HP				-
Diámetro de Laina	7.0				In
Longitud de Carrera	9.5				In
Tiempo de Flujo	1.0				Min
Strokes/Minuto	79				-
Nivel Inicial	36.81	25.98	37.80	26.77	In
Nivel Final	25.98	14.96	26.77	14.37	In
Caudal ideal	375.1				Gpm
Caudal real	267.7	272.6	272.6	306.6	Gpm
Eficiencias	71.4	72.7	72.7	81.7	%
EFICIENCIA PROMEDIO	72.2				%

CUADRO N° 3.5. Datos de la Bomba de Lodo 2 y de la Prueba de flujo para calculo de Eficiencia sin Precarga.

Por lo tanto, las Eficiencias de las Bombas 2 y 3 son 84.3% y 73.8%, respectivamente y no 95% como solía asumirse. Este cambio es significativo y va influir en los aspectos siguientes: diseño de hidráulica de la broca, tiempo de un Bottom-Up, revoluciones del motor de fondo, limpieza del hueco, etc.

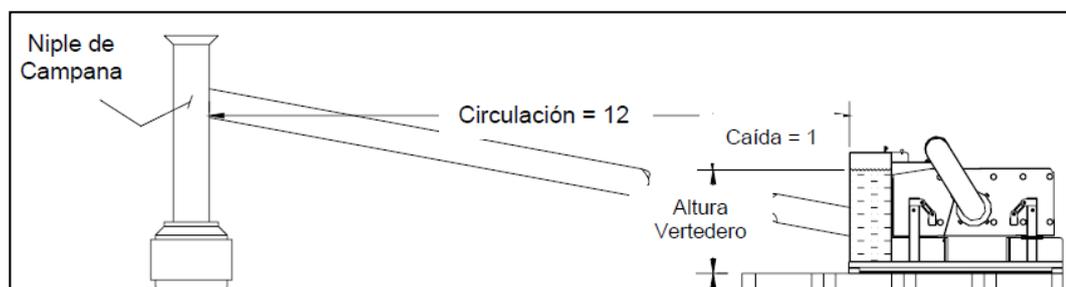


Figura 3 - 3. Recomendación de pendiente mínima del Flowline

Se observó también que la línea de flujo o *flowline* está casi horizontal, cuando la recomendación dice que debe haber una caída de 1 pie por cada 12 pies de circulación horizontal, pues la caída es 1 pie por cada 19.14 pies. Por tal motivo, el engrapador tenía que bombear lodo por una línea que entraba a la mitad del *flowline* para poder desatorar el mismo de los recortes provenientes del hueco.

Finalmente, se midieron los caudales de alimentación de las bombas centrifugas alimentadoras del desarenador, deslimador y limpiador de lodo durante las conexiones de tubería de perforación. El procedimiento fue el siguiente:

1. Una vez apagadas las 3 bombas de lodo, se apagan las bombas de las centrifugas.
2. Se cierran las válvulas que unen a los tanques.
3. Se mide el nivel inicial del tanque respectivo usando una regla de metal de campo y una cinta métrica.
4. Se enciende la bomba del tanque respectivo y se apaga luego de 30 o 60 seg.
5. Se mide nuevamente el nivel final en el tanque con los equipos mencionados.
6. Se abren las válvulas de equalización entre los tanques.
7. Se encienden nuevamente las bombas centrifugas.

Los resultados fueron los siguientes:

Desarenador

N° de Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad de Lodo (ppg)	8.6	8.9	9	9	9	9	9	9
Viscosidad (seg/qt)	35	37	36	36	36	36	36	36
Nivel Inicial (in)	31.75	41.34	31.50	31.10	36.22	31.10	36.22	31.50
Nivel Final (in)	25.5	35.83	25.20	25.79	31.10	24.02	31.50	25.20
Δ Tiempo (min)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Caudal (gpm)	734	647	740	624	601	832	555	740

CUADRO N° 3.6. Medición del Caudal de Procesamiento de la Bomba Centrifuga del Desarenador

También se hicieron pruebas durante la perforación. Estas pruebas consistían de 2 tipos, una donde la bomba centrifuga del desarenador estaba apagada y otra encendida. Esto se realizo con la finalidad de tener una medida indirecta del caudal de la bomba centrifuga del desarenador. El procedimiento fue:

1. Cerrar la válvula que conecta los tanques del desarenador y deslimador.
2. Se introduce al tanque del desarenador la regla de metal y al momento de sacarlo empezar a contar el tiempo.
3. Se mide el nivel inicial del tanque del desarenador usando dicha regla y una cinta métrica.

4. Luego de un tiempo dado, introducir nuevamente la regla de metal al tanque y sacarlo de forma casi inmediata.
5. Se mide el nivel final tanque nuevamente.
6. Se abre la válvula cerrada anteriormente.

	Nivel Inicial (in)	Nivel Final (in)	Tiempo (min)	Caudal (gpm)	Q avg (gpm)	Significado
B.C. off	30.51	36.22	0.5	670.46	705.14	= q (B1+B2+B3)
	32.28	38.58	0.5	739.82		
B.C. on	34.84	37.40	1	150.28	161.83	= q (B1+B2+B3) - q (B.C)
	39.37	42.32	1	173.39		
705.14 - 161.83 =					543.30	= q (B.C)

CUADRO N° 3.7. Medición Indirecta del Caudal de procesamiento de la Bomba Centrífuga del Desarenador

B.C. off = Bomba Centrífuga apagada.

$q (B1+B2+B3)$ = Caudal Bombas 1, 2 y 3.

B.C. on = Bomba Centrífuga encendida.

$q (B.C)$ = Caudal Bomba Centrífuga.

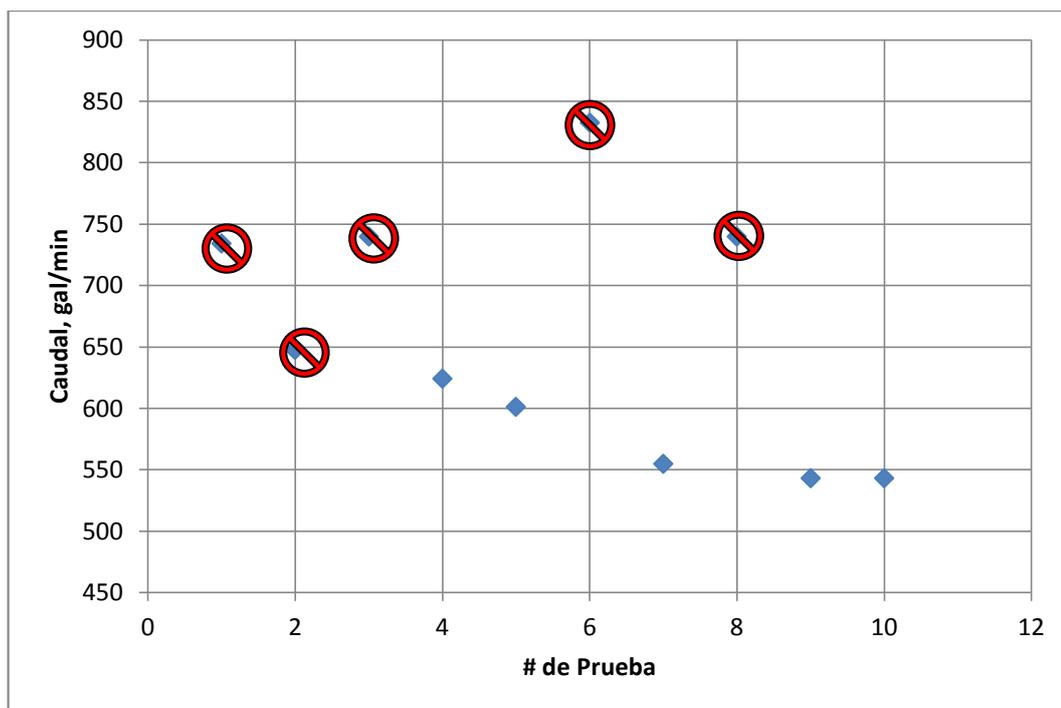


Figura 3 - 4. Caudales de las pruebas a la Bomba Centrífuga del Desarenador

Dada la Grafica, se consideraron los caudales de 624, 601, 555 y 543 gpm los más representativos dado que no se desvían mucho. Se obtuvo un valor promedio de **581 gpm** para un peso de lodo de 9 pgg y viscosidad embudo de 36 seg/qt.

Deslimador

N° de Prueba	1	2	3	4	5
Densidad de Lodo (ppg)	9	9	9	9	9
Viscosidad (seg/qt)	36	36	36	36	36
Nivel Inicial (in)	42	39	39	38	41
Nivel Final (in)	39	36	34	34	38
Δ Tiempo (min)	1	1	1	1	1
Caudal (gpm)	377	453	575	511	447

CUADRO N° 3.8. Medición del Caudal de Procesamiento del Deslimador

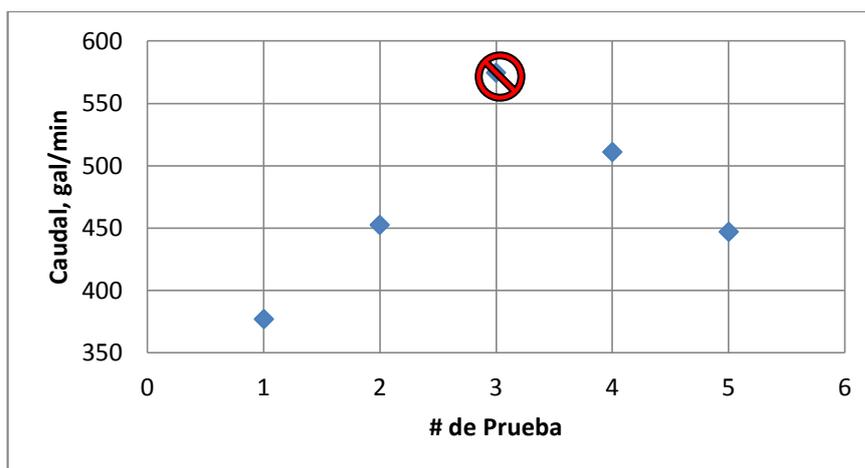


Figura 3 - 5. Caudales de las pruebas a la Bomba Centrífuga del Deslimador

Dada la Grafica, se consideraron los caudales de 377, 453, 511 y 447 gpm los más representativos dado que no se desvían mucho. Se obtuvo un valor promedio de **447 gpm** para un peso de lodo de 9 ppg y viscosidad embudo de 36 seg/qt.

Limpiador de Lodo

N° de Prueba	1	2	3	4
Densidad de Lodo (ppg)	9	9	9	9
Viscosidad (seg/qt)	36	44	44	44
Nivel Inicial (in)	41	38	39	40.5
Nivel Final (in)	37.5	33	36	37.5
Δ Tiempo (min)	0.5	0.5	0.5	0.5
Caudal (gpm)	602	860	516	516

CUADRO N° 3.9. Medición del Caudal de Procesamiento del Limpiador de Lodo

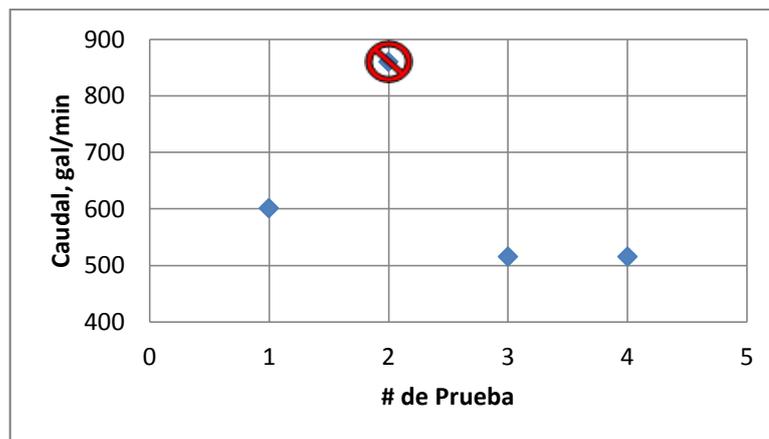


Figura 3 - 6. Caudales de las pruebas a la Bomba Centrifuga del Limpiador de Lodo

Dada la Grafica, se consideraron los caudales de 602 y 516 gpm los más representativos, dado que no se desvían mucho. Se obtuvo un valor promedio de **545 gpm** para un peso de lodo de 9 pgg y viscosidad embudo de 44 seg/qt.

- **Informe de Equipos de Control de Sólidos GMP-10.**

Se hizo la Inspección de los Equipos de Control de Sólidos por parte de un Supervisor del área respectiva de la Compañía National Oil Well Varco (NOV) en el Pozo 12205. Se obtuvieron las conclusiones siguientes:

1. Los Equipos de control de Sólidos en el GMP-10 están muy bien configurados y en el lugar que deben ir para obtener una limpieza secuencial por tamaño de grano.
2. Las dimensiones de los tanques de lodos son muy bajas en comparación con el taladro de perforación y su capacidad muy limitada siendo el primer problema para el mal desempeño de los equipos de control de sólidos que tienen hidrociclones. La capacidad de los tanques para mayor volumen es muy importante para la alimentación al ingreso de los hidrociclones ya que necesitan buena presión de cabeza hidrostática.
3. Los tanques no cumplen su función secuencial ya que por poco volumen de circuito algunos están intercomunicados entre sí para mantener volumen lo que impide el buen desarrollo de los equipos de control de sólidos al tomar sólidos de diferente tamaño de grano lo que muchas veces origina taponamiento de los hidrociclones del desarenador, deslimador y del limpiador de lodo. Cada equipo está diseñado para descartar un determinado tamaño de partículas.

4. Las presiones de cabeza de alimentación a los hidrociclones son 3.74, 7 y 7.4 pies del desarenador, deslimador y limpiador de lodo, respectivamente son muy bajas para que el hidrociclón pueda trabajar adecuadamente. Siempre para cualquier peso de lodo se deberá tratar de mantener 75 pies de cabeza que se obtiene de acuerdo a la buena selección de bomba de alimentación, seleccionar HP, RPM, Impeler de Bomba.
5. Las descargas de los hidrociclones de todos los equipos de control de sólidos son muy deficientes.
6. De acuerdo a las características de las bombas 5x6x14 con impeler de 8.5" no son suficientes para alcanzar la presión de cabeza adecuada lo que origina conos atorados o con descargas muy bajas.
7. La eficiencia mecánica de las zarandas Derrick de movimiento lineal fue de 94.85% y con una fuerza G de 6.64 para las dos zarandas.
8. La eficiencia mecánica de la zaranda del Limpiador de Lodo de movimiento circular fue de 86.7% y con una fuerza G de 4.25.
9. El *flow line* no tiene la pendiente necesaria para que el flujo del fluido con los sólidos perforados tengan bien ingreso a las zarandas vibratorias.
10. Las eficiencias de los hidrociclones de los equipos de control de sólidos son muy bajas, solamente se tomaron pesos comparativos donde se debía cumplir la formula empírica de 4 veces el peso del lodo del sistema.
11. No se pudo calcular las eficiencias matemáticas ya que la variable tiempo de llenado en 1/4 de Galón en ningún cono de los hidrociclones aplico ya que los conos tenían taponamiento o mala descarga todos estaban en rango mayor a 10 sec/qt.

Por otro lado, se hizo las recomendaciones siguientes:

1. Para poder manejar caudales hasta 1100 GPM, se debería cambiar el sistema de Tanques de Lodos ya que los que tienen al momento son muy pequeños y de muy poca capacidad en Volumen y altura.
2. De acuerdo a la visita de inspección es muy importante por experiencias pasadas en otras locaciones que por las características que tiene las bombas de todos los equipos de control de sólidos en el GMP-10 cambiar el Impeler de 8.5 a 10.5 para tener una mejor Presión de cabeza hidrostática.

3. Utilizar la zaranda del Limpiador de Lodo que está en perfectas condiciones de uso, ya que se pierde mucho solido húmedo a la salida de los hidrociclones del Limpiador de Lodo llenando de líquidos la fosa de recortes.
4. Se debería colocar un tornillo sin fin transportador de recortes donde vayan todas las descargas de todos los equipos de control de sólidos, que vaya dirigido a la poza de sólidos para no impactar la locación con recortes de perforación.
5. Se recomienda colocar un Possum Belly a la entrada de las zarandas de 1.2 metros de altura, 0.3 metros de ancho y 3.2 metros de largo para que las zarandas Derrick tengan caudales iguales de trabajo, ganar pendiente en el flow line y evitar perder caudal durante la perforación si una línea de entrada se tapa por sólidos.

- **Salidas del Almacén de Partes de las Bombas de Lodo en el 2012.**

Se consideraran solamente los reportes habidos en el año 2012, pues son más representativos. Además, en dicho año se utilizaron, en 3 pozos, el servicio de centrifuga decantadora.

POZO	PROFUNDIDAD, ft	CONFIGURACION	COSTO REPUESTOS, US\$
12274	8450	12 1/4" x 8 1/2"	8154.39
12259	8532	12 1/4" x 8 1/2"	6747.32
12233	8882	12 1/4" x 8 1/2"	3163.37
12238	8473	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	12682.68
12224	8246	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	6573.77
12205	8963	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	11319.35
12054	4848	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	6250.4
12257	8208	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	7420.1
12271	9074	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	8820.57
12278	9250	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	5357.77

CUADRO N° 3.10. Costos de los Repuestos de las Bombas de Lodo del año 2012.

- **Reporte Diario de Lodo de Pozos Perforados en los años 2011 y 2012.**

Se utilizaron los Reportes Diarios de Lodo de cada Pozo, para poder graficar el Porcentaje de Sólidos versus el Peso del Lodo. Los resultados se muestran en el Anexo N°1. El porcentaje de Sólidos era obtenido del promedio de las 3 mediciones realizadas diariamente por el Método de la Retorta. De forma análoga, fueron obtenidos los pesos del lodo.

- **Reporte Diario de Velocidad de Penetración de Pozos Perforados en los años 2011 y 2012.**

Se hizo uso de los Reportes Diarios obtenidos del Chart de Perforación y se comparó el Porcentaje de Sólidos versus el ROP Neto. Las gráficas obtenidas se muestran en el Anexo N°2. El porcentaje de sólidos fue hallado como se menciona anteriormente; sin embargo, el ROP Neto fue hallado a partir de los Chart de Perforación.

- **Recomendación Final.**

Dadas las condiciones de los Equipos mencionados anteriormente, se hará la adquisición de Nuevos Equipos y/o Partes, y el préstamo interno temporal de otro, para Mejorar la Distribución y Desempeño del Sistema de Control de Sólidos del Equipo GMP-10.

Possum Belly.-

- Descripción: Es un tanque metálico en la entrada de las Zarandas Vibratorias que recibe el flujo de lodo y es directamente conectado al extremo final del Flow Line. Su propósito es disminuir el flujo del lodo de modo que no ingrese de forma brusca a las zarandas, sino por reboce. Puede ser fabricado en el patio de perforación.
- Justificación: La instalación de este equipo nos permitirá:
 1. Disminuir la altura del extremo final del Flow Line (su pendiente) para tener una mejor caída y con ello evitar el atascamiento interno por acumulación de sólidos.
 2. Evitar el uso de la Bomba 1, que suele utilizarse para desatorar el Flow Line cuando está atascado. Lo cual conlleva a un ahorro de combustible (diesel).
 3. Evitar la aglomeración de sólidos a la entrada de las zarandas que tiene que ser retirada con palas por el personal de la cuadrilla.

Mallas Corrugadas.-

- Descripción: Es una nueva tecnología en mallas que poseen una forma piramidal en lugar de la forma plana que normalmente se utiliza.
- Justificación: La instalación de estas mallas nos permitirá:
 1. Tener mayor capacidad de flujo debido a que tienen mayor área superficial debido a su forma piramidal.
 2. Tener unos recortes más secos; es decir, menor pérdida de fase líquida en la descarga de la zaranda porque los sólidos se acumulan en los valles, permitiendo una mejor conductividad de líquido en la parte superior.
 3. Poder aumentar el número de malla API, sin tener pérdida de lodo, lo cual mejorara las eficiencias de los equipos posteriores.

Desarenador.-

- Descripción: Hidrociclones de Poliuretano Termoplástico Marca Derrick de 12" de Diámetro, del Equipo PR-2.
- Justificación: Este equipo nos proporcionara las siguientes ventajas en comparación con las usadas actualmente:
 1. Mejor eficiencia de eliminación de sólidos de tamaño de arena, pues tiene una entrada que permite un régimen laminar en el interior del cono, logrando que los sólidos se acomoden en las paredes y puedan ser descargados.
 2. Menores problemas operativos, pues no utilizan un caucho interior el cual al estar en contacto con lodo a temperaturas cada vez mayores (a medida que avanza la perforación), son menos resistentes a la abrasión y se rajan o rompen, generando taponamientos.
 3. Mejores resultados esperados debido a las buenas referencias obtenidas con este equipo (Pozo de desechos - Situche 4X - Talisman).

Motor Eléctrico.-

- Descripción: De 50 HP de Potencia, para el Deslimador, pues posee un motor de 30 HP, el cual no es suficiente para poder manejar un caudal adecuado.
- Justificación: La adquisición del motor eléctrico permitirá:

1. Poder obtener una presión de cabeza hidrostática adecuada para una buena eficiencia de separación de sólidos (limos).
2. Conseguir un caudal de procesamiento aceptable, pues el actual es muy deficiente. Además, la remoción de sólidos en este equipo es fundamental pues la mayoría de formaciones perforadas son rocas sedimentarias compuestas en su mayoría de arcillas.

Impulsor.-

- Descripción: De 10.5" de diámetro para el Desarenador, Deslimador y Limpiador de Lodo.
- Justificación: La instalación de esta parte de la bomba centrífuga nos servirá para:
 1. Obtener la presión de cabeza hidrostática adecuada para una eficiente remoción de sólidos.
 2. Mejorar el caudal de procesamiento, de modo que todo el lodo que llega a superficie sea procesado por los equipos de control de sólidos.

Centrifuga Decantadora.-

- Descripción: Equipo capaz de separar sólidos de la fase líquida, que no han sido removidos ni por las zarandas ni los Hidrociclones.
- Justificación: La utilización de este equipo nos permitirá:
 1. Eliminar sólidos de tamaños muy finos o coloidales.
 2. Recuperar el material densificante en lodos densificados.

En resumen:

EQUIPO	DESCRIPCIÓN	CANT.	TIPO/MARCA
*Possum Belly	Para 2 Zarandas	1	Trapezoidal
*Mallas	Mallas Corrugadas	3	API 140
	Mallas Corrugadas	3	API 170
	Mallas Corrugadas	3	API 200
**Desarenador	12" de Diámetro de la PR-2	2	Derrick
*Bomba Centrífuga	5" x 6" x 14" de 50 HP	1	MISSION

EQUIPO	DESCRIPCIÓN	CANT.	TIPO/MARCA
*Impulsor	De 10.5" de Diámetro	2	MISSION
***Centrifuga Decantadora	Para Control de Sólidos	1	Eléctrico

CUADRO N° 3.11. Recomendación de Equipos.

*	Equipo o parte que requiere de compra
**	Equipo que requiere de préstamo interno temporal
***	Equipo que será utilizado por medio de la prestación de servicios

Finalmente, se hizo una estimación tanto de los costos de inversión para la implementación de la mejora como el tiempo de retorno (por pozo perforado) posterior a la ejecución del mismo, en función al ahorro obtenido en costos de química de lodo y costos de tarifa operativa de perforación.

Por otro lado, los beneficios en costos de compra y/o mantenimiento de partes internas de bombas de lodo y la mejora de la productividad de las formaciones petrolíferas fueron observados mediante el seguimiento posterior a la implementación de la mejora.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL MODELO

En este capítulo se describirán las características más importantes de los equipos y los procedimientos que nos permitirán tener un mejor control de sólidos en las operaciones de perforación de pozos.

FLOW LINE - POSSUM BELLY.

El Possum Belly tendrá las dimensiones mostradas en el Anexo 3. Por otro lado, la implementación de éste, permitirá que el *Flowline* tenga una caída de 1 pie por 11.4 de circulación horizontal, la cual se encuentra sobre el mínimo recomendado.

ZARANDAS.

- Norma de Vibración: Posee un movimiento lineal.
- Dinámica de Vibración: Fuerza G máx. igual a 7.
- Tamaño de la cubierta y Configuración: 3 paneles de 46"x23", ángulo de -1 a +5 grados.
- Características de las mallas: pre-tensionadas, corrugadas, 120 - 200 API.
- Reología del Fluido: PV (14-24), YP (12-15), MW (8.6-14.7).
- Ritmo de carga de sólidos: 400-700 gpm.



Figura 4 - 1. Zaranda Vibratoria

DEGASIFICADOR.

- Tipo Atmosférico: Para lodos de bajo peso y viscosidad. Motor de 10 HP, 1750 RPM. Capacidad de flujo de 500 gpm. Procesa lodo hasta de 16 ppg.



Figura 4 - 2. Degasificador Atmosférico
DESARENADOR.

- Características de Diseño
 - Diámetro del Cono: 10 in.
 - Diámetro del Vértice: 1.375 in.
 - Parámetros de Flujo: 500 gpm por ciclón.
 - Cabeza de Alimentación: 75 ft.
 - Tamaño de las partículas: 40-100 μm .



Figura 4 - 3. Desarenador de Poliuretano Termoplástico
DESLIMADOR Y LIMPIADOR DE LODO.

- Características de Diseño
 - Diámetro del Cono: 4 in.
 - Diámetro del Vértice: 0.75 in.
 - Parámetros de Flujo: 80 gpm por ciclón.
 - Cabeza de Alimentación: 75 ft.

- Tamaño de las partículas: 12-74 μm .



Figura 4 - 4. Deslimador y Limpiador de Lodo

Adicionalmente, solo el Limpiador de Lodo posee una zaranda en su descarga que tiene una Fuerza G del motor de 4.6, de movimiento circular. Los últimos 3 equipos mencionados poseen un parámetro ajustable, el cual es el diámetro del vértice que puede ser ajustado para obtener descarga tipo *spray*.

BOMBA CENTRIFUGA.

Para que los hidrociclones puedan tener un buen desempeño, las bombas centrifugas deben entregar energía cinética al fluido de perforación a la entrada de éstas. A continuación se especifican las características de la bomba centrifuga:

Bomba centrífuga 5" x 6" r 1780 tipo "w" con impulsor de 10-1/2" (nominal). Dicha bomba será alimentada por un motor eléctrico de 50 HP (1750 RPM).

CENTRIFUGA DECANTADORA.

Es el equipo de control de solidos más importante, junto a las zarandas, puesto que puede eliminar solidos de tamaño de arena, limo y arcilla hasta 1 micra de tamaño.

- **Bowl**
 - Internal Bowl Diameter: 18 in
 - Bowl Length: 50 in
 - Effective Pond Depth: 2.5 in
 - Port Inside Diameter: 1.25 in

- Clarifyin Length: 23 in
- Total Solids Discharge Area: 79 in²
- Beach Angle – Degrees: 5°
- Number of Ports: 5
- Feed Type: abierto
- **Bowl Speed**
 - Maximum Rated: 3200 rpm
 - Typical High Speed: 2700 rpm
 - Typical Low Speed: 1000 rpm
- **Rated Capacity**
 - Unweighted Drilling Mud: 264 gpm
 - Water: 343 gpm
 - Solids Capacity: 6.3 tons/hr
- **G-Force**
 - At Maximum Rated Speed: 2617
 - At High Speed: 1863
 - At Low Speed: 256
- **Drive**
 - Main: VFD
 - Gearbox / Backdrive: gearbox
 - Ratio: 80:1
 - Torque Rating: 28,800 in-lb
 - Overload Protection: shear pin
- **Conveyor**
 - Pitch: 6.5 in
 - Lead Type: double
 - Electrical
 - Main Drive: 60 hp
 - Back Drive (optional): 20 hp
- **Electrical**
 - Volts: 460/380

- Hertz: 60/50
- Phase: 3
- **Dimensions**
 - Length: 132 in
 - Width: 59.8 in
 - Height: 47.9 in
 - Weight: 6,600 lb



Figura 4 - 5. Centrifuga Decantadora

Equipo de Control de Sólidos	Antes	Mejorado
Flow Line	Caída: 1' vert. x 20' horiz.	Caída: 1' vert. x 11.4' horiz.
Possum Belly	No tenia	Trapezoidal, entrada de 10"
Zarandas	Mov. Lineal, Fuerza G =7, 3 paneles 46"x23"	
Mallas	Convencional, 80-140 API	Corrugadas, 140-200 API
Degasificador	Atmosférico, motor de 10 HP, 500 gpm	
Desarenador / Impeler x HP	Convencional / 8.5" x 50	Poliuretano / 10.5" x 50
Deslimador / Impeler x HP	Convencional / 8.5" x 30	Convencional / 10.5" x 50
Limp. De Lodo / Impeler x HP	Convencional / 8.5" x 50	Convencional / 10.5" x 50
Centrifuga	No tenia	18"x50", 60-80 gpm, 60 HP

CUADRO N° 4.1. Comparación de los ECS Antes y Después.

ALCANCES OPERATIVOS.

- Zarandas
 1. Utilizar la malla más pequeña de modo que no se bote el lodo, sobre todo desde el inicio.
 2. Colocar una caja recolectora de volumen conocido, para contabilizar los sólidos generados.
 3. Durante los viajes, apagar las zarandas y limpiarlas.
 4. Mantenerlas encendidas, durante las circulaciones.
 5. Hacer los cambios de malla, lo más rápido posible.
- Degasificador
 1. Utilizarlo cuando se perforan zonas que contengan hidrocarburos gaseosos.
- Hidrociclones
 1. Durante las conexiones, remover los sólidos asentados en los tanques del lodo (Baffle).
 2. Revisar los conos regularmente, para ver si el vértice no está taponado.
 3. Asegurarse que la entrada del hidrociclón tenga la cabeza de alimentación adecuada.
 4. Procesar por lo menos una vez todo el volumen del tanque, durante viajes.
 5. Si se tiene en la zarandas una malla menor a 140 Api, debe usarse el desarenador necesariamente.
 6. Tener encendido el motor del Limpiador de Lodo mientras esté siendo utilizado.
- Centrifuga Decantadora
 1. Antes de encenderlo, rotar el Bowl con la mano para asegurar que rota libremente.
 2. Encenderla primero, y luego la bomba de alimentación o de agua de dilución.
 3. Establecer los caudales de lodo o dilución de acuerdo a las recomendaciones especificadas, que usualmente varían de acuerdo al peso de lodo.

- Mantenimiento Preventivo.
 1. Programar paradas para los equipos de control de sólidos, para su inspección y mantenimiento respectivos. No esperar a que algún equipo o parte de éste, falle.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Evaluación Técnica.-

- Aumento del ROP Neto.

Para poder estimar en cuanto se mejorara el ROP Neto, y consecuentemente el tiempo total perforando por pozo, se hizo lo siguiente:

1. Se graficó la relación de Porcentaje de Sólidos con Profundidad de todos los pozos perforados, tanto los del año 2011 como los del 2012, hasta el pozo 12205. Luego, se ajustaron los puntos a una curva cuadrática (color rojo), la cual es buena pues el radio de curvatura es mayor que 0.5. Se generaron los gráficos mostrados en el Anexo 4.
2. Se generó otra curva cuadrática (color verde) a partir de los siguientes valores, los cuales son propuestos luego de la implementación de los equipos recomendados.

% Sólidos	Profundidad (ft)
2.00 %	800.0
6.00 %	3000.0
8.20 %	4000.0
14.10 %	7000.0
20.00 %	10000.0

3. Luego, en un gráfico semi-logaritmico se graficaron el Porcentaje de Sólidos contra el ROP Neto de todos los Pozos del 2011 y del 2012, para cada sección perforada (véase Anexo 3). Posteriormente, se ajustaron los puntos a una curva que mejor se ajuste para cada grafica semi-logaritmico.

Los datos de los pozos 2011, son por lo general muy dispersos; sin embargo, los datos de los pozos del 2012, a excepción de los datos del hueco de 12 1/4", mantienen una buena tendencia, en especial, los datos del hueco de 8 1/2". Por tal motivo, se hizo una correlación que relaciona al ROP neto en función del Porcentaje de Sólidos y la Profundidad.

Para ello, se graficó el Logaritmo del ROP Neto contra el Porcentaje de Sólidos (S) y también el Logaritmo del ROP Neto contra la profundidad (D), para cada pozo. Luego, se combinaron ambas ecuaciones de la forma siguiente:

$$\text{LOG}(ROP_{\text{neto}}) = a * S + b \quad \langle \rangle \quad ROP_{\text{neto}} = 10^{a*S+b}$$

$$\text{LOG}(ROP_{\text{neto}}) = m * D + n \quad \langle \rangle \quad ROP_{\text{neto}} = 10^{m*D+n}$$

$$ROP_{\text{neto}}^2 = 10^{(a*S+b)} * 10^{(m*D+n)}$$

$$ROP_{\text{neto}} = 10^{\frac{(a*S+m*D+b+n)}{2}}$$

Naturalmente, se obtuvieron valores de a, b, m y n distintos para cada pozo y se promediaron dichos valores. Adicionalmente, se hizo un ajuste por ensayo y error con la finalidad de conseguir el menor valor de Porcentaje de Error. Se obtuvieron los valores siguientes:

$$a = -6.341565 ; b = 2.554855 ; m = -0.0001044539 ; n = 2.3052467001$$

Una vez establecidas las relaciones entre ROP Neto con Porcentaje de Sólidos y Profundidad, así como la relación entre Porcentaje de Sólidos y Profundidad, se definieron dos tipos de pozos que son representativos en las secciones de hueco y profundidades, tanto para el año 2011 y 2012, presentados a continuación:

POZOS 2011					
Pozo A			Pozo B		
Diámetro de Hueco	Profundidad		Diámetro de Hueco	Profundidad	
17 1/2"	0'	310'	12 1/4"	0'	360'
12 1/4"	310'	7250'	8 1/2"	360'	7000'
8 1/2"	7250'	9600'	-	-	-

POZOS 2012					
Pozo A			Pozo B		
Diámetro de Hueco	Profundidad		Diámetro de Hueco	Profundidad	
16"	0'	250'	12 1/4"	0'	370'
12 1/4"	250'	3600'	8 1/2"	370'	8630'
8 1/2"	3600'	8560'	-	-	-

Luego, se generaron tablas para cada pozo, con los valores de Porcentaje de Sólidos y Profundidad actuales, y aquellos propuestos luego de la implementación de los equipos. Se tabularon los parámetros siguientes:

Hueco	Actual o Mejorado		ROP Neto	Tiempo Perforando
Diámetro	% Sólidos	Profundidad	ft/hr	hr

Se obtuvieron los datos mostrados detalladamente en el Anexo 5, y de forma breve a continuación:

Pozos 2011							
Pozo	TPT, días		TNP	TTB	TRC	DTM	TT
	Actual	Mejorado	días				
A	19.53	15.63	21.38	37.00	2.98	4.00	44.0
B	8.95	8.26	7.36	15.62	2.36	4.00	22.0

Pozos 2012							
Pozo	TPT, días		TNP	TTB	TRC	DTM	TT
	Actual	Mejorado	días				
A	7.25	6.28	11.71	17.99	2.62	4.00	25.00
B	6.64	5.63	9.02	14.65	2.15	4.00	21.00

Además, se definió la siguiente nomenclatura para los tiempos:

- **Tiempo Perforando Total (TPT):** Es aquel tiempo en el cual únicamente se rota la sarta de perforación para profundizar el hueco, es decir, para tener avance en profundidad. También, se podría decir que es el tiempo que es marcado por el Chart de Perforación. No considera las repasadas ni las conexiones.
- **Tiempo no Perforando (TNP):** Es el tiempo que tardan las operaciones que forman parte de la perforación normal de un pozo, con excepción del TPT, desde el inicio de la perforación del hueco auxiliar, hasta que se termina de sacar la sarta de perforación del hueco antes de correr registros. No incluye los tiempos no productivos.

Por ejemplo: circulaciones del fluido de perforación, viajes cortos (repasadas a las zonas de tensión, si fuera necesario), POOH (retirada de sarta del hueco), corrida del revestidor, cementación o registros eléctricos de los hueco primarios o intermedios, tiempo de fragüe del cemento, instalación y prueba de los equipos de control de pozo, RIH (corrida de sarta al hueco), surveys, etc.

- **Tiempo no Productivo (NPT):** Contiene el tiempo que genera sobrecostos. Por ejemplo: cuando hay pérdida de circulación, pega de tubería, mantenimiento del equipo, reparación de bombas, etc. Para cuestiones prácticas, se considera también en esta clasificación, al tiempo en el coreo.
- **Tiempo Total Bruto (TTB):** Es el tiempo transcurrido desde el inicio de la perforación del hueco auxiliar, hasta dejar el hueco sin sarta de perforación para bajar registros eléctricos.
- **Tiempo de Registro y Cementación (TRC):** Es el tiempo que duran las operaciones de registros y cementación de la última sección del pozo, desde que se empieza a bajar la herramienta registradora, hasta que termina el fragüe del cemento.
- **Desmontaje, Transporte y Montaje (DTM):** Es el tiempo que tarda el desarmado del equipo de perforación, su transporte y montaje a la locación siguiente. En general, dura 4 días.
- **Tiempo Total (TT):** Es el tiempo que transcurre desde la llegada del equipo a la locación hasta el desmontaje del mismo, luego de la perforación y completación del pozo.

En resumen, se tiene lo siguiente:

$$TTB = TPT + TNP - NPT$$

$$TT = TTB + TRC + DTM$$

La finalidad de la agrupación de los tiempos, fue para:

- Evaluar aquellos tiempos que son variables (TPT y NPT) y aquellos que cambian muy poco por lo general (TNP, TRC y DTM).
- Determinar el tiempo que dura la perforación de un pozo, desde el inicio hasta el final, para los cálculos del tiempo de retorno en el flujo de caja posterior.

- Menores volúmenes de fluido de perforación utilizados.

El volumen de fluido de perforación que se utilizara luego de la implementación de los equipos será menor que el volumen que actualmente se utiliza en aproximadamente el volumen de lodo que se diluye o bota en este último. Por tal motivo, se revisaron los reportes de lodos de todos los pozos del 2011 y 2012 para hallar los volúmenes de fluido de perforación diluidos o botados.

Pozos 2011	Profundidad, ft	Volumen de Lodo Total, bbl	Volumen de Lodo Diluido, bbl	% Volumen Diluido
12214	8364	1130	-	-
12809	7721	1122	210	18.72
12277	7053	1023	126	12.32
12252	4685	837	126	15.05
12200	9743	1394	462	33.14
12253	9442	1460	588	40.27

Pozos 2012	Profundidad, ft	Volumen de Lodo Total, bbl	Volumen de Lodo Diluido, bbl	% Volumen Diluido
12274	8450	1097	42	3.83
12259	8532	1030	-	-
12233	8882	1111	268	24.12
12238	8473	1059	470	44.38
12224	8246	1098	210	19.13
12205	8963	1158	42	3.63

- Vida operativa de las partes de las bombas de lodo prolongadas.

Esto puede verse reflejado en el costo que generan los repuestos de las partes internas de las bombas de lodos por cada pozo que se perforo con centrifuga decantadora (3 pozos) o sin ella (7 pozos). Para obtener costos representativos para cada pozo, se decidió utilizar el cociente del costo de repuestos con la profundidad de dicho pozo, pues el desgaste erosivo depende, entre otros, del tiempo de utilización de las bombas, el cual está relacionado con la profundidad.

Luego, se hallo un promedio de costos de repuestos por profundidad, para los pozos que utilizaron centrifuga (pozos sombreados) y para los que no también.

POZO	12274	12259	12233	12238	12224	12205	12054	12257	12271	12278
Costo / Profundidad , US\$/ft	0.965	0.791	0.356	1.497	0.797	1.263	1.289	0.904	0.972	0.579
PROMEDIO, US\$/ft	0.698			1.024						

Nótese que en los pozos sombreados de la tabla respectiva se tiene una tendencia decreciente en cuanto a costo/profundidad. Ello podría explicarse debido a que en dichos pozos se utilizó una centrífuga decantadora. Además, los equipos de control de sólidos estaban en condiciones deficientes para ese entonces, lo cual indica que se podría ahorrar incluso más, en relación a repuestos de partes internas de las bombas.

- Otros:

- ✓ **Menores Desechos de Perforación.-** Cuando culmina la perforación de un pozo, si no se tratara el fluido de perforación utilizado, este se convertirá en un desecho. Por lo tanto, se tendrán menores desechos si se utilizan menores volúmenes de fluido de perforación.

- ✓ **Ahorro en Combustible.-** El Equipo de Perforación GMP-10 requiere de aproximadamente 500 gal/día (S/. 11.52/gal) de Diesel para terminar de perforar la última sección de un pozo. Por ello, si el ROP neto aumenta, se culminara el pozo en menor tiempo, con consecuente ahorro del Diesel.

- ✓ **Disminución del Riesgo en Problemas Operativos en Perforación.-** Si se mantiene un bajo contenido de sólidos en el fluido de perforación, no habrá incremento del peso de lodo a causa de estos, lo cual disminuye el riesgo de generar una presión hidrostática mayor a la presión de fractura de la formación, lo cual trae como consecuencia pérdida de circulación.

Al tener el hueco con un fluido de perforación con bajo contenido sólidos será menos probable que se forme un revoque grueso y permeable lo que conllevará a menor arrastre durante los viajes, menor torque durante la perforación, y disminución del riesgo de pega de tubería por presión diferencial. También se evitarán altas presiones de suabeo o pistoneo, y con ello algún "kick".

Los sólidos en el lodo aumentan la viscosidad plástica del mismo, lo cual genera menor capacidad de acarreamiento de sólidos, disminuye la

efectividad del punto cedente para limpieza del hueco, disminuye la eficiencia de los equipos de control de sólidos y aumentan las pérdidas de presión por fricción en el sistema de circulación. Los riesgos de estos problemas serán reducidos.

- ✓ **Disminución del Riesgo en Problemas Operativos en Cementación.-** Se tendrá mejor limpieza del hueco para poder bajar el revestidor sin problemas. También se tendrá mejor acondicionado el lodo para que pueda ser desplazado por los fluidos lavadores/espaciadores, y así, evitar trabajos de cementación forzada.
- ✓ **Disminución del tiempo no productivo de la perforación (NPT).-** El NPT puede ser atribuido a fallas del equipo de perforación o herramientas, principalmente condiciones climáticas en áreas remotas, que impiden la llegada de suministros, o condiciones propias del pozo, que no han permitido desarrollar en forma normal operaciones de perforación, perfilaje o corrida de cañerías. Por ello, al disminuir el riesgo de los problemas mencionados anteriormente, se podrá reducir también el NPT.

Evaluación Económica.-

- **Inversión**

A lo largo del año 2012, se realizaron 3 viajes a Talara, 2 fueron exclusivamente para investigación y estudio de los Equipo de Control de Sólidos y Bombas de lodo, y el ultimo fue para una presentación del Proyecto al área de Perforación, en el que también se aprovecho para poder afinar algunos detalles sobre el Flowline y estimar las dimensiones del Possum Belly.

En los viajes mencionados, hubo gastos como servicios de movilidad, boletos de avión, y estadía. También, se han hecho gastos en los 3 análisis de Difracción de Rayos X a muestras de Lodo. Por último, se ha recibió una remuneración mensual desde Enero hasta Diciembre.

Por otro lado, existe un gasto para cada pozo que se perfore luego de la implementación de los equipos, el cual es un estimado del servicio de centrifuga decantadora.

Por parte de Perforación, se proporcionaron los equipos necesarios para la correcta entrada y distribución del fluido de perforación desde el pozo hacia las zarandas, así como también las mallas de forma piramidal y las partes de las bombas centrífugas para alimentar a los hidrociclones con mejores parámetros de flujo.

Adicionalmente, se gestiono el préstamo interno de los Desarenadores de otro equipo de perforación, lo cual no generó costo alguno. En el cuadro siguiente se muestra un resumen de las inversiones y gasto mencionados:

INVERSION INICIAL			
Ítem	Cantidad, US\$	Costo Unitario, US\$	Costo Total, US\$
Análisis de Difracción de Rayos X	3	378	1,134
Viajes ida y vuelta	3	194	582
Taxi Vive	6	20	120
Taxi Balcones	6	58	348
Estadía	3	100	300
Remuneración	12	308	3,692

Bomba Centrífuga Completa	1	5,382	5,382
Impeler	2	465	930
Mallas Corrugadas 200 API	3	521	1,564
Mallas Corrugadas 170 API	3	502	1,506
Mallas Corrugadas 140 API	3	439	1,318
Possum Belly	1	1,000	1,000
TOTAL, US\$			17,876

GASTOS			
Ítem	Cantidad, US\$	Costo Unitario, US\$	Costo Total, US\$
Servicios de Centrífuga Decantadora	1	*5,250	5,250
TOTAL, US\$			5,250

*Dicho costo es promedio pues algunos pozos requerirán menos días de uso de la centrífuga y otros mas, dependiendo de la profundidad de los mismos.

- **Retribución**

Ahorro en Tarifa Operativa de Perforación.

Debido a que se tienen 2 tipos de pozos representativos para cada año, tanto para el 2011 como para el 2012, se realizaran los cálculos para cada uno de ellos. Además, se sabe que el costo diario del Equipo de Perforación GMP-10 es de 12,500 US\$, entonces se tiene lo siguiente:

Pozo	2011		2012	
	Reducción del Tiempo Perforando, hr	Ahorro, US\$	Reducción del Tiempo Perforando, hr	Ahorro, US\$
A	93.8	48,864.8	23.2	12,069.4
B	16.7	8,708.0	24.3	12,646.0

Ahorro en Costos de Aditivos del Lodo.

Se utilizaron los datos del reporte de lodos de todos los pozos del 2011 y 2012, y estos fueron agrupados con aquellos pozos representativos que tienen similitud en configuración; es decir, cantidad, profundidad y diámetro de las secciones perforadas. Se procedió de la manera siguiente:

1. Se reportaron las veces que se boto el lodo de los tanques de la trampa de arena, del desarenador y cuantas veces se hizo, diariamente.
2. Se hallaron los volúmenes diarios de lodo botados, a partir de los volúmenes de los tanques de la trampa de arena y desarenador.
3. Se calculo el costo del fluido de perforación en US\$/bbl, a partir del costo acumulado en aditivos y de los volúmenes acumulados de lodo para cada día.
4. Se hallo el valor en US\$ del lodo botado para cada día, de acuerdo a su costo respectivo.
5. Se calculo el porcentaje que representa el valor del total de lodo botado para cada pozo, con respecto al valor total de Aditivos en US\$ del mismo.

Se obtuvo lo siguiente:

Pozo A - 2011				
Pozo	Profundidad, ft	Aditivos, US\$	Dilución, US\$	% Dilución
12253	9,442	77,147	24,892	32.27
12200	9,743	67,199	15,867	23.61
TOTAL	19,185	144,346	40,759	27.9
Costo del lodo por pie perforado, US\$/ft			7.52	

Pozo B - 2011				
Pozo	Profundidad, ft	Aditivos, US\$	Dilución, US\$	% Dilución
*12214	8,364	58,238	-	-
12277	7,053	37,281	3,922	10.52
12809	7,721	41,795	5,527	13.22
TOTAL	23,138	137,314	-	11.9
Costo del lodo por pie perforado, US\$/ft			5.93	

OBSERVACIÓN: El Pozo 12252 también fue perforado en el año 2011 y tuvo una profundidad de 4685 ft, por ello, se descarto del análisis por no ajustarse a las características ni del pozo A ni del B.

Pozo A - 2012				
Pozo	Profundidad, ft	Aditivos, US\$	Dilución, US\$	% Dilución
12238	8,473	57,680	17,144.5	29.72
12224	8,246	58,649	9,059.9	15.45
*12205	8,963	65,451	-	-
TOTAL	25,682	181,780	-	22.6
Costo del lodo por pie perforado, US\$/ft			7.08	

Pozo B - 2012				
Pozo	Profundidad, ft	Aditivos, US\$	Dilución, US\$	% Dilución
*12259	8,532	58,119	-	-
12233	8,882	59,717	12,878.4	21.57
TOTAL	17,414	117,836	-	21.6
Costo del lodo por pie perforado, US\$/ft			6.77	

* No se reportaron las veces que se boto la trampa de arena.

OBSERVACIÓN: El pozo 12274 fue perforado también en el año 2012, pero fue omitido del análisis puesto que la compañía del servicio de fluido de perforación era distinta de aquella que trabajo con los demás pozos del mismo año.

Entonces, para cada configuración de cada año, se tendrán los siguientes resultados:

Pozo	2011		2012	
	Aditivos, US\$	Dilución, US\$	Aditivos, US\$	Dilución, US\$
A	72,230	20,181	60,589	13,684
B	41,545	4,931	58,395	12,596

Por lo tanto, luego de la implementación de los equipos, se tendrá un ahorro equivalente al valor de dilución en el cuadro anterior.

Ahorro en repuestos de las partes internas de la bomba de lodos

Para poder cuantificar el ahorro habido por repuestos en las partes internas de la bomba de lodos, se tomo como referencia los reportes de consumo del almacén de perforación para los pozos perforados en el año 2012. Como se mostró anteriormente, se obtuvieron valores de costo en repuestos por pie perforado, en US\$/ft. Por tal razón, se obtuvo un promedio para los pozos que se perforaron con centrifuga decantadora (CCD) y para aquellos que no (SCD). Se obtuvo lo siguiente:

	CCD	SCD
Costo de Repuestos por Pie Perforado, US\$/ft	0.698	1.024

Por lo tanto, se estimarían los siguientes costos en repuestos solo para pozos del 2012, debido a que son datos más recientes:

Pozo	Con Centrifuga Decantadora	Sin Centrifuga Decantadora	Diferencia
A	5,978.9 US\$	8,764.4 US\$	2,785.6 US\$
B	6,027.7 US\$	8,836.1 US\$	2,808.3 US\$

Finalmente, se tendría un ahorro equivalente a la diferencia habida entre pozos con centrifuga y sin ella, tal como es mostrado en el cuadro anterior.

Otros

Combustible: Sera equivalente al ahorro en ROP Neto, en días, multiplicado por el Consumo diario (500 gal/día aprox), en galones, y por el Costo del Diesel por Galón (S/. 11.52.).

Servicio de Motor de Fondo y Fluido de Perforación: Si se llegara a aumentar el ROP Neto, de modo que se reduzca en exactamente un día o más la perforación de un pozo, habría que agregar también el ahorro obtenido por los servicios de ingeniería o equipos de las contratistas de direccional (8500 US\$/día) y fluido de perforación (450 US\$/día). Dicho ahorro es equivalente a 89450 US\$/día.

En perforación, al disminuir el riesgo de pérdida de circulación o pega de tubería por presión diferencial se hace menos probable el uso de materiales para perdida de circulación o para liberar tubería atascada (como el pipe lax, por ejemplo), respectivamente; mientras que en cementación se evitarían trabajos de remediación.

Por último, al disminuir los riesgos de problemas operativos tanto en perforación como en cementación, se obtendrá un menor tiempo no productivo (NPT).

- **Flujo de Caja**

La evaluación del flujo de caja se realizara utilizando los parámetros siguientes:

Exploración y Producción	
Parámetro	Descripción
Ahorro en Aditivos (AA)	Valor monetario del lodo que solía botarse por no tener un buen control de sólidos.
Ahorro ROP Neto (AROPN)	Valor monetario de la reducción del tiempo de la tarifa operativa en perforación.
Ahorro Combustible (AC)	Valor monetario del combustible que no es utilizado por haber reducido el tiempo de perforación.
Motor de Fondo y Servicio de Lodos (MFSL)	Valor monetario del costo diario de estos servicios
Servicio Centrifuga Decantadora (SCD)	Costo por el servicio de un centrifuga decantadora por pozo. Puede variar de acuerdo a la profundidad del pozo.
Inversión	Dinero invertido por el área.
Ahorro en Repuestos (AR)	Diferencia de los valores monetarios de repuestos sin y con buen control de sólidos
Inversión	Dinero invertido por GMP.

Además, se utilizaran los siguientes indicadores:

Indicador o Parámetro	Descripción
Ingresos	Es el ahorro total obtenido para un pozo en una fecha dada.
Inversión	Valor monetario del dinero invertido por el área.
Flujo de Efectivo	Cantidad de dinero equivalente a los ingresos menos gastos o inversión
Flujo de Efectivo Actualizado	Es el flujo de efectivo corregido con la tasa de descuento a la fecha donde se hizo la inversión
Flujo de Efectivo Acumulado	Es la suma de los flujos de efectivos actualizados a una fecha determinada.
Tasa de Descuento	Aquella tasa que se utiliza para determinar el valor actual de los flujos futuros.
Valor Actual Neto	Mide la rentabilidad del proyecto en valores monetarios que exceden a la rentabilidad deseada después de recuperar toda la inversión

Tiempo de Retorno	Mide en cuánto tiempo se recupera la inversión o en cuanto tiempo se recupera la inversión más el costo de capital involucrado.
-------------------	---

Debido a que se tienen 2 tipos de pozos representativos para cada año, tanto para el 2011 como para el 2012, se realizarán los cálculos en base al tipo de pozo que sea similar y representativo a los pozos que se perforaran en el año 2013, los cuales se presentan a continuación junto a los parámetros de evaluación respectivos:

N°	Pozo	Lote	Profundidad	Configuración	Similar al:	**Días
1	12268	I	8500	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2012	21
2	*12806	V	8050	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2012	20
3	12294	I	8500	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	Pozo A 2012	25
4	12269	I	8500	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	Pozo A 2012	25
5	45	I	5000	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2011	18
6	*V1	XXV	5500	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2011	19
7	*V2	XXV	6500	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2011	21
8	63	I	8000	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2012	20
9	80	I	8500	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	Pozo A 2012	25
10	38X	I	6500	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2011	21
11	20	I	8500	16" x 12 1/4" x 8 1/2"	Pozo A 2012	25
12	*X	V	7000	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2011	22
13	41	I	5000	12 1/4" x 8 1/2"	Pozo B 2011	18

* Pozos en los que se asume una columna litostática igual a los pozos de los cuales se les considera similares, pues no existen datos recientes (Lote V) o no se han perforado antes en dicha zona (Lote XXV).

** El número de Días incluye el tiempo de Desmontaje, Transporte y Montaje (DTM) del Equipo de perforación a la locación, y el tiempo en que se realiza la perforación y completación del pozo.

Nótese además, que los pozos *V1 y *V2, son pozos que serán perforados en otra empresa operadora; sin embargo, utilizarán el equipo GMP-10 para la etapa de perforación, por ello solo generaría ahorro en partes internas de las bombas de lodo.

Es necesario mencionar también que los pozos considerados en la evaluación del presente trabajo, tanto los del 2011, 2012 como algunos del 2013, pertenecen a un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), en el cual se permite el uso de una fosa de residuos de perforación que contenga tanto líquidos como sólidos. Por ello, no se toma en cuenta los costos involucrados para la disposición de estos (tratamiento, transporte y eliminación), pues no se exige el uso de *Dewatering* para poder tratar los residuos sólidos de forma separada a los líquidos.

Finalmente, se puede observar en el cuadro de flujo de caja mostrado en el Anexo 6 el resumen de las inversiones, gastos, retribución y parámetros o indicadores de rentabilidad (Tiempo de retorno y Valor Actual Neto a una Tasa de Descuento determinada). Así también, se muestra en el Anexo 7 un cuadro comparativo de los costos reales con los estimados, de los tres 1eros pozos del año 2013, en lo que se muestra que los ahorros obtenidos superan la inversión realizada; es decir, se pagó lo invertido para la mejora y se utilizaron menores recursos para la perforación de los pozos.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

- Asegurar y mantener, en todo momento durante la perforación, el buen funcionamiento de los Equipos de Control de Sólidos, en especial de las Zarandas, el Deslimador, Limpiador de Lodo y Centrifuga Decantadora, pues la mayoría de las formaciones perforadas contienen sólidos perforados de tamaño de partícula de limos y arcillas. Adicional a lo mencionado anteriormente, las brocas PDC generan recortes más pequeños que las tricónicas.
- En lo posible, utilizar una centrifuga adicional, para poder recuperar la Baritina descargada, pues de lo contrario, esto generará que el peso del lodo disminuya y consecuentemente la presión hidrostática en el hueco también lo haga, pudiendo provocar un *kick*.
- Utilizar el Degasificador a través de las formaciones productivas, en especial en las Formaciones Mesa y Ancha, pues si no se libera el gas del fluido de perforación, éste hará que los equipos de control de sólidos posteriores, disminuyan considerablemente su eficiencia de remoción.
- Llevar un registro de las horas operativas de las partes de las bombas de lodos y bombas centrifugas, para darles sus paradas y mantenimiento respectivo; es decir, dar preferencia a la cultura preventiva sobre la reactiva.
- Mantener encendido el motor de la zaranda debajo del Limpiador de Lodo, en todo momento, que este último este siendo utilizado, pues de esa manera se tendrán recortes menos húmedos y no se desechara la Barita contenida en el lodo.
- Utilizar el tamaño de malla más fino posible pero que no haga que se bote el lodo, desde el inicio de la perforación para poder aliviar el trabajo de remoción de sólidos a los equipos de control de sólidos posteriores y disminuir el desgaste erosivo en las partes internas de las bombas de lodo.
- Usar la centrifuga decantadora para la recuperación de la fase dispersante (agua) del fluido de perforación, luego de perforar la sección de superficie, intermedia e incluso la de producción, de este modo podría reutilizarse para pozos posteriores y con ello disminuyen los desechos de perforación, su tratamiento y disposición final.

- Utilizar una caja metálica de volumen conocido a la salida de las zarandas, para contabilizar la cantidad de sólidos provenientes del hueco, y comparar este volumen real con el teórico obtenido a partir del diámetro de la broca y el ROP. Si el volumen real es mayor que el teórico significa que hay derrumbes en las paredes del hueco y con ello inestabilidad del pozo.
- Mantener al lodo en agitación constante para evitar la precipitación de sólidos en los tanques de lodo, en especial en las esquinas, y así evitar que se bote un tanque lleno de lodo, pues ello generara sobre costos en aditivos.
- Capacitar a la cuadrilla de perforación en un curso de Control de Sólidos con la finalidad de que puedan tener un mayor entendimiento de la importancia de éste en los costos y beneficios del lodo y consecuentemente en la perforación. De modo similar, sería conveniente un curso mantenimiento predictivo y preventivo al área respectiva, de modo que se puedan reducir costos en repuestos en general.

CONCLUSIONES

- La Implementación de los equipos y el seguimiento de los alcances operativos, generó un beneficio tanto para el Área de Exploración y Producción de Graña y Montero Petrolera donde se ha podido realizar una operación de Perforación más eficiente en lo técnico y económico.
- Los costos en química de lodo fueron reducidos debido a la ausencia de dilución del lodo, puesto que se tuvo un buen control de sólidos.
- La tarifa operativa de perforación disminuyó debido al aumento de ROP Neto habido como consecuencia de un menor porcentaje de sólidos en el fluido de perforación.
- El costo de repuestos de partes internas de la bomba de lodos fue menor puesto que se mantuvo un porcentaje de sólidos en el lodo dado, de modo que la erosión en las superficies metálicas se dio con menor intensidad.
- Se tuvieron menores desechos de perforación, minimizando así los Impactos Ambientales, el tratamiento y disposición de éstos.
- El beneficio obtenido se expreso en un ahorro económico, en el cual, en los 3 primeros pozos del año 2013 se ha tenido un ahorro de 17,604.7 US\$ en repuestos de las partes internas de las Bombas de Lodo, 47,100.4 US\$ en Aditivos para el Fluido de Perforación, 74,736.5 US\$ en Costo de Tarifa Operativa del Equipo de Perforación GMP-10, 13,041.6 US\$ en Combustible y 3,500.0 US\$ en Servicios de Lodos. Así también, se tuvo una inversión inicial de 17,876.0 US\$ y el costo acumulado por Servicio de Centrifuga Decantadora (SCD) de los 3 pozos fue 25,290.0 US\$. Por lo tanto se tiene un ahorro neto total (Ahorro - Inversión - SCD) de 112,817.2 US\$.
- Por otro lado, en los 3 primeros pozos del año 2013, la reducción promedio en Costos de Repuestos de las partes internas de las Bombas de Lodo fue de 78%, en Costos de Tarifa Operativa en Perforación y Combustible fue de 23%, en Aditivos del Fluido de Perforación fue de 24% y en Servicio de Lodos fue de 25%.
- De la evaluación técnica y económica realizadas, se puede concluir que mientras más profundo sea perforado un pozo, mayor será la retribución por ahorro en costo de servicios, repuestos y/o aditivos.

- El presente trabajo exhortará, en el Área de Exploración y Producción, el deseo de investigación para poder mejorar las técnicas de completación y estimulación de pozos, actualizando de forma permanente los métodos, equipos y aditivos utilizados en aras de obtener una mayor producción de crudo.
- Finalmente, para obtener la máxima eficiencia técnica y económica en campos maduros, como los de Talara, se deben optimizar los procesos que generen costos de inversión, como la perforación de pozos, de este modo, obtener un menor tiempo de retorno y una mayor rentabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

Adam T. Bourgoyne, Keith K. Millheim, Martin E. Chenevert, F.S. Young Jr., Applied Drilling Engineering, 5. Rotary Drilling Bits - 5.7 Factors Affecting Penetration Rate (221).

API Recommended Practice 13B-1, Third Edition, December 2003, Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids, Section 8 – Water, Oil and Solids Contents (12-17).

API Recommended practice 13C, Second Edition, March 1996, Recommended Practice for Drilling Fluid Processing Systems Evaluation, APPENDIX B – Particle Size Distribution by Diffraction Analysis (21).

ASME Shale Shaker Committee, DRILLING FLUIDS PROCESSING HANDBOOK, 1. Historical Perspective and Introduction - 1.4 Historical Perspective (4-11), 7. Shale Shakers - 7.2 Shaker Description (116-118), 8. Settling Pits (183), 9. Gas Busters, Separators and Degassers - 9.9 Degassers (202), 11. Hydrocyclones (257), 12. Mud Cleaners (283), 13. Centrifuges (313), 18. Centrifugal Pumps (465), 20. Smooth Operations - 20.1 Derrickman's Guidelines - Benefits of Good Drilled-Solids Separations (549).

Krilov, Z., INA-Naftaplin; Steiner, I., U. of Zagreb; Goricnik, B., INA-Naftaplin; Wojtanowicz, A.J., Louisiana State U.; Cabrajac, S., INA-Naftaplin, SPE Paper: Quantitive Determination of Solids Invasion and Formation Damage using CAT scan and Barite Suspensions.

Max R. Annis & Martin V. Smith, Drilling Fluids Technology, Chapter VI – Solids Control (164-186), APPENDIX B – Solid Analysis and Control (265-274).

MI SWACO, Curso de Control de Sólidos, 12-13 de Febrero del 2004, Evaluación de la eficiencia de los conos de los Hidrociclones (233-235).

MI SWACO, Engineering Drilling Fluid Manual, Chapter 8 - Solids Control (246-253).

Miller and Schmidt, Slurry Erosion: Uses, Applications and Test Methods, The Relative Erosivity of Coal-Oil, Coal-Water, and Petroleum Coke-Oil Slurries (p. 54).

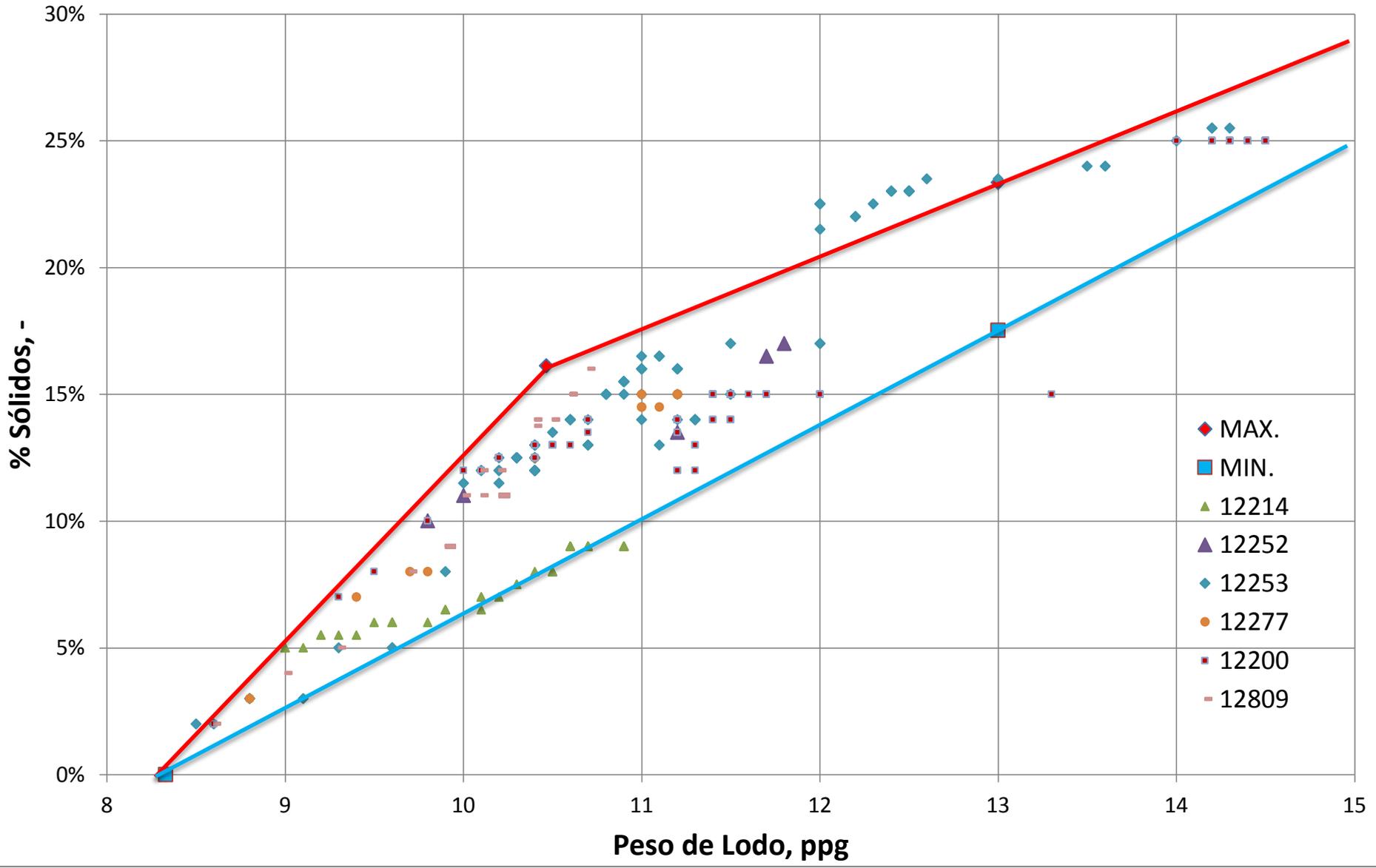
Monir Mohamed, Halliburton, SPE Paper: Engineered Particle Size Distribution While Drilling helped minimize Wellbore Damage in Sandstone Reservoirs.

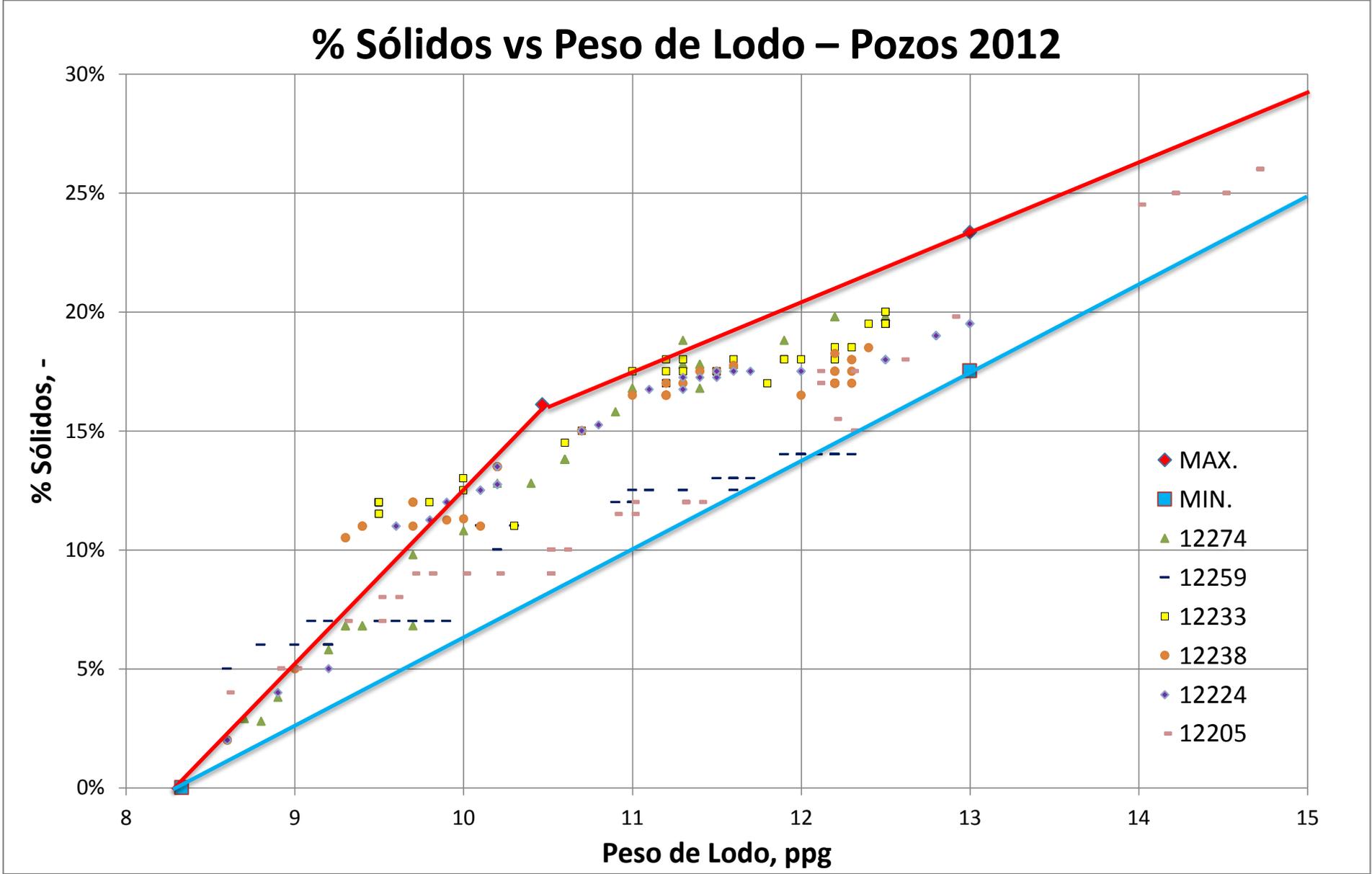
N.G. Mandal, SPE, U.K. Jain, SPE, B.S. Anil Kumar, and Ashok K. Gupta, ONGC, SPE Paper: Nondamaging Drilling Fluid Enhances Borehole Quality and Productivity in Conventional Wells of Mehsana Asset, North Cambay Basin.

PDVSA CIED, Daño a la Formacion, Capitulo 2: Causas de Daño a la Formación, Daños durante la perforación, Invasión de los Sólidos del Lodo (32-34).

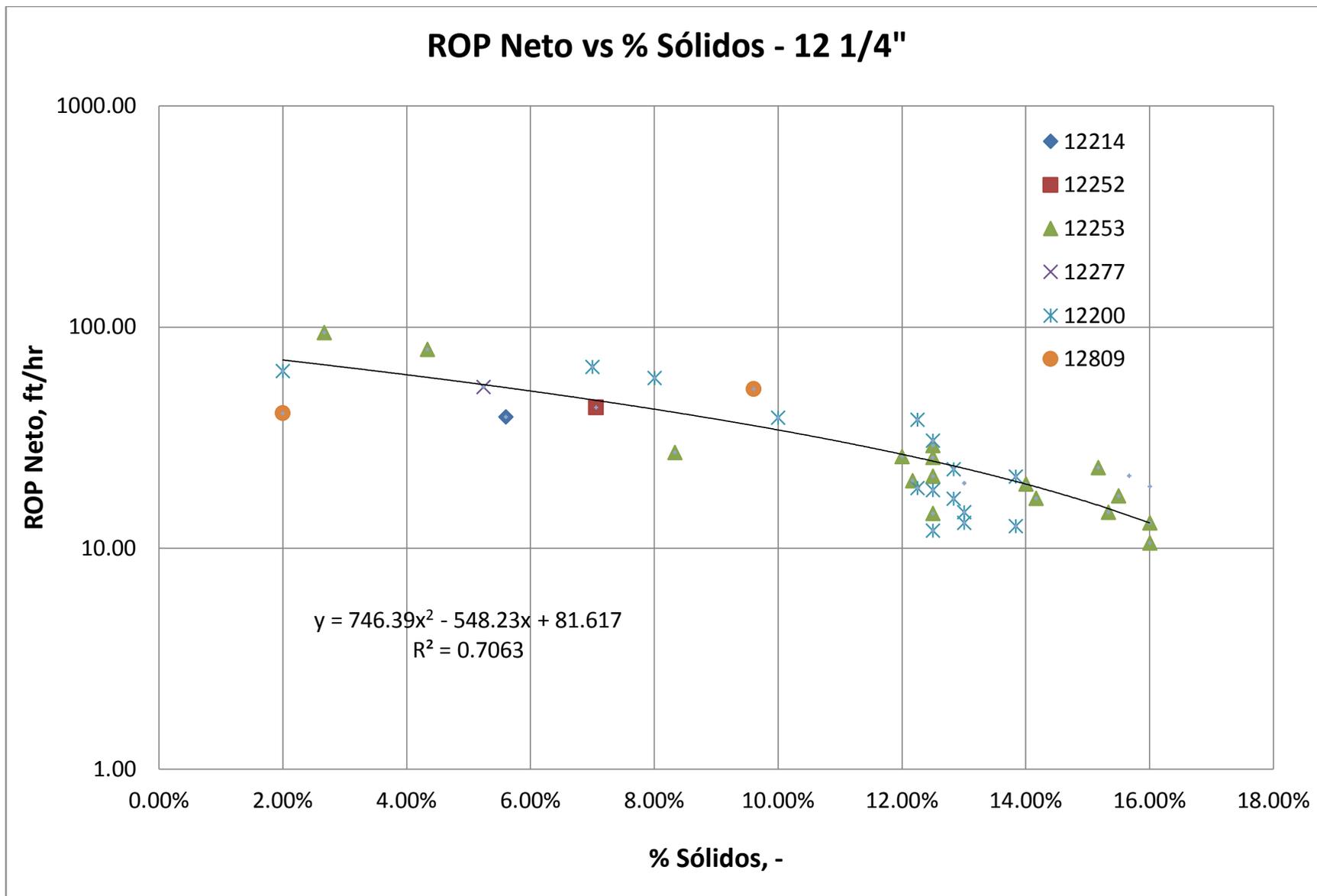
ANEXO

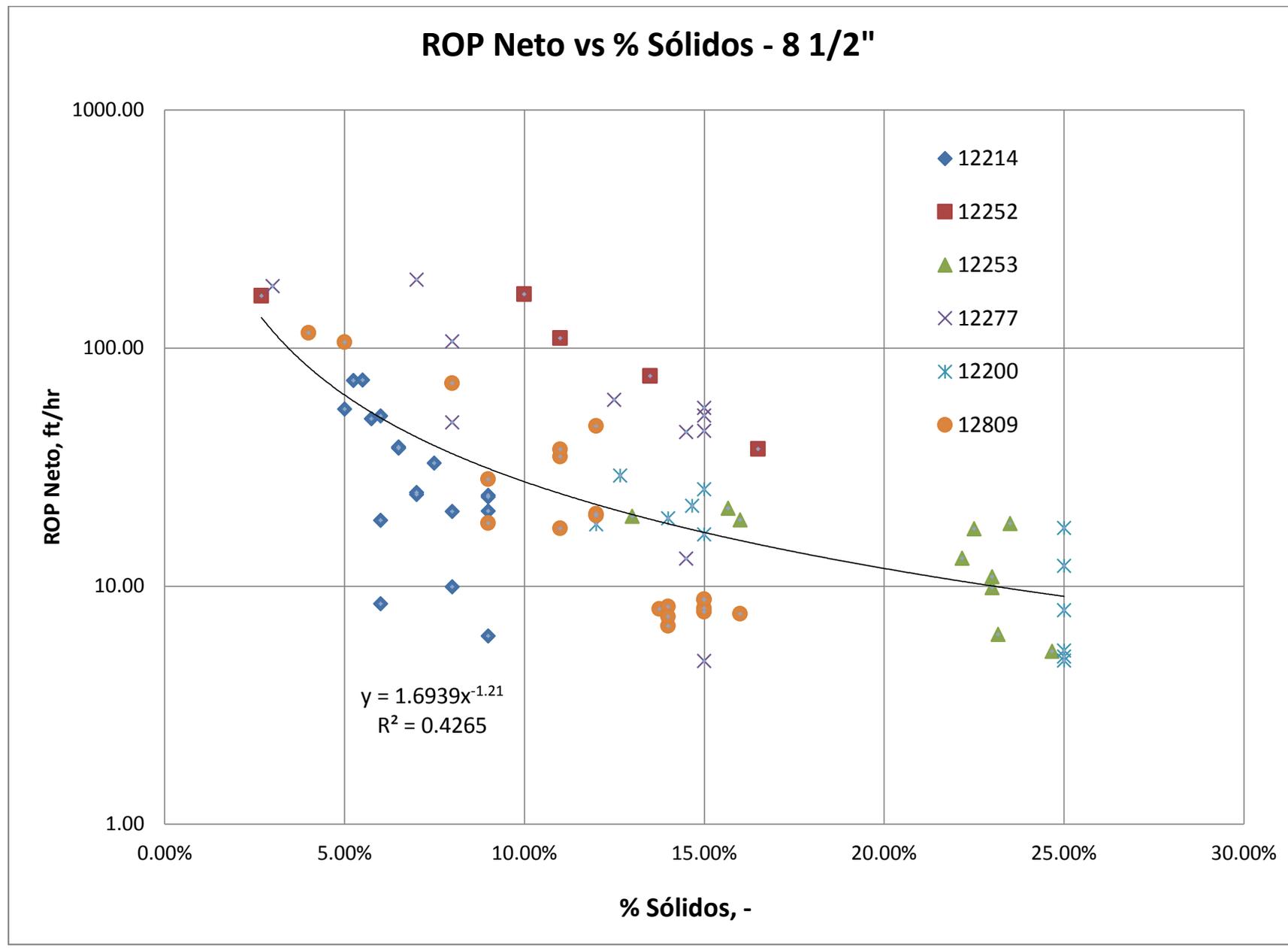
% Sólidos vs Peso de Lodo – Pozos 2011



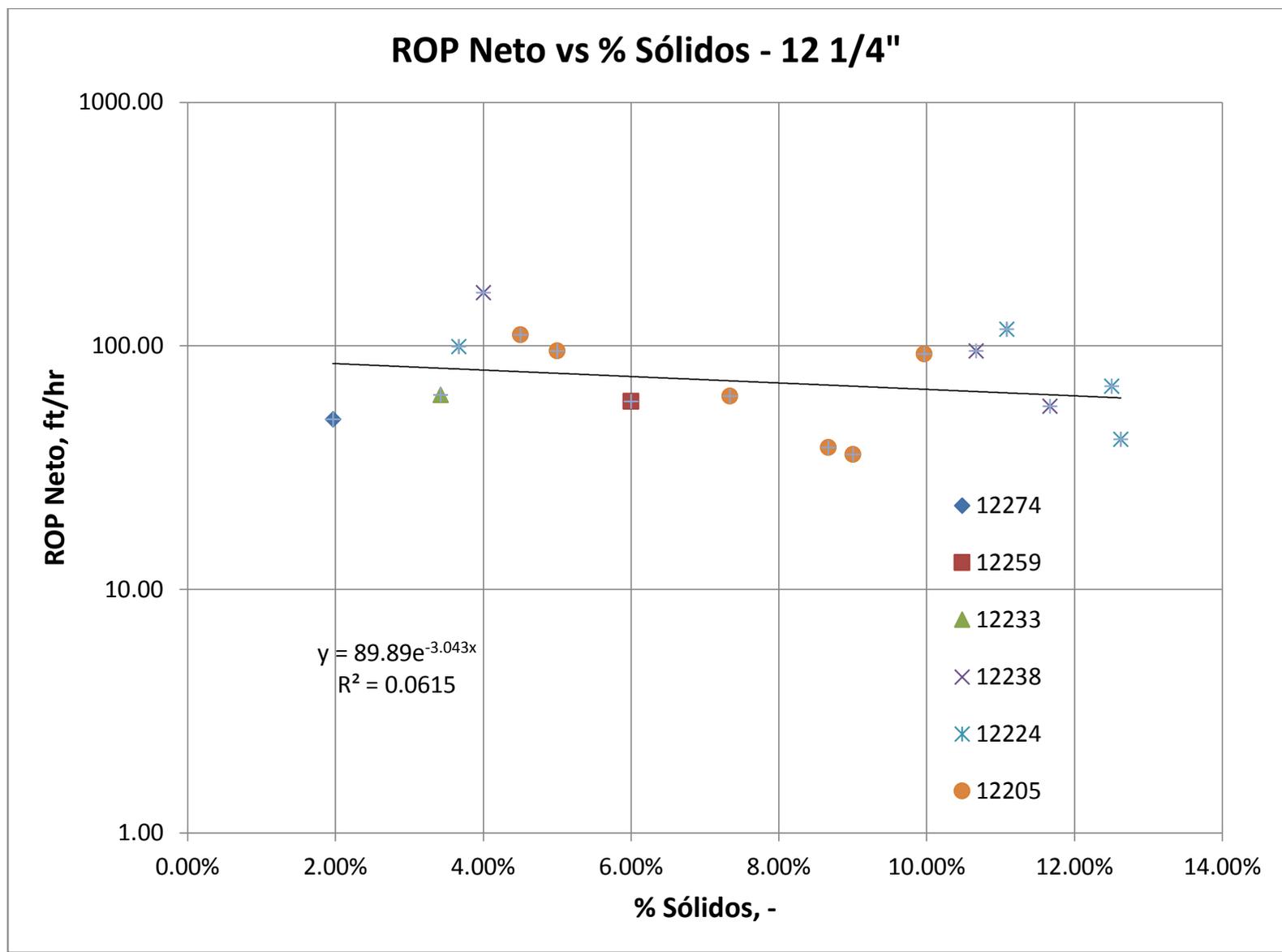


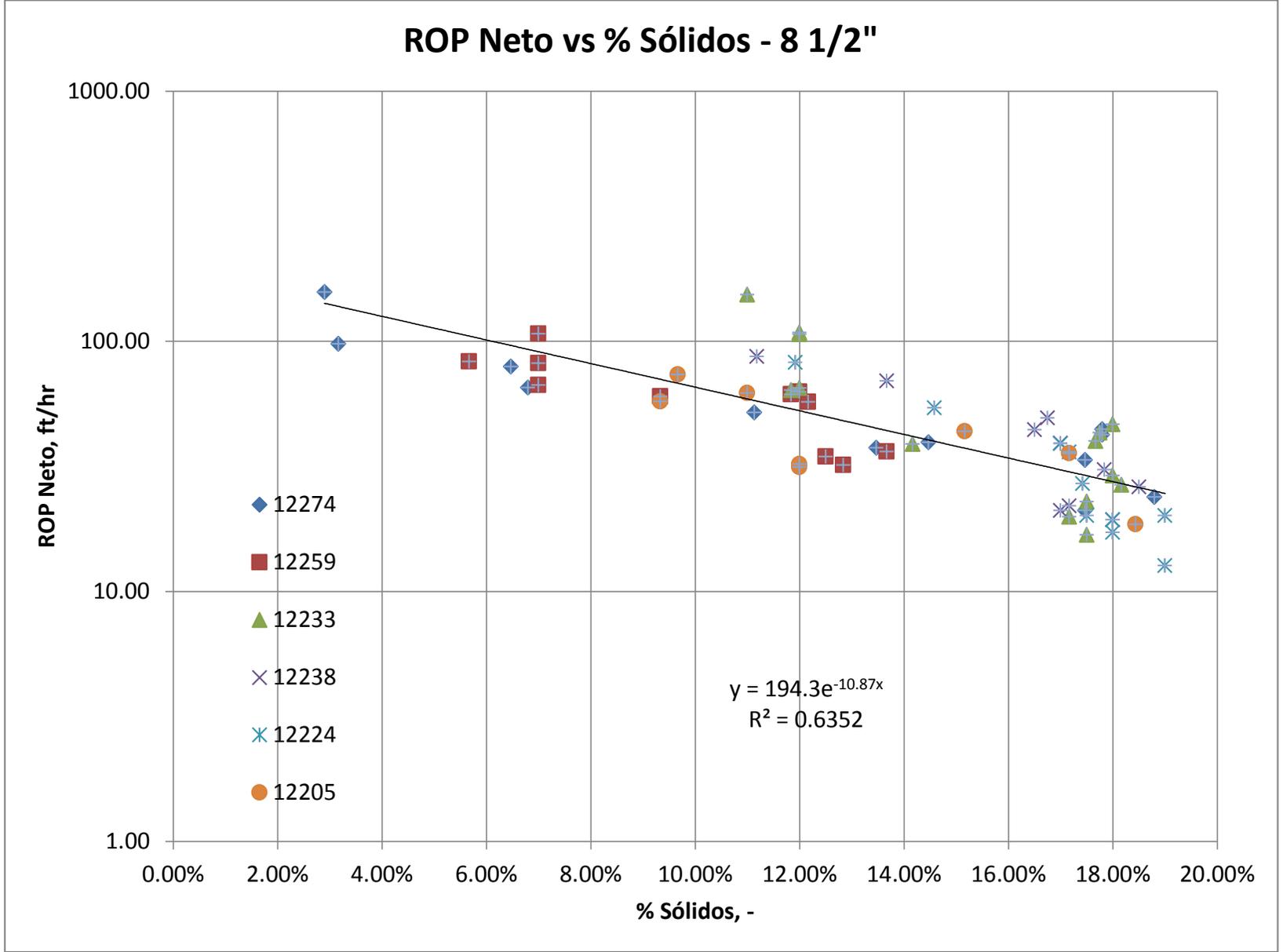
POZOS 2011

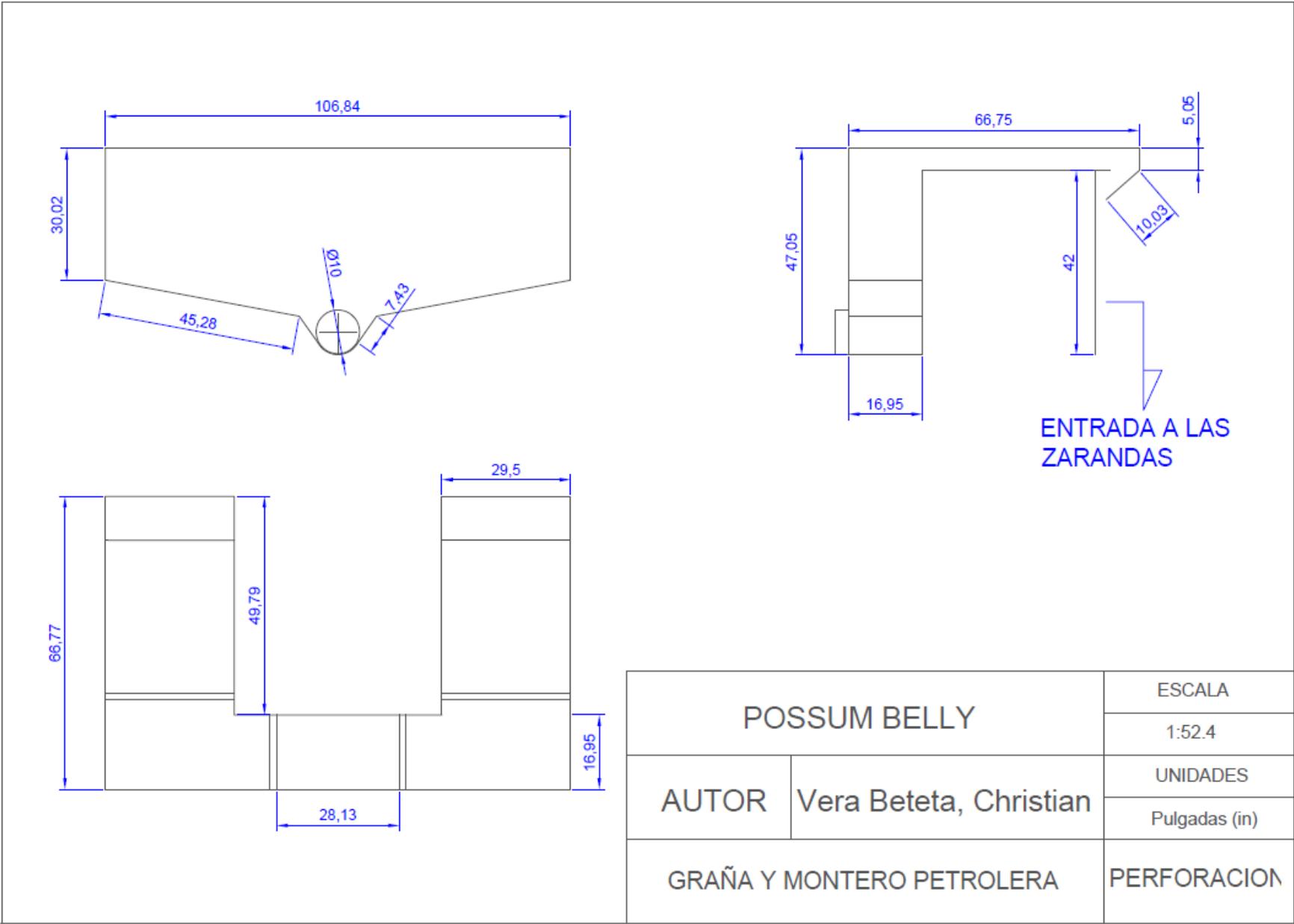




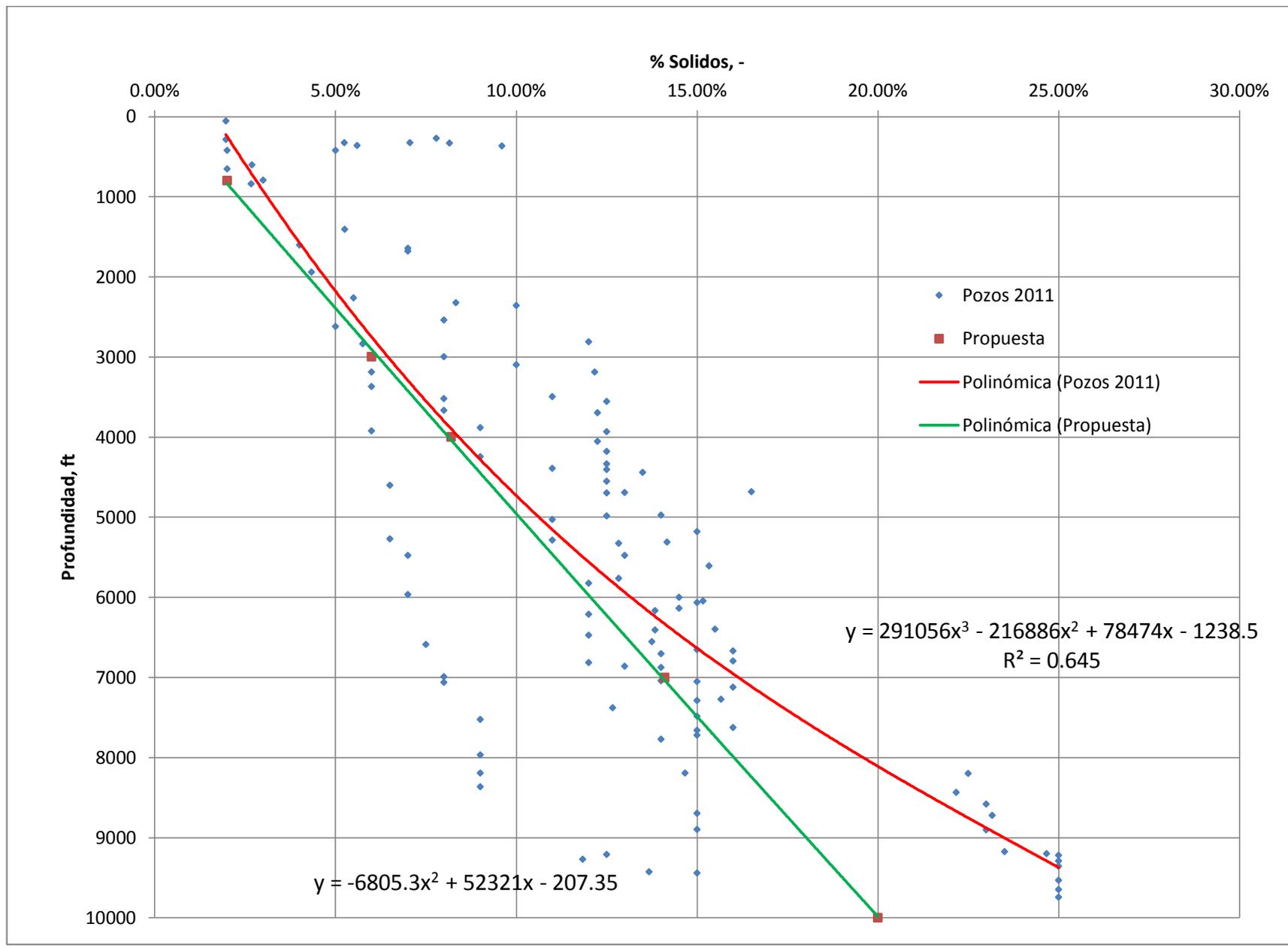
POZOS 2012

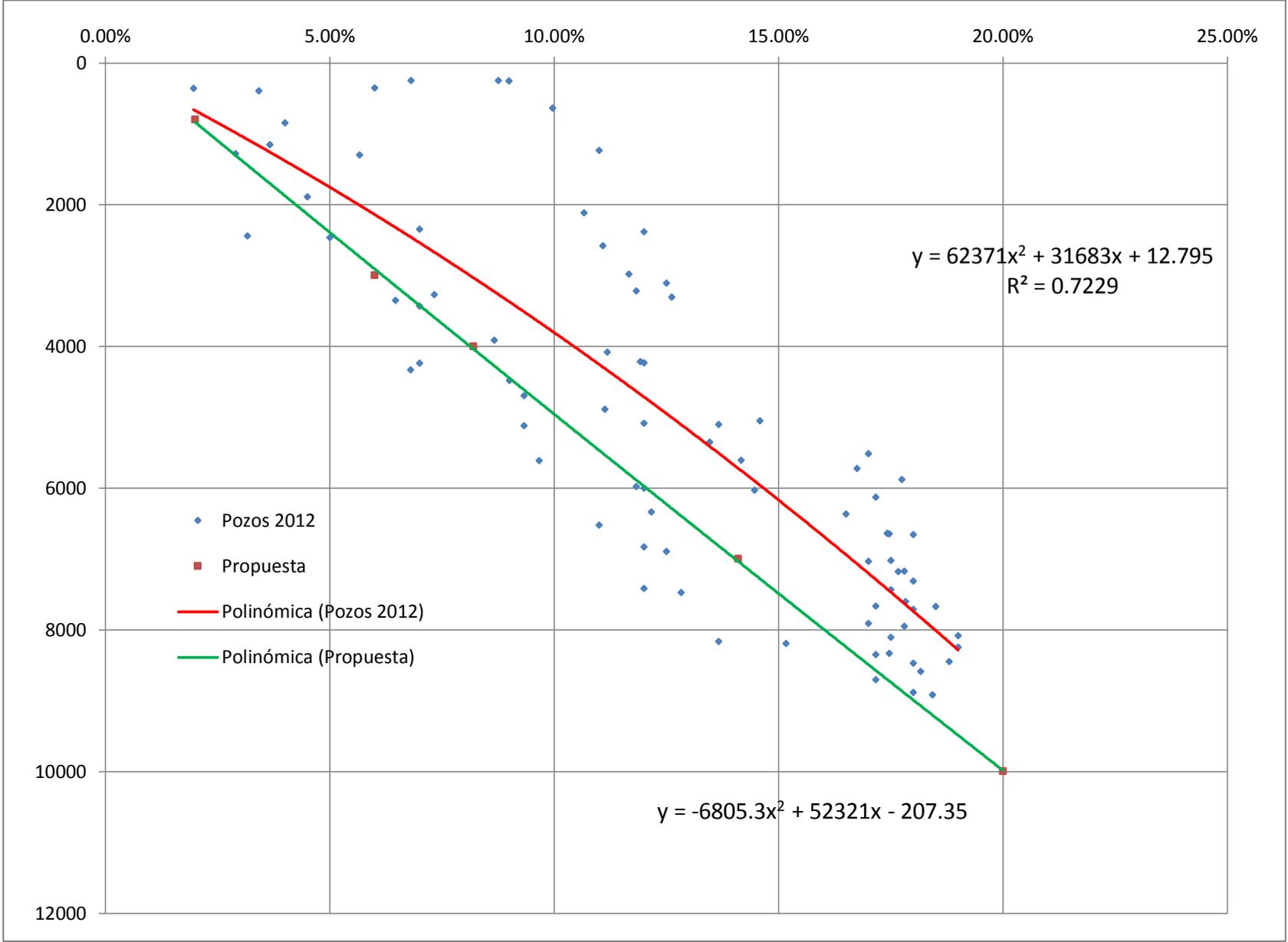






POSSUM BELLY		ESCALA
		1:52.4
AUTOR	Vera Beteta, Christian	UNIDADES
		Pulgadas (in)
GRAÑA Y MONTERO PETROLERA		PERFORACION





Pozo B - 2011		
Diámetro de Hueco	Profundidad	
12 1/4"	0	360
8 1/2"	360	7000

REAL					MEJORADO				
Hueco	Real		ROP	Tiempo	Hueco	Mejorado		ROP	Tiempo
in	% Sol	Prof.	ft/hr	hr	Diámetro	% Sol	Prof.	ft/hr	hr
12 1/4	2.00%	100	70.95	1.4	12 1/4	2.00%	100	70.95	1.4
12 1/4	2.09%	310	70.48	3.0	12 1/4	2.00%	310	70.95	4.4
8 1/2	3.00%	928	117.92	5.2	8 1/2	3.00%	1356	117.92	8.9
8 1/2	4.00%	1572	83.25	7.7	8 1/2	4.00%	1875	83.25	6.2
8 1/2	5.00%	2179	63.55	9.6	8 1/2	5.00%	2392	63.55	8.1
8 1/2	6.00%	2752	50.97	11.2	8 1/2	6.00%	2907	50.97	10.1
8 1/2	7.00%	3292	42.30	12.8	8 1/2	7.00%	3422	42.30	12.2
8 1/2	8.00%	3800	35.99	14.1	8 1/2	8.00%	3935	35.99	14.3
8 1/2	9.00%	4280	31.21	15.4	8 1/2	9.00%	4446	31.21	16.4
8 1/2	10.00%	4731	27.47	16.4	8 1/2	10.00%	4957	27.47	18.6
8 1/2	11.00%	5157	24.48	17.4	8 1/2	11.00%	5466	24.48	20.8
8 1/2	12.00%	5558	22.03	18.2	8 1/2	12.00%	5973	22.03	23.0
8 1/2	13.00%	5937	20.00	19.0	8 1/2	13.00%	6479	20.00	25.3
8 1/2	14.00%	6296	18.28	19.6	8 1/2	14.03%	7000	18.24	28.5
8 1/2	15.00%	6635	16.82	20.2					
8 1/2	16.14%	7000	15.40	23.7					
					TOTAL		Horas	198.2	
							Días	8.26	
TOTAL		Horas		214.9					
		Días		8.95					

Pozo A - 2012		
Diámetro de Hueco	Profundidad	
16 "	0	250
12 1/4"	250	3600
8 1/2"	3600	8560

REAL					MEJORADO						
Hueco	% Sol	Prof.	ROP	Tiempo	Hueco	% Sol	Prof.	ROP	Tiempo		
in	-	ft	ft/hr	hr	Diámetro	-	ft	ft/hr	hr		
16	2.00%	100	55.70	1.8	16	2.00%	100	55.70	1.8		
16	2.00%	250	55.70	2.7	16	2.00%	250	55.70	2.7		
12 1/4	2.00%	646	84.58	4.7	12 1/4	2.00%	836	84.58	6.9		
12 1/4	3.00%	994	82.05	4.2	12 1/4	3.00%	1356	82.05	6.2		
12 1/4	4.00%	1354	79.59	4.5	12 1/4	4.00%	1875	79.59	6.5		
12 1/4	5.00%	1727	77.20	4.8	12 1/4	5.00%	2392	77.20	6.7		
12 1/4	5.50%	1918	76.04	2.5	12 1/4	5.50%	2650	76.04	3.4		
12 1/4	6.00%	2113	74.89	2.6	12 1/4	6.00%	2907	74.89	3.4		
12 1/4	6.50%	2310	73.76	2.7	12 1/4	6.50%	3165	73.76	3.5		
12 1/4	7.00%	2511	72.64	2.8	12 1/4	7.00%	3422	72.64	3.5		
12 1/4	7.50%	2714	71.55	2.8	12 1/4	7.35%	3600	71.88	2.5		
12 1/4	8.00%	2921	70.47	2.9	8 1/2	8.00%	3935	93.52	3.6		
12 1/4	8.50%	3131	69.40	3.0	8 1/2	8.50%	4191	87.43	2.9		
12 1/4	9.00%	3344	68.36	3.1	8 1/2	9.00%	4446	81.74	3.1		
12 1/4	9.59%	3600	67.14	3.8	8 1/2	9.50%	4702	76.43	3.3		
8 1/2	10.00%	3779	82.34	2.2	8 1/2	10.00%	4957	71.47	3.6		
8 1/2	10.50%	4002	77.29	2.9	8 1/2	10.50%	5211	66.83	3.8		
8 1/2	11.00%	4227	72.53	3.1	8 1/2	11.00%	5466	62.49	4.1		
8 1/2	11.50%	4456	68.03	3.4	8 1/2	11.50%	5720	58.44	4.3		
8 1/2	12.00%	4687	63.79	3.6	8 1/2	12.00%	5973	54.65	4.6		
8 1/2	12.50%	4922	59.79	3.9	8 1/2	12.50%	6226	51.11	5.0		
8 1/2	13.00%	5160	56.02	4.2	8 1/2	13.00%	6479	47.80	5.3		
8 1/2	13.50%	5401	52.47	4.6	8 1/2	13.50%	6732	44.71	5.6		
8 1/2	14.00%	5645	49.13	5.0	8 1/2	14.00%	6984	41.82	6.0		
8 1/2	14.50%	5893	45.98	5.4	8 1/2	14.50%	7236	39.12	6.4		
8 1/2	15.00%	6143	43.01	5.8	8 1/2	15.00%	7488	36.59	6.9		
8 1/2	15.50%	6397	40.23	6.3	8 1/2	15.50%	7739	34.23	7.3		
8 1/2	16.00%	6653	37.61	6.8	8 1/2	16.00%	7990	32.02	7.8		
8 1/2	16.50%	6913	35.14	7.4	8 1/2	16.50%	8240	29.96	8.4		
8 1/2	17.00%	7176	32.83	8.0	8 1/2	17.00%	8491	28.03	8.9		
8 1/2	17.50%	7442	30.65	8.7	8 1/2	17.14%	8560	27.52	2.5		
8 1/2	18.00%	7711	28.61	9.4	TOTAL		Horas	150.8			
8 1/2	18.50%	7983	26.70	10.2			Días	6.28			
8 1/2	19.00%	8259	24.90	11.1	TOTAL						
8 1/2	19.54%	8560	23.09	13.1							
TOTAL				Horas	174.0						
				Días	7.25						

ANEXO VI

PARÁMETROS DE EVALUACIÓN	
Ahorro Repuestos US\$	AR
Ahorro Aditivos, US\$	AA
Ahorro ROP Neto, US\$	AROPN
Ahorro Combustible, US\$	AC
Motor de Fondo y Servicio de Lodos, US\$	MFSL

Inversión Total, US\$	17,876
Servicio de Centrifuga Decantadora, US\$	SCD

TASA DE DESCUENTO	V.A.N. (US\$)
10%	211,927
12%	210,195
13%	209,346
14%	208,509
15%	207,684
16%	206,869
18%	205,272
20%	203,717

EVALUACIÓN ECONÓMICA

RESULTADOS	
VAN (15%), US\$	207,684
PAY OUT (meses)	1.3

Día	Pozo	AR	AA	AROPN	AC	MFSL	SCD	Amort. Deprec.	Ingresos	Inversión	Flujo de Efectivo	Flujo de Efectivo Actualizado	Flujo de Efectivo Acumulado
0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	17,876	-17,876	-17,876	-17,876
19	1	0	0	0	0	0	0	298	0		-298	-296	-18,172
40	2	2,766	12,407	12,143	2,152	8,950	7,500	298	38,418		30,620	30,155	11,983
60	3	2,620	11,750	10,625	1,883	0	4,500	298	26,878		22,080	21,578	33,561
85	4	2,766	13,588	11,766	2,085	8,950	7,500	298	39,155		31,357	30,353	63,914
110	5	2,766	13,588	11,766	2,085	8,950	7,500	298	39,155		31,357	30,064	93,978
128	6	1,627	0	0	0	0	0	298	1,627		1,329	1,266	95,243
147	7	1,790	0	0	0	0	0	298	1,790		1,492	1,410	96,654
168	8	2,115	3,522	2,741	486	0	2,250	298	8,864		6,316	5,922	102,576
188	9	2,603	11,676	10,371	1,838	0	4,500	298	26,489		21,691	20,184	122,760
213	10	2,766	13,588	11,766	2,085	8,950	7,500	298	39,155		31,357	28,901	151,661
234	11	2,115	4,579	6,764	1,199	0	3,000	298	14,656		11,358	10,385	162,046
259	12	2,766	13,588	11,766	2,085	8,950	7,500	298	39,155		31,357	28,396	190,442
281	13	2,278	4,931	8,708	1,543	0	3,750	298	17,461		13,413	12,045	202,487
299	-	1,627	3,522	2,741	486	0	2,250	298	8,376		5,828	5,197	207,684
TOTAL		30,605	106,739	101,155	17,928	44,750	57,750	4,171	301,177	17,876	221,380	207,684	

ANEXO VII

PARAMETRO	POZO 12268 (8443')		POZO 12242 (7475')		POZO 12264 (6580')		AHORRO, US\$
	ESTIMADO	REAL	ESTIMADO	REAL	ESTIMADO	REAL	
Repuestos US\$	8645.6	3850.0	7654.4	747.5	6737.9	835.7	17,604.7
Aditivos, US\$	70793.2	55445.9	66353.5	43656.0	57024.1	47968.5	47,100.4
ROP Neto, US\$	12.5 días (156,250.0)	10.4 días (130,078.1)	10.2 días (127,252.1)	7.9 días (98,125.0)	*5.1 días (63,962.5)	*3.5 días (44,525.0)	74,736.5
**Combustible, US\$	27,169.8	22,605.3	22,170.6	17171.3	11085.3	7607.5	13,041.6
Servicio de Lodos, US\$	6,500.0	5,500.0	5,500.0	4,000.0	3,000.0	2,000.0	3,500.0
Inversión Total, US\$	17,876						17,876.0
Servicio de Centrifuga Decantadora, US\$	9930.0		7330.0		8030.0		25,290.0
AHORRO – (INVERSION TOTAL + SERVICIO DE CENTRIFUGA DECANTADORA) =							112,817.2

*Representa los días de Perforación hasta la profundidad de 4500 ft, puesto que posteriormente hubo la necesidad deslizar por incluso más de 1 día.

**Es el costo estimado a un consumo diario promedio de 500 gal/día, a un precio de diesel de 4.43 US\$/gal.