



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL  
LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“Optimización del uso de Polímeros en la Perforación  
de pozos en Campos Marginales en el Oriente  
Ecuatoriano (Caso Bermejo)”**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

**INGENIERO EN PETROLEOS**

**Presentada por:**

**ROBERTO GONZALO SILVA ZEA**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO**

**2001**

# AGRADECIMIENTO

Al personal de Tecpecuador, quienes dieron las facilidades para la realización del presente trabajo de Tesis, en especial a:

Ing. Marcos Casolari, Gerente General por su apoyo incondicional.

Ing. Freddy Sarmiento, Ingeniero de Perforación, por su constante guía para la realización del presente trabajo de tesis.

Al Ing. Ricardo Gallegos, Director de Tesis por el apoyo brindado.

Al Ing. Mario González, Representante de la ESPOL en Quito, por su constante apoyo a los estudiantes de la institución.

# **DEDICATORIA**

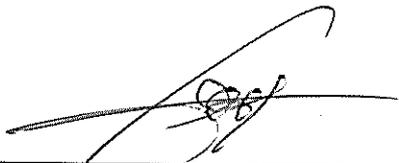
A mis Padres

A mis Hermanos

A Oneldis

A todos mis amigos

# TRIBUNAL DE GRADUACION



**Ing. Edison Navarrete C.**

**DECANO DE LA FICT**

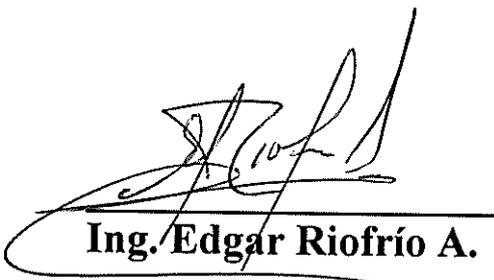


**Ing. Ricardo Gallegos O.**

**DIRECTOR DE TESIS**



**BIBLIOTECA FICT  
ESPOL**



**Ing. Edgar Riofrío A.**

**VOCAL**

**Ing. Freddy Sarmiento G.**

**VOCAL**

## **DECLARACION EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la **ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**”

**(Reglamento de Graduación de la ESPOL)**

---

**ROBERTO SILVA ZEA**

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis tiene por objeto el estudio del comportamiento de un fluido de perforación base polímero, como el PHPA, en uso actualmente en el mundo entero como sustituto de lodos base aceite y de preferencia en campos marginales o depletados.

Inicialmente se tenía proyectado investigar este sistema de polímero en un pozo de los tres proyectados para perforarse en Bermejo Sur durante el año 2000, es decir en el #3, para posteriormente con los resultados obtenidos optimizar su uso en el siguiente pozo que es el #1.

Si bien la optimización del uso del sistema de lodos arrojó resultados generales alentadores, hubo problemas con la estabilización de las lutitas de la formación Napo, las cuales son mecánicamente débiles y necesitaban otro tipo de aditivo para su control. Pero un cambio en los aditivos realizado a petición de la compañía de lodos para el siguiente pozo (el #2) obligó al cambio del objetivo general de esta tesis e investigar el nuevo comportamiento del lodo. Esto ayudará a establecer lineamientos generales para la perforación de este tipo de lodo y su aplicación en Campos Marginales y/o depletados.

En el Capítulo I se hace referencia a los polímeros, de donde provienen como están

conformados y como se los clasifica, su uso como lodos de perforación y se explica la tendencia a nivel mundial acerca de uso en campos marginales y áreas sensibles.

En el Capítulo II se hace la descripción de las características y los aditivos empleados para resolver problemas potenciales durante la perforación. También se hace mención del tipo de pruebas que se hacen para monitorear las propiedades del lodo y los parámetros del lodo recomendados para el sistema PHPA.

En el Capítulo III se describe el circuito de lodo y los equipos de control de sólidos. El Capítulo IV trata acerca de los métodos de cálculo usados para estimar la limpieza del hueco y proveer la mejor hidráulica, también se hace mención en los problemas que históricamente se han presentado durante las perforaciones y en la forma de resolverlos.

En el capítulo V se discuten los resultados alcanzados por la aplicación de las técnicas expuestas en el capítulo IV.

# INDICE GENERAL

	<b>Pag.</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>I</b>
<b>INDICE GENERAL.....</b>	<b>II</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>III</b>
<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>IV</b>
<b>I. REVISIÓN GENERAL.....</b>	<b>16</b>
1.1 Notas sobre polímeros.....	16
1.2 Fluidos de perforación.....	21
1.3 Polímeros como fluidos de perforación.....	23
1.4 Reseña Técnica.....	28
1.4.1 Lodo base agua/polímero PHPA.....	28
1.4.2 Perforación en Campos Marginales.....	30

**II. SISTEMA DE LODO DE BASE  
AGUA/POLÍMERO**

**PHPA.....32**

2.1 Características del fluido de perforación.....32

2.2 Aditivos del fluido de perforación.....37

    2.2.1 Control de densidad.....37

    2.2.2 Control de pérdida de circulación.....39

    2.2.3 Estabilidad del hueco.....39

    2.2.4 Control de sólidos.....40

    2.2.5 Control de presiones.....40

    2.2.6 Control de filtrado.....41

    2.2.7 Transporte y encapsulación de ripios.....41

2.3 Control de lodo durante la perforación.....42

2.4 Relación del sistema de lodo usado con la tasa de penetración.....50

2.5 Propiedades de flujo.....53

**III. CIRCUITO DEL LODO DE PERFORACION.....60**

3.1 Tanques.....60

3.2 Zaranda vibratoria.....61

3.3 Centrifuga.....63

3.4 Desarenadores.....65

3.5 Desarcilladores.....	65
--------------------------	----

**PAG**

3.6 Desgasificadores.....	66
---------------------------	----

**IV. CÁLCULOS Y PROBLEMAS ESPERADOS DURANTE  
LA PERFORACIÓN.....68**

4.1 Información geológica de la zona.....	69
-------------------------------------------	----

4.2 Diseño y cálculos hidráulicos.....	73
----------------------------------------	----

4.3 Programa de lodos.....	79
----------------------------	----

4.4 Cuadro comparativo.....	86
-----------------------------	----

4.4.1 Parámetros del lodo para el pozo #1.....	86
------------------------------------------------	----

4.4.2 Parámetros del lodo para el pozo #3.....	86
------------------------------------------------	----

4.4.3 Parámetros del lodo para el pozo #2.....	86
------------------------------------------------	----

4.5 Análisis de costos del sistema de lodo.....	90
-------------------------------------------------	----

4.6 Optimización del flujo en el sistema.....	90
-----------------------------------------------	----

4.7 Problemas esperados durante la perforación.....	91
-----------------------------------------------------	----

4.7.1 Hinchamiento de arcillas.....	92
-------------------------------------	----

4.7.2 Pegamiento de tubería.....	94
----------------------------------	----

4.7.3 Perdida de circulación.....	98
-----------------------------------	----

4.7.4 Lutitas desmoronables.....	101
----------------------------------	-----

<b>V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS ALCANZADOS POR LA OPTIMIZACIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN.....</b>	<b>107</b>
	<b>PAG</b>
5.1 Perdidas de circulación.....	107
5.2 Inhibición de arcillas hidratables presentes.....	108
5.3 Mantenimiento de la estabilidad del hueco.....	110
5.4 Control de las Lutitas desmoronables.....	111
5.5 Control del daño de formación.....	111
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>113</b>
Conclusiones.....	113
Recomendaciones.....	116
<b>APÉNDICES.....</b>	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>166</b>

## ABREVIATURAS

A	Angstroms
API	Instituto Americano del Petróleo
API HT-HP	Prueba API de alta temperatura y alta presión
Bbl	barriles
Ca	Calcio
CCI	Indice de acarreo de ripios
CEC	Capacidad de intercambio catiónico
CMC	carboxil metil celulosa
Fig	figura
GHA	generador de hidróxido de aluminio
K	potasio , factor de consistencia de flujo
KCl	cloruro de potasio
KNO <sub>3</sub>	nitrato de potasio
LC50	Prueba de toxicidad para un 50% de desobrevivencia de especies
LGS	sólidos de baja gravedad
Lb	libra
Lb/gal	libras por galón
Lb/bbl	libras por barril
M	metro

n	índice de comportamiento de flujo
N	normalidad
Na	sodio
PAC	Celulosa polianiónica
PC	punto cedente
PPM	partes por millón
Pulg	pulgadas
Pulg <sup>2</sup>	pulgadas cuadradas
Pie <sup>3</sup>	pies cúbicos
PHPA	poliacrilamida parcialmente hidrolizada
Psi	Libras por pulgada cuadrada
ROP	Tasa de penetración
RPM	Revoluciones por minuto
V	Voltios
VP	viscosidad plástica
XCD	goma xántica

## SIMBOLOGIA

$\rho$	= densidad
Dh	= diámetro del hueco
Dp	= diámetro de la tubería
$\Delta p$	= cambio de presión
F	= lectura del dial.
F3	= lectura del dial a 3 rpm.
F6	= lectura del dial a 6 rpm
F100	= lectura del dial a 100 rpm
F200	= lectura del dial a 200 rpm
F300	= lectura del dial a 300 rpm
F600	= lectura del dial a 600 rpm
Fw	= fracción de agua
Go	= gel cero
Hpb	= potencia en la broca
Hpc	= potencia perdida en las conexiones
Hps	= potencia en superficie
K	= factor de consistencia de flujo laminar
MBT	= ensayo de azul de metileno

$M_f$  = alcalinidad del filtrado al naranja de metilo

$n$  = índice de comportamiento de flujo laminar

$P_b$  = caída de presión en la broca

$P_f$  = alcalinidad del filtrado

$P_p$  = presión en la bomba

$P_m$  = alcalinidad del lodo

$Q$  = tasa de flujo

$Q_c$  = tasa de flujo crítico

$R$  = tasa de corte

$R_{NC}$  = numero de Reynolds critico

$V_a$  = velocidad anular

$V_j$  = velocidad en las boquillas

$Z$  = longitud vertical verdadera de tubería o del pozo

## INDICE DE FIGURAS

	<b>PAG</b>
<b>Figura 1.1 Polímero lineal.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 1.2 Polímero Ramificado.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 1.3 Polímero Entrecruzado.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 3.1 Zaranda Vibratoria.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 3.2 Limpia-Lodos.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 4.1 Esquema de Flujo turbulento en el anular.....</b>	<b>104</b>

## INDICE DE TABLAS

	<b>PAG</b>
<b>Tabla I</b>	<b>Propiedades del Lodo Pozo#1.....87</b>
<b>Tabla II</b>	<b>Propiedades del Lodo Pozo#2.....88</b>
<b>Tabla III</b>	<b>Propiedades del Lodo Pozo#3.....89</b>

# **CAPITULO I**

## **REVISION GENERAL**

### **1.1 NOTAS SOBRE POLIMEROS**

Desde el punto de vista técnico, un polímero es una sustancia que contiene dos o más unidades químicas, llamadas monómeros, en la misma proporción. El polímero en si es una molécula alargada de monómeros, con un peso molecular muy elevado que puede llegar hasta millones, pero se distingue de sus monómeros por tener diferentes propiedades físicas.

El efecto de unir a los monómeros entre si se llama polimerización y dependiendo del tipo de esta se tienen varias denominaciones para los polímeros. Los polímeros que constan de algunos monómeros se llaman oligómeros, cuando están compuestos de un solo tipo de monómeros se llaman homopolímeros. Por último, cuando el polímero esta compuesto de dos o más tipos de monómeros se llaman copolímeros.

Dependiendo de su estructura, los polímeros se clasifican en:

Lineales, como el CMC (carboxilmetilcelulosa), PHPA (poliacrilamida parcialmente

hidrolizada) y HEC (hidroximetilcelulosa). Ver Fig 1.1

Ramificados, como el almidón y la goma xántica, ver Fig 1.2; y

Entrecruzados (reticulares), como la goma xántica entrecruzada. Ver Fig 1.3

Para expresar la formula escrita de los polímeros, la formula escrita debe constar de la unidad recurrente más simple en su enésimo grado. Por ejemplo, el polímero más sencillo que se conoce es el polietileno ((C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>). El etileno es el resultado de la polimerización del monómero etileno (CH<sub>2</sub>=CH<sub>2</sub>). Durante el proceso de polimerización, el doble enlace se pierde el polietileno es formado.

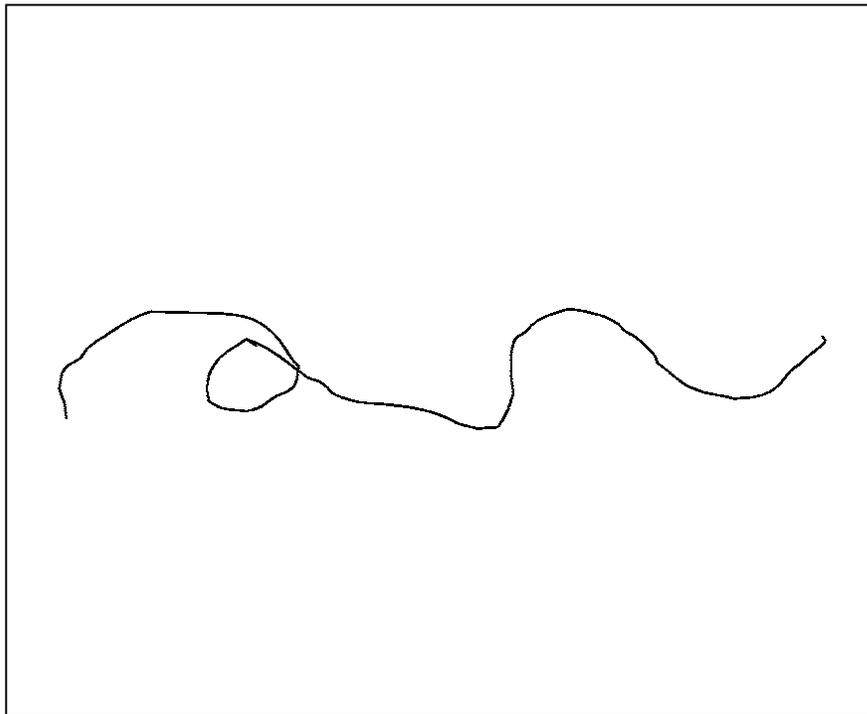


etileno

polietileno

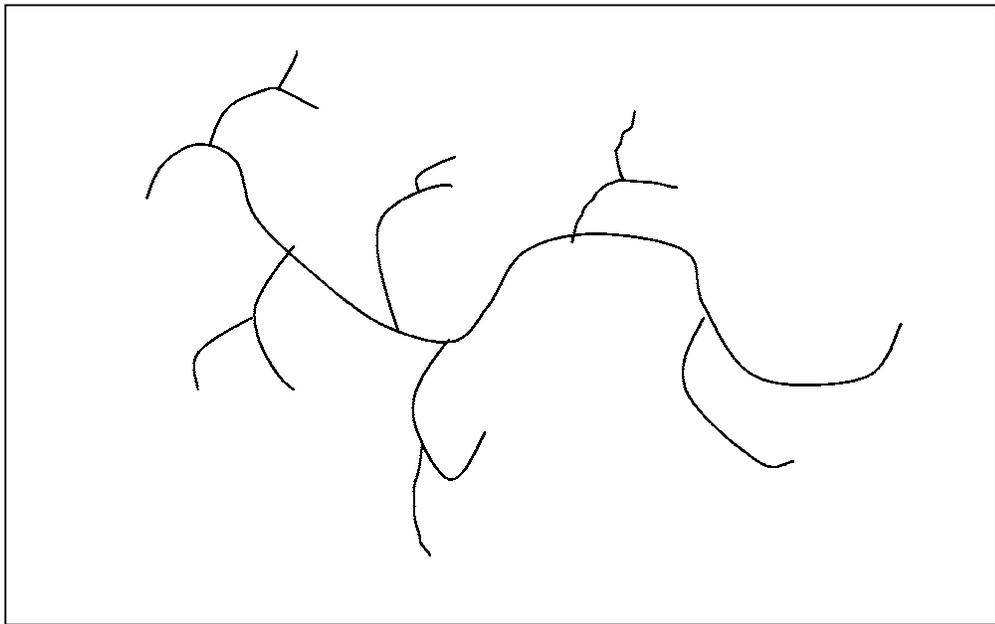
El polímero polietileno resultante consiste de una larga cadena de “n” unidades repetitivas. El número de veces que los monómeros están repetidos se conoce como el grado de polimerización. Típicamente los polímeros tienen grados de polimerización mayores de 1.000.

## ESTRUCTURA DE LOS POLIMEROS



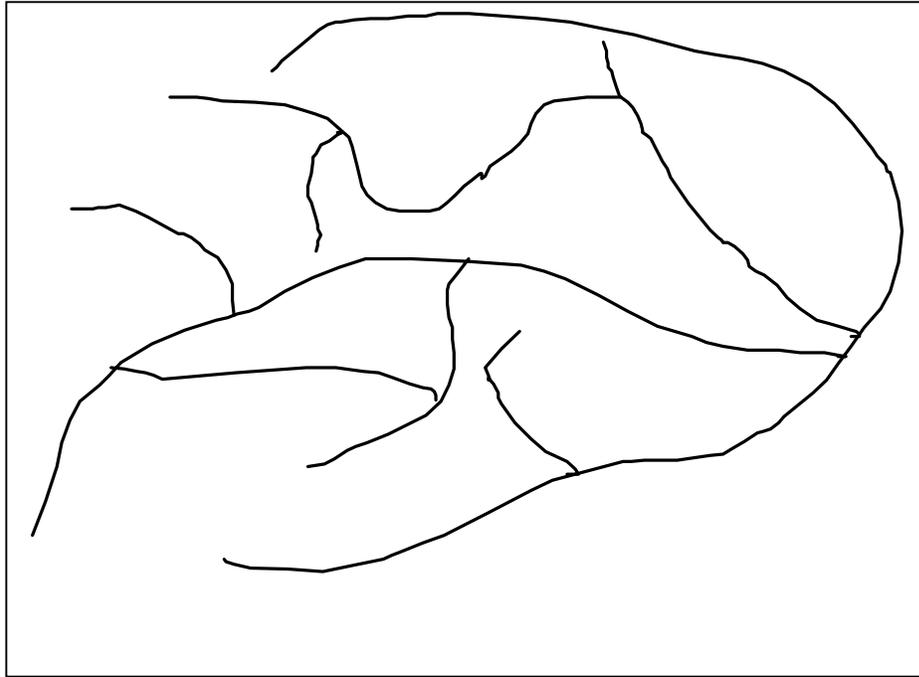
**Fig 1.1 POLIMERO LINEAL**

## ESTRUCTURA DE LOS POLIMEROS



**Fig 1.2 POLIMERO RAMIFICADO**

## ESTRUCTURA DE LOS POLIMEROS



**Fig 1.3 POLIMERO ENTRECruzADO (RETICULAR)**

## 1.2 FLUIDOS DE PERFORACION

Como fluido de perforación se conoce a aquellos que permiten perforar un pozo, con lo que se restringe a los fluidos que son circulados a través del hueco y cumplen los requisitos mínimos de eficiencia de limpieza y seguridad durante la perforación.

Existen tres clases de fluidos de perforación:

- Base agua
- Base aceite
- Neumáticos

Los de base y base aceite se los conoce genéricamente como lodos. Los neumáticos están constituidos por aire, gas o espuma. Puesto que en nuestro medio solo se usan lodos, preferencialmente hablaremos de ellos.

Los lodos están compuestos por 4 fases:

1. - Fase líquida: es el elemento que mantiene en suspensión a las demás fases. Puede ser agua (dulce o salada), petróleo (también diesel) o una combinación de ambos.
2. - Fase coloidal o reactiva: constituida por la arcilla. Sirve para darle cuerpo al

lodo. Si el lodo es de agua dulce se usa montmorillonita, si es de agua salada se usa atapulguita.

3. - Fase inerte: constituida por material densificante como barita, carbonato de calcio, etc. Los sólidos no deseables como arena y ripios también están dentro de esta clasificación.
4. - Fase química: constituida por iones y sustancias en solución, como dispersantes, emulsificantes, sólidos disueltos, reductores de filtrado, etc., que controlan el rendimiento de arcillas y mantienen el fluido acorde con el diseño establecido.

No existen dos lodos iguales, aun en el caso que los lodos sean semejantes al inicio, los efectos diversos de los elementos de la formación y el manejo que se haga en superficie con los lodos introducirán diferencias. A pesar de las diferencias que existan entre los varios tipos de lodos estos deben de satisfacer ciertas funciones básicas que se resumen en ocho puntos y que son:

1. Transportar los recortes de perforación y derrumbes a la superficie.
2. Mantener en el espacio anular los ripios y los derrumbes, cuando se detiene la circulación.
3. Controlar la presión subterránea.
4. Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación.
5. Mantener las paredes del pozo.

6. Ayudar a suspender el peso de la sarta de perforación y la tubería de revestimiento.
7. Transmitir potencia hidráulica sobre la formación, por debajo de la broca.
8. Proveer un medio adecuado para llevar a cabo los perfilajes con cable.

Un lodo que parece tener todas las propiedades que se han mencionado anteriormente puede resultar deficiente cuando esta sometido a ciertas condiciones de pozo. En particular, el lodo debe:

1. Resistir la contaminación posible derivada de fuentes externas.
2. Mantenerse estable a temperaturas y presiones elevadas.

### **1.3 POLIMEROS COMO FLUIDOS DE PERFORACION**

Los polímeros han sido usados en fluidos de perforación desde la década de 1930 cuando el almidón de maíz fue introducido como aditivo de control de filtrado. Desde esta época, los polímeros se han vuelto mas especializados y su aceptación y uso se han incrementado. Los polímeros son parte de prácticamente todos los sistemas de base agua hoy en día. Es mas, algunos sistemas son totalmente polímero-dependientes y se los llama globalmente como sistemas poliméricos.

Una amplia gama de polímeros esta disponible actualmente, algunos de los cuales como el almidón, por ejemplo provienen de fuentes naturales. Otros mas especializados son modificados naturales, mientras que los mas sofisticados son

derivados sintéticos.

El uso de los lodos de “bajo sólidos/polímeros” y con características inhibitorias en formaciones reactivas, tales como arcillas expansibles y lutitas demorables, lo hacen el candidato más oprimado. Además, su uso es recomendado cuando se requiera perforar formaciones de baja presión o depletadas. Son usados en agua fresca y salada con pH de 7 hasta 11, con contenidos de arcilla de cero a 20 lbm/bbl (0 a 8% LGS).

### CLASIFICACION DE LOS POLIMEROS

Los polímeros como fluidos de perforación se los clasifica de tres formas. Ellos pueden clasificarse de acuerdo a:

Su química: aniónicos y no iónicos.

Su función: aditivos viscosificantes y de control de filtrado.

Por su origen: naturales, naturales modificados y derivados sintéticos.

Respecto a lo último revisaremos algo de literatura relativa a los polímeros usados como fluidos de perforación.

#### POR SU ORIGEN

##### a) POLIMEROS NATURALES

Los polímeros naturales son producidos por la naturaleza, sin la intervención de la

mano del hombre. Los principales son los polisacáridos. Tenemos como ejemplo al almidón utilizado en fluidos de perforación, el cual proviene de una variedad de fuentes como los almidones de papa o maíz.

La goma xántica es otro polímero natural, aunque se lo puede obtener a través de bacterias. La bacteria *Xanthomonas campestris* produce la goma durante su ciclo de vida a través de un complejo proceso enzimático. La goma es soluble en agua, ligeramente aniónica y altamente ramificada. Tiene un peso molecular que oscila entre 2 y 3 millones, el cual es relativamente alto para fluidos de perforación.

La goma es una estructura repetitiva, compuesta de cinco anillos, con un esqueleto de dos anillos y una cadena de tres anillos laterales. El esqueleto consta de residuos de glucosa idénticos en estructura a la celulosa. Los ramales exteriores del esqueleto son la cadena de los tres anillos laterales los que están compuestos de residuos de azúcar. Agregados a las cadenas laterales están varios grupos funcionales (carbonilos, carboxilos, hidróxilos y otros), los cuales le dan las propiedades viscosificantes únicas de la goma xántica.

La estructura alargada del polímero, acoplada con la débil unión de hidrógenos entre los grupos laterales, imparte las únicas propiedades viscosificantes de la goma. Cuando una cierta concentración del polímeros se alcanza, la unión de los hidrógenos desarrollada entre los ramales del polímero resulta en una compleja red de moléculas débiles enlazadas.

Las interacciones electrostáticas son débiles, sin embargo cuando se aplica corte al sistema, las fuerzas de adherencia que mantienen los polímeros unidos hacen que se separen. Cuando se rompe el enlace de hidrogeno, la viscosidad del fluido se adelgaza. Cuando se retira el corte al fluido, la cadena del polímero restituye su adherencia intermolecular entre los hidrógenos y regresa su estadio viscosificante original.

Los polímeros xánticos producen fluidos pseudoplásticos o corte-adelgazados y estructuras de gel.

Cuando el polímero es sometido a altas tasas de corte se comporta casi como agua, por ejemplo en las toberas, para luego en el anular recuperar su figura viscosa. Bajo condiciones estáticas, provee de características tixotrópicas dando geles uniformes.

#### b) POLIMEROS NATURALES MODIFICADOS

Son muy comunes en lodos de perforación. La celulosa y el almidón son los que frecuentemente se los usa para producir los polímeros naturales modificados.

Las versiones modificadas tienen características sustancialmente diferentes que los originales. En general, se los modifica a polielectrolitos para permitir que sean solubles en agua.

Esta modificación involucra una alteración de la unidad repetitiva del polímero. Un polielectrolito es un polímero que disuelto en agua libera poli-iones y contra-iones de carga opuesta. Un poli-ión tiene carga, la que se repite a largo de la cadena del polímero. La carga puede ser positiva (polímero catiónico) o negativa (polímero aniónico). El polímero PHPA es un polímero aniónico, lo mismo que la goma xántica y el CMC, por nombrar a algunos. La celulosa polianiónica (PAC) es un derivado del CMC y ejemplo de polielectrolito.

### c) POLIMEROS SINTETICOS

Se los obtiene a partir de derivados de petróleo. El método de formarlos es a través de adición reactiva. Por este método se obtienen la mayoría de los polímeros que se conocen de origen sintético. El PHPA es un polímero sintético obtenido por copolimerización.

Actualmente, este polímero esta compuesto de monómeros acrilamida y de acrilato de sodio.

El potencial ilimitado del desarrollo de los polímeros hace posible la aplicación en casi todas las funciones de un fluido de perforación. Con la tecnología de los polímeros es posible analizar un evento a nivel molecular y diseñar un polímero con las propiedades específicas para aplicarlo a esta situación. Por esta razón, los polímeros tienen un futuro ilimitado como fluidos de perforación.

## **1.4 RESEÑA TECNICA**

### **1.4.1 LODO BASE AGUA/POLIMERO PHPA**

Mediante la copolimerización se obtiene el polímero sintético PHPA, el cual está constituido por acrilato de sodio y monómero acrilamida. Esta versión usada en los lodos de perforación tiene un porcentaje de 65-70% de acrilamida y el restante porcentaje de acrilato. El peso molecular de este polímero está por encima de los 20 millones.

Su uso comenzó a incrementarse a partir de la década de los 1990 debido a sus propiedades de agente viscosificante y encapsulador de sólidos, tanto como su estabilidad a altas temperaturas y al ataque de bacterias. También se ha encontrado que posee buenas características inhibitorias para lutitas y arcillas reactivas.

El PHPA incrementa la viscosidad del filtrado, lo cual tiene el efecto de limitar la profundidad de invasión del filtrado en la lutita. Además de esto, la acción inhibitoria sobre las lutitas ocurre cuando los grupos aniónicos carboxilos actúan sobre las cargas positivas en los flancos de las partículas de arcilla. Si bien el agua puede penetrar lejos dentro de la lutita, un filtrado viscoso ofrece mayor resistencia debido a la rápida restauración de la presión capilar. Esto trae consigo la reducción de la cantidad de agua filtrada disponible para la hidratación, con lo que se limita que esta ingrese a pequeñas fisuras o planos de fractura en el interior de la lutita.

Los estudios realizados en lutitas han establecido que una relación 70:30 de unidades de acrilamida a unidades de acrilato es óptimo como fluido de perforación. Esto, frecuentemente se refiere como una hidrólisis del 30%. Se cree que el acrilato de alto peso molecular tiene demasiada afinidad con las cargas positivas sobre las arcillas. Los grupos amidas ayudan a poner cierta distancia entre los fuertes grupos carboxilos aniónicos y los puntos catiónicos sobre las partículas de arcillas.

El grupo acrilamida es capaz de formar enlaces de hidrogeno a lo largo de la superficie de la arcilla. En medio salino, el PHPA se mantiene muy efectivo en su capacidad estabilizadora de lutitas, si bien su concentración debe ser incrementada para obtener un efecto significativo sobre la viscosidad del filtrado.

Una de las debilidades del PHPA es su sensibilidad al calcio soluble. Como el acrilato, los puntos carboxílicos aniónicos reaccionan con el calcio. Esto es un problema, particularmente en sistemas de agua fresca, donde el calcio puede precipitar el polímero PHPA, tanto como los sólidos absorbidos por él. En algunos casos, el PHPA funciona como floculante en la presencia del calcio, particularmente cuando el contenido de sólidos es bajo.

En cualquier caso, se recomienda tratar el calcio soluble a niveles inferiores de 300 mg/L en sistemas PHPA. Cuando la concentración de sólidos es relativamente alta (peso de lodo arriba de 10 lb/gal y MBT sobre las 20 Lbm/bbl equivalente de bentonita), entonces es difícil de tratar el calcio. Remover el calcio requiere adicionar una fuente de carbonato, como la Soda Ash o Bicarbonato de Soda, que puede

flocular el sistema.

#### **1.4.2 PERFORACION EN CAMPOS MARGINALES**

El uso de los polímeros se concentra en la perforación de arenas depletadas y con bajo gradiente de presión.

La experiencia a nivel mundial por el uso de polímero PHPA, reflejan la gran capacidad de adaptación con las formaciones a perforarse y los relativos bajos costos de tratamiento previo desecho en áreas de flora y fauna sensibles.

Otro factor importante es conocer la litología de las formaciones a perforarse, esto es, conocer a ciencia cierta problemas que podrán presentarse en el curso de la perforación, con lo que se minimizara futuros problemas que podrían incluso causar la pérdida del pozo.

La zona de Bermejo ha sido perforada anteriormente con lodo base lignosulfonato. El lignosulfonato es un polímero con peso molecular que oscila entre 1000 y 2000. Debido a sus características fue recomendado en esta zona pensando que era lo suficientemente compatible con las formaciones a perforarse.

Durante aquellas perforaciones se presentaron problemas en formaciones superiores altamente permeables y con alto contenido de arcillas hidratables, los que al ponerse en contacto con el filtrado de lodo hacían que se descontrolaran hinchándose y

atascando la tubería de perforación. Por otro lado, el alto contenido de sólidos afectaba gravemente la tasa de penetración y como es de esperarse disminuía la vida de las brocas usadas.

El plan de perforación de los nuevos pozos contempla estos problemas, por lo que se tomó todas las precauciones del caso para evitar se repitan y así controlar todas las variables presentes en una perforación.

## **CAPITULO II**

### **SISTEMA DE LODO DE BASE AGUA/POLIMERO PHPA**

#### **2.1 CARACTERISTICAS DEL FLUIDO DE PERFORACION**

El sistema de lodo seleccionado para las perforaciones proyectadas en Bermejo Sur, debe cumplir con aspectos tanto técnicos como operativos, que permitan llegar a las formaciones objetivo con el mínimo daño posible y suministrar el control necesario para los pozos. Se lo utiliza como alternativa del uso de lodos de base aceite debido a que sus costos de desecho son inferiores a este.

Una de las características generales de un sistema de lodos de bajo contenido de sólidos e inhibitorio es que su reología es inversa, esto es, que su punto de cedencia es mayor o igual a la viscosidad plástica. Cuanto más invertida es la reología menor es el valor de  $n$ . Los valores de  $n$  y  $K$  de la Ley de Potencia son diferentes a los de otros sistemas. También de las pruebas de retorno de permeabilidad se ha determinado que ofrece los mejores resultados.

A continuación se revisarán algunas de las propiedades del sistema PHPA que nos ayudarán a tener una idea más clara acerca de su aplicación.

### PROPIEDADES DEL SISTEMA PHPA

#### 1. DENSIDAD

Es compatible con los agentes densificantes usados.

#### 2. VISCOSIDAD DE EMBUDO

Tiene más de 100 seg/cuarto debido a los polímeros que lo conforman. Generalmente la viscosidad de embudo es menor en la línea de flujo que en la piscina de lodo. Cuando el flujo viaja en la tubería de perforación y fuera de las boquillas de la broca, el polímero se corta y la viscosidad de embudo se reduce. Mientras se mezcla, la viscosidad de embudo es alta y luego es casi similar a la de la línea de flujo. Si la viscosidad de embudo es alta hay que revisar porque. Generalmente sucede cuando hay poca cantidad de polímero en el sistema. Cuando hay alta ROP, los sólidos pueden aglutinarse en el sistema provocando alta viscosidad de embudo. Altas tasas de dilución provocarán también alta viscosidad de embudo, lo mismo desintegración de sólidos de formación.

#### 3. VISCOSIDAD PLÁSTICA

Debe ser considerablemente baja comparada con la de un gel. Esto facilita una rápida penetración y hace que las propiedades del lodo sean más estables.

Mientras se mezcla puede haber incremento en la viscosidad plástica, pero regresa a valores normales cuando entra el corte mecánico.

#### 4. PUNTO CEDENTE

Asegura patrones de flujo laminar que hacen apropiada limpieza del hueco. Los valores de punto cedente son altos, por eso se los usa. Cuando se tiene rangos de densidades +/- 13 lb/gal la relación VP/PC se aproxima a 1:1.

Se los puede usar hasta la profundidad total. El PC oscila entre 20 a 30 lb/100 pie<sup>2</sup> en lodos de iniciación y huecos de gran diámetro, hasta 15-25 lb/100 pie<sup>2</sup> en huecos estrechos y profundidades extremas.

El CEC del lodo afecta el PC. Controlando esto se asegura el PC.

#### 5. RESISTENCIA DE GEL

También tienen valores altos razón por la cual se los utiliza. Resistencias de 10/25/28 son típicas. El peso del lodo usualmente determina la resistencia de gel inicial. En el lodo de +/- 13 lb/gal serán necesarios para mantener la resistencia de gel de 8 a 15 lb/100 pie<sup>2</sup>. Las resistencias de 10 y 30 minutos dependen de la cantidad de polímeros en el sistema en combinación con los sólidos de baja gravedad específica presentes.

El control de LGS es importante para el PC y resistencia de gel en el sistema PHPA. Cuando se incrementan el porcentaje de sólidos se incrementa el valor de la resistencia de gel.

Si en una prueba de 30 minutos el valor de gel es 38, esto indica que el lodo es frágil y puede romperse fácilmente en el corte. Esta prueba es importante para el Ingeniero de lodos.

#### 6. CONTROL DE LA PERDIDA DE FILTRADO

Esto se controla con aditivos. El mismo sistema provee de control de pérdida de fluido (+/- 20 cc/30 min.). El lodo de agua fresca con adelgazante provee de valores menores a 8 cc/30min.

#### 7. CONTROL DE SOLIDOS

El control de sólidos afecta directamente al sistema PHPA. Es responsable del éxito o falla del sistema.

#### 8. COSTRA DE LODO

Hace una fina película tanto como una costra. Cuando incrementa el peso de lodo y el control de filtrado, esta se parece al de sistema de gel, sin embargo es más delgado.

9. MBT (CAPACIDAD DE AZUL DE METILENO)

La capacidad de intercambio iónico promedio de la prueba de azul de metileno se usa para determinar el contenido de sólidos de fluido.

El CEC de la formación debe correrse con frecuencia para estimar con precisión el contenido de sólidos.

10. PH

Permite la estabilización química del hueco. No debe usarse la Soda cáustica cuando se tenga PHPA. El nivel de pH debe estar de 7 a 8.5. Si hay contaminación de cemento y adiciones de Soda Ash para el control de dureza, el pH puede estar encima de 9, entonces se controla con Bicarbonato de sodio para aminorar el pH.

11. ALCALINIDAD DEL LODO (Pm)

Debe monitorearse pero no controlarse. El Pm debe estar entre 0 y 1.0.

12. ALCALINIDAD DEL FILTRADO. (Pf/Mf)

Igual que el anterior. Debe estar entre 0 y 0.5.

El de Mf estará entre 1.0 y 5.0 a veces. Este puede determinarse por la cantidad de bicarbonatos en el sistema. Debido al bajo contenido de sólidos de baja densidad

reactivos en el sistema, la presencia de bicarbonatos en el fluido no es detrimento al sistema y puede ser de menor atención. Esto ocurre en sistemas de agua de mar.

### 13. DUREZA TOTAL

Como calcio, debe ser monitoreado. No debe de mantenerse arriba de 400 ppm. La dureza imposibilita el encapsulamiento de sólidos por el PHPA cuando esta entre 1600-1800 ppm. El calcio puede destruir el efecto viscosificante del PHPA. Con lo que puede darse menores valores de punto cedente y viscosidad y puede generar asentamiento del material densificante.

## **2.2 ADITIVOS DEL FLUIDO DE PERFORACION**

Si bien el sistema de lodo seleccionado es capaz de controlar en buena medida las formaciones a perforar dada la experiencia ganada a nivel mundial con este tipo de sistema, es imperativo agregar aditivos específicos, dirigidos a mantener el diseño del sistema, con lo que se cumplirá de esta forma con el cronograma de trabajo establecido.

Los puntos neurálgicos en los que los aditivos serán empleados se detallan mas adelante.

### **2.2.1 CONTROL DE DENSIDAD**

La densidad del lodo debe ser la suficiente para controlar el pozo y mantenerse

en rangos de operación seguros. Si bien las formaciones objetivo se encuentran depletadas parcialmente, el peso del lodo asegurará no existan reventones y por otro lado no haya sobrebalance que permita fracturar la roca.

El control de la densidad se enfoca a criterios básicos que son:

### REDUCCION DE LA DENSIDAD

Esto se logra:

- a.- Controlando la cantidad de agua
- b.- Agregando materiales de bajo peso específico
- c.- Aplicando las dos técnicas anteriormente mencionadas en conjunto.

El aditivo más usado en este caso en los fluidos de perforación es la bentonita. Su aplicación adecuada reduce la densidad del lodo, aumenta su rendimiento, disminuye costos y pérdida de filtrado. La presentación de la bentonita puede ser en polvo (concentraciones de 1 a 16%) y prehidratada.

### AUMENTO DE LA DENSIDAD

Aumentando la densidad se asegura el adecuado control de las presiones subterráneas y se mejora el desplazamiento del fluido de perforación. Se usará en este caso  $\text{CaCO}_3$  como material densificante cuando se requiera, para lo cual se dispondrá de dos tipos, que son A-100 y A-325.

Además de proveer el peso necesario también sirve como estabilizador de las paredes del hueco en forma de costra dura, la que puede removerse fácilmente usando ácidos cuando se ponga en producción el pozo.

### **2.2.2 CONTROL DE PERDIDA DE CIRCULACION**

Se usara material compuesto de fibras naturales y sintéticas tales como mica y mezclas de fibras, hojuelas y material granular. Los aditivos para perdida de circulación son MICA, KWIK SEAL, Pronto Plug y Nut Plug, los cuales se tendrán como materiales de contingencia en caso que se presente perdida de circulación.

### **2.2.3 ESTABILIDAD DEL HUECO**

Siendo las arcillas hidratables un problema muy serio en Bermejo, se usara generador de hidróxido de aluminio GHA (conocido comercialmente como Alplex) y  $\text{KNO}_3$ .

El GHA es una mezcla de ácidos orgánicos (fúlvico y húmico) con complejo aluminato. El aluminio presente no es tóxico y la prueba aplicada a lodos de perforación bajo la norma EPA establece un  $\text{LC}_{50}$  de 550.000 ppm de fase particulada para 3.0 lb/bbl en sistema PHPA.

La fuente de potasio proviene de  $\text{KNO}_3$ , el que se escogió para no usar  $\text{KCl}$  por tratarse de una fuente de contaminación con cloruros que sería perjudicial al medioambiente. El potasio actúa como estabilizador de lutitas hidratables y también en paquetes de arcillas expansibles presentes en las formaciones a perforarse.

#### **2.2.4 CONTROL DE SÓLIDOS**

Es la función más importante del tratamiento del lodo, ya que el aumento del contenido de sólidos incrementa los costos de perforación.

Se podrá adicionar goma xántica (XCD biopolímero) y/o celulosa polianiónica (PAC) para mejorar la limpieza del pozo, recuperando la mayor parte de los sólidos.

#### **2.2.5 CONTROL DE PRESIONES**

El manejo adecuado de la presión ayudará a prevenir que la presión se fracture y que ocurra súbitamente una pérdida de circulación. Se debe controlar dos variables relacionadas entre sí y que son:

- presión hidrostática del lodo
- presión de circulación

Para esto se debe mantener: peso del lodo, filtrado bajo (costra no debe ser gruesa), paredes firmes, propiedades coloidales del lodo (gelatinosidad baja).

- Para el peso del lodo se usara antiespumante, LD-8 que ayudara que la espuma disminuya el peso requerido y para aumentar el peso  $\text{CaCO}_3$ .
- Para controlar el filtrado se usara Check Loss, Mil Pac R/LV.
- Para mantener las paredes firmes sin derrumbes, Alplex.
- Para las propiedades coloidales se usara adelgazantes como Xanplex D, Ligcon o Desco.

### **2.2.6 CONTROL DE FILTRADO**

El control de filtrado es vital en este programa de perforación, debido a la presencia de arcillas altamente reactivas.

Para evitar una excesiva perdida de filtrado hacia las formaciones con este tipo de problema, se requerirán los siguientes aditivos: Check Loss, Mil Pac R/LV utilizados para el control primario de filtrado; y Aquamagic y Chemtrol X para el control secundario de filtrado.

### **2.2.7 TRANSPORTE Y ENCAPSULACION DE RIPIOS**

Se usaran agentes viscosificantes como Xanplex D, Milgel para ayudar a transportar ripios a la superficie.

También en caso de requerir mejor encapsulación de ripios se adicionara MilPac R y

XCD biopolímero.

### **2.3 CONTROL DEL LODO DURANTE LA PERORACION**

Las propiedades del lodo son afectadas por los cambios en la composición y por lo regular es necesario que algunas de estas encajen dentro de los límites establecidos sin que afecten a las demás. El monitoreo continuo permitirá controlar el sistema de lodo en forma global y de esta forma asegurar el éxito en el programa de perforación.

Las pruebas estándar que ayudaran en el control del lodo son:

#### **1. DENSIDAD DEL LODO**

La densidad se determina usando una balanza para lodos. La densidad se medirá en lb/gal o su equivalente de gradiente de presión en psi/pie, las que se encuentran en las escalas del brazo de la balanza. Los valores se registrarán, de requerirse en lb/pie<sup>3</sup> o peso específico.

#### **2. PROPIEDADES REOLÓGICAS**

Las propiedades reológicas del lodo son importantes para: calcular las pérdidas de presión por fricción, determinar la capacidad de acarreo de sólidos, analizar la contaminación del lodo por sólidos, sustancias químicas o temperatura y determinar

los cambios de presión en el interior del pozo durante un viaje.

Las propiedades reológicas fundamentales son:

#### A. VISCOSIDAD DE EMBUDO

Para las mediciones simples de viscosidad se emplea el embudo de Marsh. Se registra la viscosidad de embudo como el tiempo en segundos requeridos para que un cuarto de galón (946 ml) de lodo pase por un tubo de 3/16 de pulgada colocado a continuación de un embudo de 12 pulgadas de largo. Este es un valor cualitativo del lodo.

#### B. VISCOSIDAD PLÁSTICA, PUNTO DE CEDENCIA Y GELATINOSIDAD

Para una medición más exacta de las características reológicas se usa el viscosímetro Fann de 115 V. En el se obtendrán lecturas a 3, 6, 100, 200, 300 y 600 RPM. Con estas lecturas se obtienen la viscosidad plástica, en centipoises, y el punto de cedencia, en unidades lb/100 pie<sup>2</sup>.

También se usa para determinar las características tixotrópicas el lodo. Para ello se hacen dos mediciones a 10 segundos y 10 minutos luego agitar vigorosamente el lodo a una velocidad de 600 RPM y esperar el tiempo necesario de la lectura que se hará a 3 RPM. Se podrá hacer lectura de gel a 30 minutos con el mismo anteriormente descrito para los otros valores de gel.

### 3. pH Y ALCALINIDAD DEL LODO

El pH del lodo indicara su alcalinidad o su acidez relativas. El rango de 1 a 7 corresponde a un pH ácido y de 7 a 14 a un pH básico. Un pH neutro tiene un valor de 7. El rango habitual de los lodos es de 9.0 a 10.5. El pH afecta la disponibilidad de las arcillas, la solubilidad de varios productos y sustancias químicas, la corrosión de la tubería de perforación y demás equipos en contacto con el lodo y las propiedades reológicas de los lodos.

Para su medida se usara un pH-metro digital calibrado a la temperatura de laboratorio.

La alcalinidad del lodo puede variar a pesar de tener un pH constante. Esto se debe a la cantidad y naturaleza de los iones presentes. Para medir la alcalinidad se precede por un método de titulación estandarizada. Para lo cual se diluye un volumen pequeño de lodo en agua deionizada, luego se agregan pocas gotas de indicador de fenolftaleína. Mientras se agita se titula con ácido sulfúrico hasta que el color rosado desaparezca.

Se reporta este valor como el cuociente del volumen de ácido requerido para el volumen de lodo de la muestra y se conoce como alcalinidad a la fenolftaleína y se designa como Pm.

$$P_m = \frac{(\text{cm}^3 \text{ ácido sulfúrico N/50})}{(\text{cm}^3 \text{ de muestra})} \quad (1)$$

#### 4. CARACTERISTICAS DE FILTRACION

Se realizan dos ensayos similares:

- a) API (temperatura ambiente, baja presión)
- b) API HT-HP (alta temperatura, alta presión)

Para los dos métodos, el lodo se introduce en una cámara que contiene papel filtro. Se sella la cámara herméticamente y luego se inyecta presión con gas CO<sub>2</sub>. El filtrado se recoge en una probeta graduada durante 30 minutos y se reporta como filtrado API.

En la prueba HT-HP se calienta la muestra de lodo a 250 °F y la presión diferencial será de 500 psi. El volumen se recolecta en una probeta graduada durante 30 minutos y este se duplica para reportárselo finalmente como filtrado API HT-HP en 30 minutos.

#### 5. ANALISIS DE FILTRADO

El filtrado se somete a pruebas químicas para controlar la presencia de contaminantes así como el contenido de calcio y cloruros.

Se añaden pocas gotas de indicador de fenolftaleína a un pequeño volumen de filtrado de lodo, luego se agrega ácido sulfúrico estándar en cantidades crecientes y medidas con cuidado hasta que el color vuelva a ser del filtrado original.

El volumen de ácido requerido dividido para el volumen de muestra recibe el nombre

de alcalinidad del filtrado y se denomina como Pf.

$$Pf = \frac{(\text{cm}^3 \text{ ácido sulfúrico N/50})}{(\text{cm}^3 \text{ de muestra})} \quad (2)$$

A la misma muestra titulada para el punto final Pf añadir unas gotas de solución indicadora de naranja de metilo. Luego se añade ácido hasta cambiar el color naranja a rosado.

El cociente del volumen de ácido necesario para el volumen de muestra, mas el valor de Pf se reporta como la **alcalinidad del filtrado al naranja de metilo y se denomina Mf.**

$$Mf = \frac{(\text{cm}^3 \text{ ácido sulfúrico N/50})}{(\text{cm}^3 \text{ muestra})} + Pf \quad (3)$$

Para el análisis de cloruros a la muestra de filtrado se añade unas gotas de indicador fenolftaleína, luego se titula con ácido sulfúrico. Posteriormente se añade agua destilada y unas gotas de cromato de potasio. Se titula después con nitrato de plata.

El cociente del volumen de nitrato de plata para el volumen de muestra se multiplica

por 1000 y se reporta este valor como la concentración de cloruros en ppm.

$$\text{Cl}^- = \frac{(\text{cm}^3 \text{ nitrato de plata}) (1000)}{(\text{cm}^3 \text{ de muestra})} \text{ ppm} \quad (4)$$

Para la dureza total, el volumen de muestra de filtrado se mezcla con agua destilada y un pequeño volumen de solución reguladora de dureza. Se agrega luego suficiente indicador de dureza.

Si se desarrolla color azul agregar unas gotas del filtrado original al recipiente de titulación y cuando el color cambie (debido a la presencia de calcio o magnesio) añadir solución de versenato hasta lograr el color azul.

El cociente del volumen de versenato utilizado para el volumen de muestra se multiplica por 1000 y se registra como la dureza total del filtrado. El calcio se calcula multiplicando este último resultado por 0.4.

$$\text{Dureza Total (como CaCO}_3) = \frac{(\text{cm}^3 \text{ versenato estándar}) (1000)}{(\text{cm}^3 \text{ de muestra})} \text{ ppm} \quad (5)$$

Para el contenido de cal se necesita la fracción de agua en la prueba de la Retorta, para lo cual se utiliza la siguiente ecuación

$$\text{Cal, lb/bbl} = 0.26 (\text{Pm} - \text{Fw} * \text{Pf}) \quad (6)$$

donde, Fw es el porcentaje de agua de la retorta, en volumen y se calcula así:

$$\text{Fw} = \frac{\% \text{ agua, volumen}}{100} \quad (7)$$

## 6. ANALISIS DE LOS SOLIDOS

El contenido de los sólidos afecta la mayor parte de las propiedades de los lodos, incluyendo su densidad, viscosidad, gelatinosidad, pérdida de fluido y estabilidad de temperatura. Los elementos importantes en el análisis de sólidos son: el contenido de arena, el contenido total de sólidos, el contenido de aceite, el contenido de agua y la capacidad de intercambio catiónico.

Arena, según definición API, abarca las partículas de tamaño mayor que una malla 200 (74 micrones). El procedimiento para el ensayo API consiste en diluir la muestra de lodo en agua, lavarla luego a través de un cedazo de malla 200. Las partículas retenidas en el cedazo se lavan luego y se hacen pasar a un tubo de contenido de arena. Después se hacen sedimentar y se reporta el contenido de arena API.

Los sólidos totales, agua y aceite se determinan usando la retorta. Un pequeño volumen de lodo se coloca en la retorta y se calienta. La fracción líquida se evapora,

se condensa y se recolecta en una probeta graduada. Si hay aceite, se leen directamente y se reportan. El volumen restante lo constituyen la fracción sólida del lodo, que es el volumen total de sólidos. Si el lodo contiene sal, se aplican factores de corrección antes de convertir los volúmenes a porcentajes finales.

Un control preciso del lodo de perforación requiere que se hagan algunas mediciones sobre el porcentaje de arcillas bentónicas presentes. Un ensayo especial para arcillas con elevada capacidad de intercambio catiónico cumple este propósito. Este es el Ensayo de Azul de Metileno (MBT).

Para este ensayo, se diluye una pequeña muestra de lodo, se trata con peróxido de hidrógeno y con ácido, se hierve luego suavemente. Luego se añade solución de azul de metileno en volúmenes crecientes. Después de cada adición se coloca una gotita sobre papel filtro. El punto final se alcanza cuando aparece en el papel un anillo azul verdoso. Las libras por barril de arcilla bentónica son proporcionales al volumen total de colorante requerido para alcanzar el punto final.

$$\text{MBT lb/bbl equivalente bentonita} = 5 * \text{CEC} \quad (8)$$

donde CEC (capacidad de intercambio catiónico) viene dado por:

$$\text{CEC} = \frac{(\text{cm}^3 \text{ de azul de metileno})}{(\text{cm}^3 \text{ de muestra})} \quad (9)$$

## 7. TEMPERATURA

Las propiedades reológicas del lodo y la eficacia de varios aditivos son afectadas por la temperatura.

Las temperaturas en el interior y en el fondo del pozo son de gran importancia, pero no es posible determinarlas con facilidad. La medición de la temperatura en la línea de descarga mediante un termómetro ordinario permite tener una indicación razonable de las condiciones en el fondo del pozo. Las propiedades reológicas se determinan a esta temperatura de descarga.

### **2.4 RELACION DEL SISTEMA DE LODO USADO CON LA TASA DE PENETRACION**

Las propiedades del lodo que afectan la tasa de penetración son las siguientes:

1. Peso del lodo
2. Contenido de sólidos y tipo de sólidos
3. Viscosidad del lodo
4. Tasa de filtración y pérdida inicial de filtrado

## 5. Fase líquida

### 1. PESO DEL LODO

Estudios realizados acerca de esta propiedad del lodo de perforación han demostrado que la tasa de penetración es inversamente proporcional al peso del lodo.

Debido a esto, un bajo peso de lodo permitirá obtener mayores tasas de penetración, lo que contribuirá a disminuir costos de perforación.

### 2. CONTENIDO DE SÓLIDOS Y TIPOS DE SÓLIDOS

El incremento en el contenido de sólidos, especialmente los de carácter indeseable, hacen que disminuya la tasa de penetración. Generalmente se puede distinguir por los siguientes síntomas en el lodo:

- a. Alta viscosidad (que no mejora con los tratamientos químicos).
- b. Baja pérdida de filtrado.
- c. Torta gruesa.

Por consiguiente, el mantenimiento de un nivel de sólidos mínimos permitirá el mayor avance posible en la perforación del pozo.

### 3. VISCOSIDAD DEL LODO

Se ha determinado que un lodo liviano a altas tasas de corte, resultará en tasas de penetración mas altas con un lodo pesado, si es que no ocurren cambios en las propiedades del lodo.

En particular, la magnitud de la viscosidad plástica depende principalmente del volumen y la forma de las partículas de los sólidos en el lodo y de la viscosidad del liquido. Es muy útil en el control de campo como un índice de comportamiento de sólidos.

Para cualquier sistema de lodo, la adición de sólidos, agentes orgánicos para el control de filtrado o petróleo incrementa la viscosidad plástica.

### 4. TASA DE FILTRACION Y PERDIDA INICIAL DE FILTRADO

Se ha encontrado a través de la experiencia de campo una relación directa entre la ROP y la tasa de filtración, por lo que al disminuirse esta ultima, disminuirá la tasa de penetración.

Siendo este sistema de lodo de bajo contenido de sólidos, es común tener un filtrado menor de 6 cc y casi nada de perdida inicial (spurt loss). También es común la formación de una costra delgada.

## 5. FASE LIQUIDA

El efecto de la fase líquida puede ser más que sustancial. Siendo la fase continua agua, permitirá mantener controlada la fase discontinua (sólidos) por medio de adelgazantes, de así requerirse, con lo que se buscare incrementar la tasa de penetración apoyándose en este criterio.

### 2.5 PROPIEDADES DE FLUJO

Es de suma importancia controlar las propiedades físicas del lodo para que el rendimiento del mismo sea el mejor, logrando de esta manera optimizar el flujo y minimizar problemas en las operaciones de perforación.

Analizaremos varios aspectos acerca de las propiedades de flujo:

#### A) COMPORTAMIENTO DE FLUJO DEL LODO DE PERFORACION

Se han desarrollado varios modelos reológicos para aproximar el comportamiento de flujo de estos fluidos, aquí se trataran: modelo plástico de Bingham, modelo de la Ley de Potencia y modelo de la Ley de Potencia Modificada.

##### 1. Modelo Plástico de Bingham

Es el que más se utiliza en el campo, por ser el modelo más simple para fluidos no-newtonianos. El modelo se apoya en datos proporcionados a partir de un viscosímetro

Fann-VG. Los dos parámetros son la viscosidad plástica y el punto cedente. Estos valores se determinan fácilmente de las lecturas del dial a 300 y 600 RPM, respectivamente.

La ecuación matemática para este modelo es:

$$F = PC + \frac{VP}{300}R \quad (10)$$

donde,

F = lectura del dial en lb/100<sup>2</sup>,

PC = punto cedente, lb/100<sup>2</sup>

VP = viscosidad plástica, cp

R = velocidad de corte, RPM

## 2. Modelo de la Ley de Potencia

Este modelo es mucho más consistente con el tipo de lodos de campo y su uso es mucho más adecuado para un fluido no-newtoniano. Su uso es recomendado a veces a velocidades bajas, las tensiones de corte exceden en mucho a aquellas descritas por el modelo de Bingham. Esto, particularmente, para los lodos no-dispersos de bajo contenido de sólidos.

Esto se explica porque las velocidades de corte en el espacio anular están frecuentemente en un rango que correspondería a velocidades de Fann debajo de 60 RPM, este es un rango en el que el modelo de Bingham no se aproxima a los verdaderos valores de la reología del lodo.

La ecuación matemática para este modelo es:

$$F = K * R^n \quad (11)$$

Donde:

F = lectura del dial, lb/100<sup>2</sup>

K = factor de consistencia de flujo laminar

n = índice de comportamiento de flujo laminar

Los valores de K y n se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$n = 3.32 \log (F600/F300) \quad (12)$$

$$K = F300/ 300^n \quad (13)$$

Donde el valor de K viene dado en  $\text{lb}/100^2\text{-RPM}^n$  y el valor de n es adimensional.

Para lodos no-dispersos el valor de n esta entre 0.4 y 0.7 y altamente dispersos esta entre 0.7 y 0.9. El valor de K se considera similar a la viscosidad plástica, dado que si aumenta K significa un aumento en la concentración de sólidos. Los mejores métodos para controlar K son el control mecánico de sólidos y la dilución.

La tasa de corte R esta relacionada a su vez con la tasa de bombeo del lodo y los diámetros del hueco y la tubería:

$$R = \frac{34,52 * Q}{(D_h - D_p)^2 (D_p + D_h)} \quad (14)$$

donde:

R = tasa de corte en RPM.

Q = tasa de bombeo, gal/min.

D<sub>h</sub> = diámetro del hueco, pulg

D<sub>p</sub> = diámetro de la tubería, pulg.

### 3. Modelo de la Ley de Potencia Modificada (Herschel-Bulkley)

Igual que la anterior, pero esta vez toma en consideración el valor de gelatinosidad inicial del lodo. La ecuación que describe esta Ley es:

$$F = G_o + K * R^n \quad (15)$$

Donde:

$G_o$  = gel “cero” (conocido como gel instantáneo o gelatinosidad inicial)

Este modelo se encuentra entre los dos métodos antes descritos y se acerca mas estrechamente con el comportamiento reológico de la mayoría de los lodos.

#### B) DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACION

Indica el limite máximo de presión que resiste la formación antes de ser fracturada, por lo que se hace necesario conocer las perdidas de presión durante la perforación y circulación del lodo.

La densidad equivalente de circulación viene dada por:

$$ECD = \rho + \frac{\Sigma Pr}{0.052 * Z} \quad (16)$$

donde:

$ECD$  = densidad equivalente de circulación, lb/gal

$\rho$  = peso del lodo, lb/gal

$\Sigma Pr$  = sumatoria de pérdidas de presión, por secciones de tubería, psi

Z = profundidad vertical real, pies.

C) PRESIONES DE SURGENCIA

Para estimar las presiones de surgencia requeridas para romper los esfuerzos de gel, las ecuaciones que ayudan a calcularla son las siguientes:

$$APL = \frac{3,75 * F_{300}}{(Dh - Dp)^{2n+1}} \left\{ \frac{Q}{8,69*(Dh - Dp)} \right\}^n \quad (17)$$

para la condición laminar, psi/ 1000 pies

$$APL = \frac{163,67 * \rho * Q^2}{R_{NC} * (Dh - Dp)^3 * (Dh + Dp)^2} \quad (18)$$

para la condición turbulenta, psi/1000 pies y  $R_{NC}$ , el numero de Reynolds para flujo turbulento es usualmente 2000.

Para conocer la tasa de flujo crítico  $Q_c$ , para establecer que ecuación se debe usar, tenemos la siguiente ecuación:

$$Q_c = (Dh^2 - Dp^2) * \left\{ \frac{R_{NC} * F_{300}}{43,64 * \rho * [8,69 * (Dh - Dp)]^n} \right\}^{\frac{1}{2-n}} \quad (19)$$

Si  $Q < Q_c$ , entonces el flujo es laminar

Si  $Q > Q_c$ , entonces el flujo es turbulento.

## **CAPITULO III**

### **CIRCUITO DEL LODO DE PERFORACION**

Los equipos que constituyen el sistema de circulación son los siguientes:

- A) Bombas de lodo
- B) Tubería vertical, manguera de lodo, unión giratoria, cuadrante.
- C) Instalación de perforación.
- D) Línea de retorno de lodo.

Conforme se avanza en la perforación se requiere de mayor potencia en las bombas de lodo. Para incrementar la tasa de bombeo se usan bombas de doble acción y de camisas intercambiables dispuestas en paralelo, con lo que además se dispondrá de mayor potencia.

La instalación de perforación referente al circuito del lodo comprende:

#### **3.1 TANQUES**

Son los depósitos en los que se concentran los fluidos de perforación y son de tres

tipos:

1. Tanque de succión.
2. Tanque de tratamiento químico.
3. Trampas de arena.

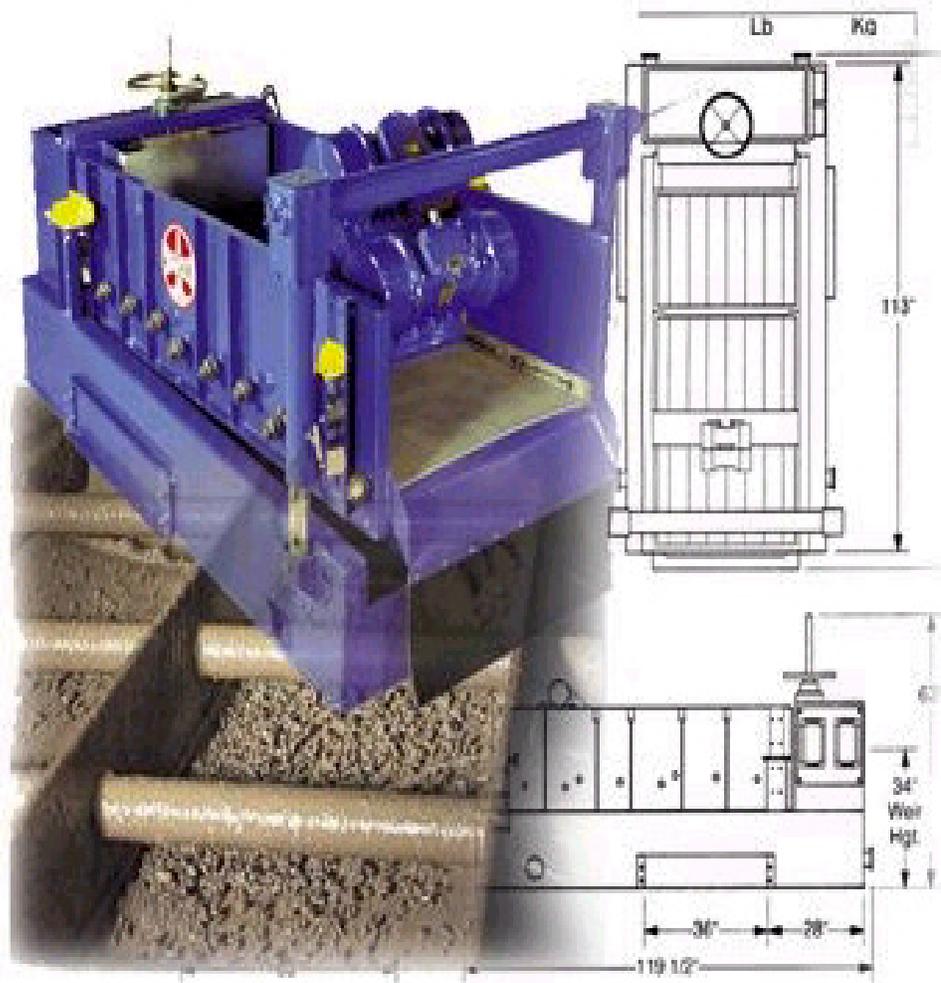
La capacidad total de estos tanques es de 900 bbl. Se dispone también de un tanque para viajes (Trip Tank) que se utiliza para recolectar el lodo desalojado durante un viaje o maniobra. El volumen de este tanque es de 20 bbl.

### **3.2 ZARANDAS VIBRATORIAS**

La zaranda vibratoria es el primer y mas importante de los depósitos para el control mecánico de sólidos. Es un separador vibratorio compuesto por tamices que se emplean para remover los ripios grandes arrastrados por la corriente de lodo. Ver Fig. 3.1

A menudo la selección de un tamiz esta basada en experiencias anteriores. La malla de un tamiz se define como el numero de orificios por pulgada lineal, medidos desde el punto medio de un alambre. Por ejemplo, una malla 40x30, tendrá 40 orificios por pulgada en una dirección y 30 orificios por pulgada en dirección perpendicular a la primera. Una malla con números de orificios diferentes se llama oblonga. Si tiene un mismo numero de orificios en ambas direcciones se llama cuadrada.

El lodo de retorno debe extenderse sobre la mayor parte posible de la superficie del tamiz empleado, para lo cual se cuenta con las compuertas de control de alimentación



**Fig 3.1 ZARANDA VIBRATORIA**

ubicadas sobre el “falso vientre” y la superficie del tamiz. La inclinación óptima del tamiz vibratorio es la que procese la mayor cantidad de partículas. Se deben realizar ajustes del ángulo del tamiz, los que afectan la velocidad de recorrido del lodo y el tiempo de retención. Los ajustes del ángulo de inclinación del tamiz deben hacerse antes de decidir el tamaño de malla. Un tamiz dañado o cortado debe reemplazarse inmediatamente.

Para la perforación se usaran zarandas vibratorias en paralelo con tamaños de mallas de 80x80 y 100x100.

Los rípios que salen de las zarandas son transportados en un tornillo sinfín, desecados con cal y luego son dispuestos para su desecho.

### **3.3 CENTRIFUGAS**

Las centrifugas de decantación aumentan la velocidad de sedimentación de los sólidos mediante el reemplazo de la débil fuerza de gravedad, por la fuerza centrífuga. La centrifuga de decantación consiste de una cámara cónica horizontal de acero que rota a alta velocidad con un doble transportador de tipo tornillo en su interior. Este transportador rota en la misma dirección que la cámara externa pero a una velocidad ligeramente menor. Se inyecta lodo en el eje del hueco del transportador, desde donde el lodo es lanzado hacia las paredes internas del cono, cerca del anillo de lodo denominado el estanque. El nivel de este estanque es

determinado por la altura de las compuertas de salida del líquido en el extremo mayor, de la cámara cónica.

La lechada corre entonces hacia los orificios, a través de dos canales del lodo formados por las hojas del transportador, mientras los sólidos se sitúan contra la pared interna de la cámara. A medida que estas partículas sedimentan hacia la pared, las hojas del transportador las empujan a lo largo de la cámara hacia el extremo más pequeño. Finalmente, los sólidos salen del estanque a través de una área seca (la playa) donde quedan desprovistos de todo líquido libre, para salir de los orificios de descarga en el extremo más pequeño de la centrifuga.

Generalmente, cuanto más alta es la viscosidad del lodo original, mayor es la dilución necesaria (se recomienda de 2 a 4 galones por minuto). La viscosidad del efluente debe ser de 35 a 37 segundos, para que la operación sea eficiente. Si la viscosidad está por arriba de 37 segundos, eficiencia disminuirá debido a la menor velocidad de sedimentación. Si la viscosidad está por debajo de 35 segundos se está añadiendo agua en exceso, lo que causará turbulencia en la cámara, por lo tanto la eficiencia disminuirá. Deben seguirse con suma atención las recomendaciones de los fabricantes con respecto a las tasas de alimentación y a la velocidad de la cámara.

Los aumentos de viscosidad y de resistencia de gel en el lodo, son las mejores indicaciones que deben emplearse la centrifuga.

### **3.4 DESARENADORES**

El desarenador es un hidrociclón de 12 pulgadas, los cuales hacen un “corte” en el rango de tamaños de 40-45 micrones. El desarenador es usado usualmente con lodos de bajo peso cuando se requiere retirar gran cantidad de agente densificante hasta sólidos de perforación.

Cada cono de 12 pulg manejará 500 gal/min. a las presiones de alimentación recomendada en cabeza hidrostática requeridas en la succión (70-75 pies). El número de conos debería de seleccionarse para que el desarenador pueda procesar 125% del volumen de circulación.

Con una descarga a chorro, el peso del subflujo debería estar entre 2.5 y 5.0 lb/gal mas pesado que el lodo en la succión, si la unidad trabaja adecuadamente. Si el lodo original de la succión tiene aproximadamente menos del 6 % de arena, el superflujo de lodo mostraría solo una traza de arena

Se utiliza para evitar la sobrecarga de los desarcilladores.

### **3.5 DESARCILLADORES**

El desarcillador es un hidrociclón de 4 pulgada, el cual hace un corte en el rango de tamaño de 20 –25 micrones. El desarcillador es normalmente usado con lodo de bajo peso. El número de conos depende del volumen de lodo circular. Se

requiere tener una capacidad de entrada a los conos por lo menos igual a la velocidad de circulación y se recomienda que tal capacidad este mejor entre 20 y 50 por ciento mas arriba. En un cono de cuatro pulgada bien diseñado, el tamaño de partícula separado es de 15 a 20 micrones.

Otro tipo de desarcillador es el Limpia-lodos (Mud-cleaner), que generalmente tiene 8 conos de 4 pulgadas, colocadas encima de un tamiz de malla fina y alta vibración. Ver figura 3.2.

El tamaño de malla de los tamices de los limpia-lodos varia entre 120 y 325. Si el limpia-lodos ha de trabajar continuamente se considera generalmente que una malla de 150 puede mantener limpio el sistema de lodo con eficacia.

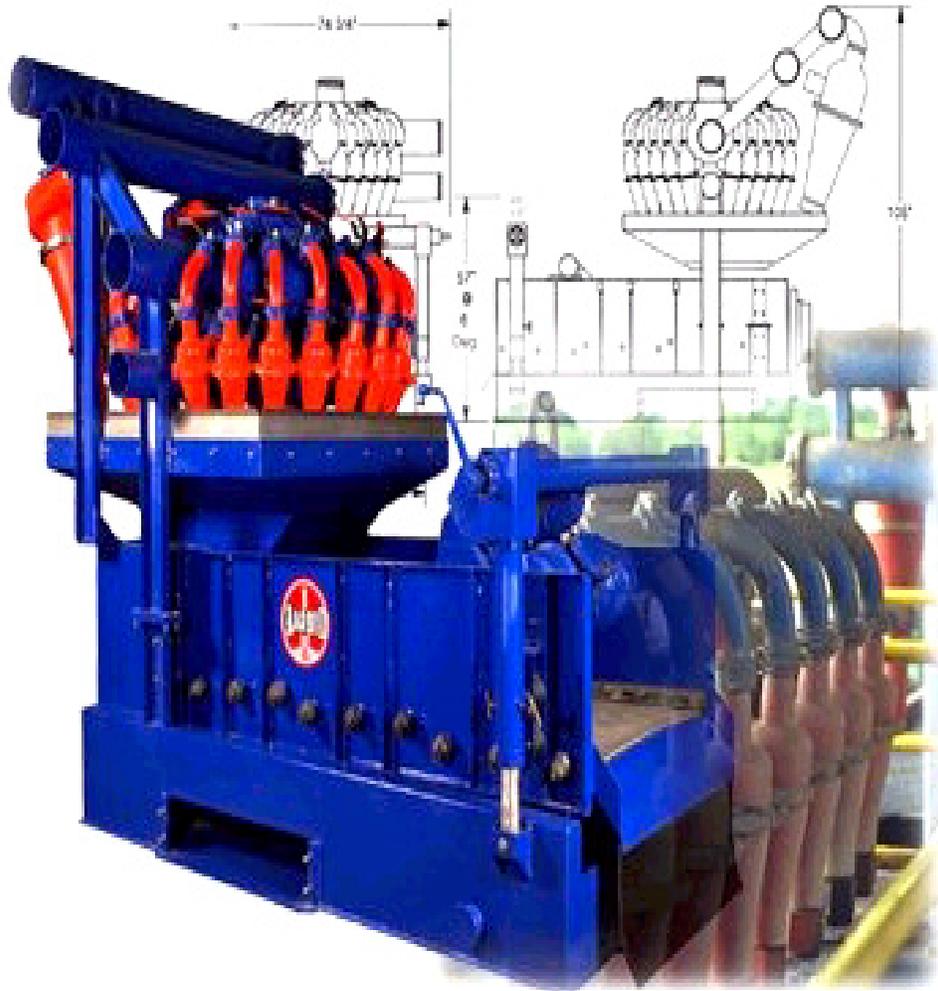
Si bien la remoción de sólidos de perforación y la recuperación de la barita son los usos más comunes de los limpia-lodos, la recuperación de fases liquidas costosas (petróleo,  $KNO_3$ , etc.) junto con la barita, puede ser sumamente ventajosa. Otra ventaja es que el material descartado del tamiz vibratorio es notablemente mas seco.

### **3.6 DESGASIFICADOR**

Sirve para eliminar el gas del lodo de perforación y se recomienda instalarlo antes del desarenador y el desarcillador, asegurando una eliminación óptima de los gases de formación que contiene el lodo, ya sea como gas libre o en solución.

También es de uso necesario como equipo de contingencia para eliminar el contenido

de  $H_2S$  y  $CO_2$  que usualmente se presenta en esta zona.



**Fig 3.2 LIMPIA-LODOS**

## **CAPITULO IV**

### **CALCULOS Y PROBLEMAS ESPERADOS DURANTE LA PERFORACION**

El diseño inicial del sistema de lodo depende de la información recolectada de las perforaciones realizadas anteriormente en el Campo Bermejo. Un control continuo de las propiedades del lodo permitiría establecer un modelo optimo del comportamiento de este, con lo que se ira mejorando el conocimiento de las relaciones de las formaciones perforadas con el sistema de lodo y sus aditivos.

Los cálculos ponen en relieve las correspondencias existentes entre las muchas variables que intervienen en una perforación. Se ha considerado aquí que el equipo de perforación funciona de forma óptima, por lo que solamente se toma en primer plano la hidráulica del lodo.

Se podrá notar que las muchas variables pertenecientes a la hidráulica, guardan una estrecha relación entre sí, y que si afecta una de ellas, es de esperarse que influya en las demás en menor y mayor grado, según sea el caso.

#### **4.1 INFORMACION GEOLOGICA DE LA ZONA**

El Bloque Bermejo se encuentra en el Norte de la Cuenca Oriente, en la zona subandina, la cual es una zona tectónicamente inestable en la que se distingue el levantamiento Napo, levantamiento ocurrido en el Plioceno y con un rumbo N-S. Además, se encuentra afectada por un grupo de fallas de edad reciente de dirección N-S, siendo la principal el Frente de Empuje.

El levantamiento Napo tiene una extensión de 150 Km y un ancho de 40 Km, con elevaciones de hasta 3900 m, como el caso del volcán Sumaco.

El objetivo principal del programa de perforaciones, es continuar con el desarrollo del flanco oriental de estructura Bermejo Sur y con esto, delimitar la extensión de los reservorios Basal Tena y Hollín.

#### DESCRIPCION DE LA COLUMNA LITOLOGICA

- **Cuaternario**
  - Aluvial: grava poco consolidada. Alternancia de arenisca
  - Arena: color gris verdoso, friable a firme, predominando el tamaño de grano fino a medio; gránulos, sorteo pobre, angular-subangular, no calcáreo; localmente conglomerático, compuesto por cuarzo y líticos volcánicos.

- **Terciario**
  - **Tiyuyacu (superficie a 800 pies):** alternancia de limolitas, arcillolitas rojas, suaves a moderadamente duras esporádicamente con trazas de anhidrita. Arenisca de cuarzo de cuarzo con tamaño de grano fino a medio. A la base conglomerado de Chert, color de gris a café rojizo, masivo con gránulos de cuarzo y chert, fragmentos volcánicos, matriz arenosa.
  - **Tena (800 a 3300 pies):**
    - Limolita: color marrón-moteado, suave a modernamente dura, alternada con trazas de arenisca de cuarzo, friable, tamaño de grano fino, subangular compuesto de cuarzo, cemento calcáreo.
    - Arcillolita: color castaño rojizo, ocasionalmente moteada, suave.
    - Lutita: gris oscura, poco físil, laminada, levemente calcárea.
  - **Basal Tena (3300 a 3350 pies) (objetivo secundario):**
    - Arenisca: gris blanquecina, grano fino a grueso, compuesta por encargo, subangular redondeada, sorteo regular, cemento silíceo, levemente calcáreo. Con hidrocarburo: fluorescencia amarilla verdosa, corte lento a medio, residuo café.

- **Cretácico**
  - **Napo (3350 a 4580 pies):** esta formación contiene varias zonas de interés y son productivas en la Cuenca Oriental Ecuatoriana.
    - Caliza M-1
      - Lutita: color gris, oscuro a negro, dura a físil, laminada, levemente calcárea.
      - Caliza oolítica micrítica: color gris-oscuro-negro, con trazas de hidrocarburo de fluorescencia amarilla-verdosa, corte muy lento.
    - Caliza M-2
      - Caliza: gris-oscuro-gris-blانquecina, masiva;
      - Caliza clástica: de color negro en laminaciones blanquecinas, con trazas de hidrocarburos.
    - Caliza A
      - Caliza: gris oscura, dura, masiva.
    - Caliza B
      - Caliza: gris oscuro a negro, masiva dura, ocasionalmente piritizada.
    - Basal Napo
      - Caliza micrítica: color gris blanquecina, dura, masiva con presencia de glauconita.

- Lutita color gris oscuro. Generalmente calcárea y ocasionalmente con glauconita, las permeabilidades de las arenas pueden causar perdidas altas y de pega diferencial, especialmente si se aumenta el peso del lodo en la formación Tena.
  
- **Hollín (4580 a 5000 pies):**
  - **Hollín Superior**
    - Arenisca: gris blanquecina, firma, tamaño de grano fino con cuarzo y ocasionalmente con glauconita, angular-subangular-sorteo regular, cemento silíceo y calcáreo, alternado con lutita gris oscura, físil, milonitizada.
  
  - **Hollín Inferior**
    - Arenisca: gris clara hialina, friable a firme, tamaño de grano fino a medio, cuarzo, angular a subangular con leve cemento calcáreo.

Esta formación puede causar pérdidas lentas o pegas diferenciales debido a las arenas de alta permeabilidad.

## 4.2 DISEÑO Y CALCULOS HIDRAULICOS

### a) DISEÑO

Básicamente, el diseño hidráulico se concentra en las propiedades reológicas del lodo que permitan establecer:

- La capacidad de acarreo de ripios del sistema de lodos; y
- La máxima limpieza del hueco con la presión en superficie disponible.

Con esto se evitará el embolamiento de la broca y retriturar los recortes que no fuesen levantados a superficie con lo que se maximizará la ROP.

Se puede escoger cualquiera de los siguientes métodos para el diseño de la hidráulica del sistema:

1. Impacto Hidráulico
2. Potencia Hidráulica sobre la broca
3. Velocidad en las toberas

### b) CALCULOS

Lo principal en todo cálculo hidráulico es determinar cual es la potencia hidráulica disponible en superficie. La ecuación para el cálculo de la potencia en superficie es:

$$H_{ps} = \frac{P_s * Q}{1714 * \eta} \quad (20)$$

donde,

$H_{ps}$  = potencia en superficie, hp

$P_s$  = presión de superficie, psi

$Q$  = tasa de flujo disponible, gal/min

$\eta$  = eficiencia de la bomba, adimensional.

Basados en la estadística de los parámetros hidráulicos, principalmente en Bermejo Sur, se recomienda que la presión de la bomba no debe exceder de 1250 psi y la velocidad anular frente a la tubería de perforación no debe ser menor a 125 pies/min.

### 1) IMPACTO HIDRAULICO

Para el cálculo del Impacto Hidráulico se utilizará las siguientes ecuaciones:

Área de las toberas:

$$A_n = 0.000767 * \Sigma(\text{Jet}_i^2), \text{ pul}^2 \quad (21)$$

Impacto Hidráulico:

$$I_j = 1.73 \times 10^{-4} * \rho * Q^2 / A_n \quad (22)$$

$I_j$  = impacto hidraulico, lbf

$Q$  = tasa de flujo, gal/min

$\rho$  = densidad del fluido, lb/gal

## 2) POTENCIA HIDRÁULICA SOBRE LA BROCA

La distribución de la potencia hidráulica de superficie es dada por la siguiente ecuación:

$$H_{ps} = H_{pc} + H_{pb} \quad (23)$$

La máxima potencia hidráulica sobre la broca se obtiene cuando:

$$H_{pc} = 0$$

Esto es,

$$H_{pb} = 0.65 * H_{ps} \quad (24)$$

cuando la presión en superficie es limitada.

Caída de presión en la broca:

$$P_b = \frac{V_j^2 * \rho}{1120}, \text{ psi} \quad (25)$$

Caballaje en la broca:

$$H_{pb} = \frac{P_b * Q}{1174}, \text{ hp} \quad (26)$$

Caballaje en la broca por unidad de área:

$$H_{pb}/\text{Area} = \frac{H_{pb}}{A_b}, \text{ hp/pulg}^2 \quad (27)$$

$$A_b = 0.7853 D^2 \quad (28)$$

donde:

$A_b$  = área de la broca,  $\text{pulg}^2$

Porcentaje de caída de presión en la broca:

$$\%P_b = \frac{P_b}{P_p} * 100 \quad (29)$$

Donde,

$P_p$  = presión en la bomba, psi

$P_b$  = presión en la broca, psi

### 3) VELOCIDAD EN LAS TOBERAS

$$V_j = 0.32086 * Q/A_n, \text{ pie/seg} \quad (30)$$

Velocidad anular:

$$V_a = \frac{24.51 * Q}{D_h^2 - D_p^2}, \quad (31)$$

Donde,

$V_a$  = velocidad anular, pie/min

$D_h$  = diametro del hueco, pulg.

$D_p$  = diametro de la tubería respectiva, pulg.

$Q$  = tasa de bombeo, gal/min.

### C) LIMPIEZA DEL HUECO

INDICE DE ACARREO DE RIPIOS:

$$CCI = \frac{\rho * K * V_a}{400.000} \quad (32)$$

Se dice que hay buena limpieza del hueco cuando CCI es mayor o igual a 1.

$$K = F_{300} * 511^{(1-n)} \quad (33)$$

$K$  = factor de consistencia de flujo laminar, en cp.(Ley de Potencia)

### TIEMPOS DE CIRCULACIÓN

Desde el fondo a la superficie:

$$BU = \frac{42 * V_{anT}}{Q} \quad (34)$$

Tiempo de circulación total (superficie-fondo-superficie)

$$TCT = \frac{42 * (V_{anT} + C_T + V_{PITS})}{Q} \quad (35)$$

BU = desde el fondo, minutos

TCT = tiempo de circulación total, minutos

$V_{anT}$  = volumen anular total, bbl

$C_T$  = capacidad total de la tubería de perforación y collares de perforación, bbl

$V_{PITS}$  = volumen total circulado de los tanques, bbl.

Q = tasa de flujo en gal/min.

### 4.3 PROGRAMA DE LODOS

El tipo de lodo de perforación es seleccionado en base a las presiones que se esperan en los yacimientos tanto como por el grado de depleción en el cual se encuentren.

Usualmente se elige los polímeros como fluido de perforación cuando el gradiente de presión de reservorio es menor de 0.4 psi/pie.

Para las perforaciones a realizarse en Bermejo Sur se propone dividir la operación en dos intervalos y con dos tipos de fluidos de perforación debido a la importancia relativa de estos.

Los intervalos serán denominados I y II y la discusión detallada por intervalo se expone a continuación:

#### INTERVALO I

Este intervalo comprende el hueco de superficie, el cual se extiende hasta los 1000 pies de profundidad aproximadamente. El tipo de lodo para este intervalo es bentonita extendida con Benex (nombre comercial del copolímero vinil acetato maleico).

Para perforar este intervalo se contara con material de contingencia en caso de pérdida de circulación, el cual consiste de 75 barriles con alta concentración de fibras.

Se comenzara preparando 500 bbl lodo nuevo para limpiar la grava que reside en la superficie y que queda luego de la colocación del caño conductor. Se estima la tasa de dilución en 1.0 a 1.5 barriles por pie, pero podría aumentar esta tasa si la arcilla cerca de la superficie se hinchara demasiado o si la viscosidad se incrementara de manera súbita.

Previamente el contenido de sólidos perforados se dejara incrementar a 5-6% por volumen hasta implementar el programa de control por dilución. Al llegar al 6% por volumen el contenido de sólidos se mantendrá hasta el final de la perforación del intervalo. Se añade soda cáustica para mantener el pH sobre 9.0 lo que permitirá hidratación parcial y floculación de los sólidos perforados, con lo que obtendrá la viscosidad necesaria para la limpieza del agujero hasta la profundidad de asiento del casing de superficie. La adición principal para la dilución será agua para mantener la densidad durante todo el tiempo debajo de 9.3 lb/gal.

Se usaran las mallas mas finas que se dispongan en las zarandas. Se optimizaran los equipos de control de sólidos incluyendo las centrifugas. Si bien los pozos vecinos a los pozos planificados experimentaron perdidas de circulación parciales y otros totales no se espera que estos casos se repitan aquí. Se añadirá agente controlador de perdidas de filtrado a una proporción de 5.0 lb/bbl.

La tasa de bombeo debe ser de al menos 125 pie/min de velocidad anular frente a la tubería de perforación. La presión de bombeo debe la suficiente para levantar los cortes a la superficie y no debe de exceder los 1250 psi para evitar de esta forma fracturar la formación.

Para remover los cortes se usara exclusivamente la velocidad anular, sin embargo se usara adicionalmente algo de viscosidad. La bentonita pre-mezclada para iniciar la perforación y las arcillas nativas hidratadas con pH sobre los 9.5 darán viscosidades de embudo de 40 a 50 seg/cuarto. Si la viscosidad se incrementa mas allá de 60

seg/cuarto se deben usar dispersantes. De producirse incrementos demasiados rápidos en la viscosidad de embudo y se tiene evidencias de que se están formando anillos de lodo se puede usar SAPP (piro fosfato ácido de sodio).

De llegar a incrementarse la carga de sólidos en el fluido se producirán embolamientos de la broca y estabilizadores lo que ocasionara que la ROP disminuya. Para evitar esto se pueden usar píldoras de barrido de agua con PHPA en concentraciones de 3 a 4 lb/bbl. Se puede usar píldoras de Penetrex con agua fresca y Nut Plug (cáscaras de nueces) y luego bombearlas en el hueco y estabilizadores sin hacer un viaje fuera del agujero.

La limpieza del hueco debe calcularse usando programas hidráulicos, para conocer la reología del fluido, la tasa de bombeo y la tasa de penetración.

Al final del intervalo el filtrado debe disminuirse a menos de 12 cc. Debe de obtenerse una buena costra de lodo para lograr correr el casing con éxito. Para asegurarse una buena limpieza al final del intervalo se debe de incrementar el punto cedente a mas de 25 usando pequeñas cantidades de Mil Pac (celulosa polianiónica) y/o XCD (goma xántica).

## INTERVALO II

El tipo de lodo recomendado para este intervalo es PHPA con Alplex (nombre comercial del GHA generador de hidróxido de aluminio). Este intervalo se ha

dividido en tres secciones para atacar de mejor forma los problemas que puedan presentarse.

#### SECCION 1000 a 2000 pies

Antes de perforar el cemento del casing de superficie se debe botar todo el lodo y limpiar los tanques de lodo. Previo a la perforación de la zapata del casing ha de mezclarse 18 lb/bbl de  $\text{KNO}_3$  y 4.0 lb/bbl de Alplex en los tanques de superficie.

Luego de perforar el cemento se reduce el contenido de  $\text{Ca}^{++}$  debajo de 200 ppm con soda ash y luego se empieza a añadir PHPA y PAC R hasta reducir el filtrado a 6 cc.

El sistema propuesto consiste solamente de polímero PHPA, Alplex y  $\text{KNO}_3$ .

Este mejorara la ROP y maximizará el riesgo de tener problemas de embolamientos de la broca debido a la encapsulación de los ripios y su posterior remoción.

Este sistema es suficiente para llegar sin contratiempos a la formación Basal Tena. Se requerirá al mismo tiempo  $\text{CaCO}_3$  que servirá como agente densificante y de puenteo, el que permitirá sellar las capas de arena altamente permeables. La concentración de PHPA se incrementara de 0.6 a 0.75 lb/bbl, manteniendo la concentración de Alplex 3 a 4 lb/bbl y se necesitará mantener los sólidos lo mas bajo que se pueda.

Para esta sección es importante mantener la tasa de dilución de 0.5 a 0.75 lb/bbl de agua por pie perforado con lo cual se estima será suficiente para controlar el lodo.

Una vez que se precipite el  $\text{Ca}^{++}$  del cemento se empieza a adicionar polímero XCD para incrementar el punto cedente arriba de 14 lb/100 pie<sup>2</sup>. Se monitoreará el MBT y los sólidos perforados para ajustar la cantidad de agua adicionada. El MBT deberá estar por debajo de 15 y los sólidos perforados menos del 6% por volumen. Para todo el intervalo se estima que el volumen total de dilución será de unos 1200 barriles.

Controlando el peso del lodo y la presión en la bomba será imprescindible para evitar fracturar las formaciones perforadas con lo que no se tendrán pérdidas de circulación.

#### SECCION 2000 a 4250 pies

Antes de llegar a la formación Basal Tena la perdida de filtrado deberá ser de 6 cc con adiciones de Mil Pac R/LV. Para aumentar el peso del lodo se puede recurrir a adiciones de  $\text{CaCO}_3$  A-100. El peso del lodo se puede incrementar a 9.5 lb/gal antes de llegar a los 3500 pies y solo cuando se observe presencia de derrumbes en la zaranda se puede adicionar mas cantidad del mismo. Esto será una decisión bastante difícil debido a que en esta parte hay que balancear las fuerzas tectónicas sin fracturar la formación.

La reología del lodo debe de controlarse continuamente para aprovechar sus propiedades para esta sección, la viscosidad con la velocidad anular es todavía el método de limpieza. El punto cedente debe estar como mínimo en un valor de 15 lb/100 pie<sup>2</sup>.

El MBT, calidad de los cortes, contenido de sólidos, el torque y arrastre deben monitorearse continuamente. Si el MBT y el contenido de sólidos se llegara a incrementar se puede adicionar mas Alplex y PHPA. Constatando si los cortes que llegan hasta las zarandas son de apariencia normal, la concentración de estos (Alplex y PHPA) se pueden reducir. Por otra parte las centrífugas y los equipos de control de sólidos deben operar a su punto de eficiencia con lo que se minimizara el contenido de aditivos en el lodo.

#### SECCION 4250 a 5000 pies

El filtrado se reducirá a menos de 6 cc y mantenido hasta llegar a las zonas objetivo para producción. La costra se controlara a través de las pruebas de laboratorio. El  $\text{CaCO}_3$  A-100 y A-325 en una relación de 2:1 ayudarán a formar una costra dura en la cara del hueco en conjunción con el PAC. El punto cedente debe mantenerse arriba de 20 lb/100 pie<sup>2</sup> desde el tope de la formación Napo para asegurarse que los ripios son removidos mas eficientemente hasta la superficie.

La densidad del lodo al perforar la lutita de la formación Napo estará entre 9.6 a 10.0 lb/gal. De existir derrumbes el peso se incrementará con  $\text{CaCO}_3$  hasta 10.2 lb/gal y con la ayuda del  $\text{CaCO}_3$  se evitara la formación de una costra gruesa y perdida de filtrado.

El contenido de Alplex encima de 2.0 lb/bbl mantendrá el pH entre 10.3 y 10.7. Además el contenido de sólidos no debe incrementarse mas allá del 7% en volumen.

#### **4.4 CUADRO COMPARATIVO**

Esencialmente el tipo de lodo para los tres pozos es el mismo. Hay una variante en el pozo #2 en el que ya no se utiliza KNO<sub>3</sub> debido a problemas de inestabilidad de la lutita de Napo, que se cree se deba a la actividad del ión potasio.

##### **4.4.1 PARÁMETROS DEL LODO PARA EL POZO #1**

Para el pozo #1 los parámetros de trabajo están dados en la TABLA I.

##### **4.4.2 PARÁMETROS DEL LODO PARA EL POZO #3**

Los parámetros del lodo para el pozo #3 están dados en la TABLA II.

##### **4.4.3 PARÁMETROS DEL LODO PARA EL POZO #2**

Los parámetros del lodo para este pozo están en la TABLA III

**TABLA I**

<b>INTERVALO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>@ TOPE DE BASAL TENA</b>	<b>DESDE BASAL TENA @ PT</b>
Peso del lodo	Lb/gal	8.9-9.5	9.5-10.0
VP @ 120° F	cp.	10-12	15-25
PC @ 120° F	Lb/100 pie <sup>2</sup>	12-20	15-25
VE	Seg/cuarto	38-45	45-65
Geles @ 120° F	Lb/100 pie <sup>2</sup>	5/12+	5/12+
Filtrado API	Cc/30 min.	< 6	4-6
MBT	Lb/bbl equiv. Bent.	< 15	5-10
Sólidos perforados	% volumen	3-6	2-3
pH	Adimensional	10.3-10.6	10.3-10.6

**TABLA II**

<b>INTERVALO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>@ TOPE BASAL TENA</b>	<b>BASAL TENA @ PT</b>
Peso del lodo	Lb/gal	8.5-9.1	9.5-10.0
VP @ 120° F	cp	10-12	15-25
PC @ 120° F	Lb/100 pie <sup>2</sup>	12-20	15-25
VE	Seg/cuarto	38-45	45-65
Geles @120°F+/-30%	Lb/100 pie <sup>2</sup>	5/12+	5/12+
Filtrado API	Cc/30 min.	< 6	4-6
MBT	Lb/bbl equiv. Bent.	< 15	5-10
Sólidos perforados	% volumen	3-6	2-3
pH	Adimensional	10.3-10.6	10.3-10.6

TABLA III

<b>INTERVALO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>@ TOPE DE BASAL TENA</b>	<b>DESDE BASAL TENA @ PT</b>
Peso del lodo	Lb/gal	8.5-9.1	9.5-10.0 o como se requiera
VP @ 120° F	cp.	<12	15-25
PC @ 120° F	Lb/100 pie <sup>2</sup>	12-20	15-25
VE	Seg/cuarto	38-45	45-65
Geles @ 120° F	Lb/100 pie <sup>2</sup>	4/6-6/8	5/7-8/10
Filtrado API	Cc/30 min.	<= 6	<4
MBT	Lb/bbl equiv. Bent.	< 12	<12
Sólidos perforados	% volumen	Máximo 6	Máximo 6
pH	Adimensional	10.6-11.6	10.6-11.6

#### **4.5 ANALISIS DE COSTOS DEL SISTEMA DE LODO**

Al escoger el tipo de lodo para perforar los pozos en Bermejo Sur no solo se busco a aquel sistema que sea más compatible con las formaciones y de fácil tratamiento previo desecho sino también el que ofrezca mejores ventajas económicas en la perforación.

Al controlar el costo de lodo se minimiza el costo global de la perforación, por lo que es necesario establecer la concentración adecuada de los aditivos utilizados para de esta forma optimizar los gastos.

Los costos aquí analizados tienen que ver con:

1. Costos de lodo vs. Profundidad
2. Incremento de Costos de lodo vs. profundidad
3. Costos de lodo vs. Tiempo de perforación
4. Incremento de Costos de lodo vs. Tiempo de perforación

#### **4.6 OPTIMIZACION DEL FLUJO DEL SISTEMA**

Para las perforaciones de los pozos propuestos en la zona de Bermejo Sur se optimizara el flujo del sistema con la implementación de un sistema de desecado (dewatering), mediante el cual se recuperará la parte acuosa del mismo y se retirara la fase sólida.

La fase acuosa de lodo recuperada podrá ser reutilizada dentro del sistema de circulación del lodo cuando así se lo requiera, con lo que minimizara la operación de la bomba de succión de agua del río. Cuando no se necesite la fase acuosa será enviada al sistema de tratamiento existente en la locación para luego ser dispuesta.

El equipo esta básicamente compuesto de:

- Tanque de desecado (1)
- Centrífuga de desecado (1)
- Bomba de succión (1)
- Bomba de aire (1)
- Bomba de descarga (1)

Los sólidos aquí generados serán dispuestos en conjunto con los ripios a la zona de descarga.

#### **4.7 PROBLEMAS ESPERADOS DURANTE LA PERFORACION**

Debido al historial de problemas que se presentaron durante la perforación de pozos en Bermejo y especialmente en Bermejo Sur, se tomó en consideración los más importantes. Es por eso que se analizó en detalle los factores que ocasionan tales problemas y que a continuación se exponen:

#### **4.7.1 HINCHAMIENTO DE ARCILLAS**

Durante la perforación de los pozos es importante mantener el control de las arcillas. Las formaciones superiores en su mayoría están compuestas de minerales de arcilla, por lo que el riesgo de hinchamiento es crítico. Cuando la presión diferencial entre la arcilla sea mayor que la del pozo causará problemas de hueco apretado.

Para conocer de que tipo de arcillas se encuentran formados estos estratos se hizo una prueba de difracción de rayos X con núcleos tomados en afloramientos de la formación Tiyuyacu. Posterior a esto se realizó varias pruebas entre algunos lodos de perforación propuestos, muestras de agua de formación y los núcleos, para conocer que tipo de lodo es más compatible.

#### QUIMICA DE LAS ARCILLAS

Las arcillas son definidas como materiales cristalinos finamente divididos, con unidades de tamaño menores a 2 micrones. Los principales elementos constitutivos de estos minerales de arcilla son arreglos bidimensionales de aluminatos o de octaedros de magnesio-oxígeno-hidroxilos. En muchos minerales de arcilla las plaquetas tetraédricas son superpuestas sobre plaquetas octaédricas en diferentes posiciones.

La simetría análoga y dimensiones casi idénticas de las plaquetas tetraédricas y octaédricas permite la comunicación de los átomos de oxígeno entre las plaquetas.

Cuando la comunicación de los átomos de oxígeno ocurre entre una plaqueta de silicato y otra de aluminato resulta en un tipo de mineral de arcilla biestratificado.

Un mineral de arcilla triestratificado resulta cuando una plaqueta de aluminio o magnesio es emparedada entre dos plaquetas de silicato.

La distancia entre un cierto plano y el plano correspondiente en la próxima plaqueta es llamada el **espaciamiento c**. Las mediciones hechas a través de difracción de rayos X determinan que el espaciamiento c entre un mineral de arcilla biestratificado está entre 7.1 – 7.2 Å (angstroms) y entre un mineral de arcilla triestratificado es al menos de 9.2 Å.

La reactividad de arcillas depende de la sustitución aleatoria de los átomos en los bordes de la partícula de la arcilla o en los estratos de la unidad. En presencia de agua los cationes de las superficies de la partícula de arcilla son intercambiados por otros cationes cuando están dispuestos en solución. Los minerales de arcilla difieren en la cantidad de carga negativa disponible y de sus habilidades para absorber e intercambiar cationes con aquellos presentes en la solución. La magnitud de reacción sigue el orden de la capacidad total de intercambio de los minerales, que son: Kaolinita < Illita < Minerales de Capas mezcladas < Montmorillonita.

Generalmente, la energía de ligadura tiene el siguiente orden: calcio > magnesio > potasio > hidrógeno > sodio. Sin embargo, en la Kaolinita y la Bentonita Wyoming la energía de ligadura es Magnesio > Calcio. Los cationes divalentes con fuerte energía

de ligadura son capaces de ocupar las posiciones de intercambio preferiblemente de los iones monovalentes.

Las unidades de arcillas monoestratificadas son neutras o negativamente cargadas. Si por ejemplo, el ión magnesio reemplaza al ión aluminio en el monoestrato, entonces existirá un electrón sobrante y la partícula tendrá una carga negativa. La carga negativa es compensada por la adsorción de un catión. El catión puede ser adherido en el interior o exterior de la pila de plaquetas de arcilla. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) de las arcillas es una medida de la habilidad de una arcilla específica para captar cationes. Los valores típicos de CEC para las montmorillonitas, kaolinitas, e ilitas son respectivamente: 80-100, 2-10, y 20-40.

#### TRATAMIENTO DE LAS ARCILLAS

La inhibición se alcanzó con el uso de PHPA,  $\text{KNO}_3$  y Alplex (complejo aluminato), lo que comprometió el uso de estos compuestos en el sistema de lodo. La inhibición se espera sea efectiva para superar este tipo de problema durante la perforación de los pozos programados.

#### **4.7.2 PEGAMIENTO DE TUBERIA**

Este problema se presenta cuando se acumulan ripios alrededor de la tubería de perforación o cuando se embola la broca. Esto último sucede cuando se perfora lutitas

compuestas de minerales de arcilla jóvenes y que se conocen con el nombre de “gumbo”.

A continuación se presenta una lista de varios tipos de formas adicionales en las que la tubería puede pegarse:

- Por presión diferencial
- Asentamiento de ripios y material densificante
- Puenteo debido a la inestabilidad del hueco
- Solidificación del lodo o cemento

Las formas para identificar una pega diferencial de tubería son:

1. La sarta de perforación se vuelve inmóvil cuando comienza a pegarse
2. Una formación permeable esta expuesta en el hueco
3. El hueco puede ser circulado con presión normal de bomba
4. La sarta de perforación no puede ser recíprocada o rotada
5. El lodo tiene alta concentración de sólidos y alta pérdida de fluido
6. El peso del lodo ha sido incrementado recientemente

Una de las recomendaciones hechas para sobrellevar este tipo de problemas es mantener el hueco tan derecho como sea posible y de ocurrir el pegamiento, la circulación del lodo debe de mantenerse para que continúe la acción de lavado.

Los métodos para liberar la tubería son:

- Lavar la tubería con agua limpia
- Lubricar la tubería para reducir la fricción
- Rotar la tubería, de ser posible.

Otra causa además de las antes vistas, es cuando se forman cavernas en donde los recortes se acumulan. En este caso la circulación es interrumpida o se incrementa la presión de circulación.

Para liberar la tubería en este tipo de caso se usan cualquiera de los siguientes métodos:

- Si nos posible circular el fluido, se para la bomba y se libera la presión. Se debe trabajar lentamente, para tratar de despegar la tubería.
- Si la circulación del fluido es posible pero limitada, hay que circular agua limpia para ayudar a remover los ripios de los contornos de la tubería.
- Si el paso 2 es insuficiente, es necesario lubricar la tubería para reducir la fricción.

#### ACERCA DE LA PRESION DIFERENCIAL DE PEGAMIENTO

Este tipo de pegamiento de la tubería con la costra del lodo, esta ligada cuando la presión del fluido de perforacion es mayor que la presión de poro de la formación.

Además los movimientos frecuentes de la tubería son normales cuando se perfora con lodo pesado, ya que reducen el área de contacto entre los lastrabarrenas la costra de

lodo. Esta área de contacto es mayor cuando el espesor de la costra es mas gruesa, por esta razón se debe controlar la tasa de filtración.

La fuerza de pegamiento es descrita por la siguiente ecuación:

$$F_s = \Delta p * A * f$$

$F_s$  = fuerza de pegamiento o fuerza necesaria para liberar la tubería, lbs,

$\Delta p$  = diferencial de presión, psi

$A$  = área de contacto entre tubería y la costra de lodo, pulg<sup>2</sup>

$f$  = coeficiente de fricción entre la tubería y la costra de lodo, adimensional.

Cuando las brocas de diamantes se usan en la perforacion, es común el mover la broca dentro de la ultima instalación de casing cada 24 horas (viaje corto), con el objeto de remover un excesivo filtrado de lodo y mantener el pozo abierto.

Si hay severo “pateperro” (desviación del pozo) la tubería puede producir una zanja en la pared que es profundizada con el tiempo. Este efecto puede ocasionar un gran problema de “ojo de llave” tanto en el lastrabarrenas y la broca no podrán ser removidos del pozo y este tipo de atascamiento es reconocido en el campo por el gran incremento de fuerza para mover la tubería.

La manera mas común de liberar la tubería pegada es lubricándola con aceite o con un lodo a base de aceite.

### 4.7.3 PERDIDA DE CIRCULACION

Este es un problema muy serio en esta zona, por lo que es de mucha atención en este programa de perforación.

Las pérdidas de circulación se deben a la infiltración del lodo en la formación que se esta perforando. Esto puede ocurrir cuando la presión total del lodo excede la presión total de la formación.

Las pérdidas de circulación ocurren principalmente en los siguiente tipos de formación:

1. Formaciones fracturadas: que incluyen fracturas naturales que son originadas durante o después de la perforación o debido a cambios repentinos de formación, cuando se sobrepasa el gradiente de fractura por el excesivo peso del lodo o altas presiones de surgencia y densidades equivalentes de circulación.
2. Formaciones de alta permeabilidad: como arenas masivas, capas de conchas o depósitos de acantilados. Se manifiesta por perdida gradual y continua y retorno parciales.
3. Formaciones altamente porosas: incluye arenas, capas de gravas y depósitos de acantilados. Estas se reconocen por perdidas parciales que empiezan lentamente y se incrementan con la penetración.

4. Formaciones cavernosas o vugulares: como calizas, dolomitas, tizas y otras con porosidad secundaria. Se reconocen por la pérdida repentina y completa.

Esta última es la más probable en Bermejo por su geología. Las 2 y 3 son tratados de forma similar. Se trata el lodo circulante con materiales finos de pérdida de circulación como Mica, Pronto Plug, Check Loss y OM Seal con adición de otro químico que contribuya a la formación de costra como Milgel y  $\text{CaCO}_3$ . Manteniendo la densidad del lodo baja, reduciendo la posibilidad de acumulación de sólidos en el anular mientras se perfora y tratar de evitar las excesivas tasas de circulación y presiones de bombas.

#### MEDIDAS PREVENTIVAS

1. Usar fluidos lo menos densos posible, vía optimización de equipos de control de sólidos.
2. Monitorear y controlar la reología para minimizar presiones de suabeo, surgencias, fricción anular (ECD) y velocidad de viajes de tubería.
3. Romper circulación en etapas, mientras se esta bajando tubería en el hueco y mantener resistencias de gel de 10 y 30 minutos en valores bajos.
4. Minimizar todas las restricciones anulares.
  - Optimizar la hidráulica de la broca y el uso de aditivos para prevenir el embolamiento de la misma (Neodol 25-9 en hueco superficial y Penetrex y/o Biodrill en el hueco principal).

- Controlar la tasa de penetración para evitar la carga excesiva de sólidos en el anular (se recomienda no perforar a mas de 50n pie/hora).
- Evitar la formación de una excesiva costra de lodo mediante la reducción de las ratas de filtración.
- Usar un sistema de lodo inhibitorio para protegerse del hinchamiento y las arcillas pegajosas.

Si bien estas medidas pueden resultar suficientes los riesgos de perdida de circulación están latentes, por lo de producirse las mismas como medida primaria resultara en el uso de fibras mezcladas con bentonita y alta viscosidad, que será suficiente y de esta forma obtenerse retorno. De producirse perdidas totales se tiene que recurrir a medios mas eficaces para combatir el problema, como es el uso de tapones de diesel oil-bentonita.

#### TAPON DE DIESEL OIL-BENTONITA

400 lb de bentonita por 1 bbl de diesel rinde=1.42xDiesel

.Procedimiento del squeeze:

1. Localizar la zona de perdida y bajar tubería con broca de menor diámetro
2. Mezclar un volumen de lechada equivalente o mayor que el volumen del hueco debajo de la zona de perdida.
3. Proceder la lechada con 5 bbl de diesel oil y bombear la lechada a la broca. Siga la lechada con 5 bbl de diesel oil y luego lodo.

4. Cuando la lechada empieza a salir de la sarta de tubería, cerrar el preventor anular y bombear lodo dentro del anular a 2 bbl/min. mientras se desplaza la lechada dentro de la tubería de perforación a 4 bbl/min.
5. Después de desplazar la mitad de la lechada de la sarta de perforación, reducir la tasa de bombeo a 1 bbl/min en el anular y 2 bbl/min. en la tubería de perforación.
6. Después de desplazar  $\frac{3}{4}$  partes del volumen de la lechada en la sarta de perforación, realizar una prueba de presión de inyección de comprobación (hesitation squeeze pressure) de 100 a 500 psi (bombear y parar)
7. Desplazar la lechada dejando un barril de fluido en la sarta de perforación; levantar la tubería lo suficiente hasta que este libre de la pídora previo al bombeo del volumen remanente dentro de la tubería.
8. Sacar la tubería fuera del hueco y dejar reposar de 8 a 10 horas antes de reanudar operaciones.

Si se requiere un tapón más duradero debe seguirse un procedimiento similar utilizando iguales cantidades de cemento y bentonita en la lechada de diesel. Mezclando 150 lb de bentonita y 150 lb de cemento en 72 barriles de diesel se obtendrá 100 bbl de mezcla.

#### **4.7.4 LUTITAS DESMORONABLES**

Las lutitas están compuestas de minerales de arcillas. Normalmente se distingue a las arcillas de las lutitas por la forma como estas fallan ante los esfuerzos

de corte, pero generalmente la distinción se la hace debido a que las arcillas presentan comportamiento plástico y las lutitas no.

Las lutitas se las clasifica por edad, contenido de agua, contenido de arcilla y tipo de dureza de la lutita. Frecuentemente, mas de uno de los criterios antes mencionados son usados para clasificar o describir una lutita. Por ejemplo, las arcillas bentoníticas jóvenes, suaves, de alto contenido de agua de los deltas de ríos en el mundo por convención se las define como arcillas reactivas. Las lutitas viejas, duras, de bajo contenido de agua de ocurrencia en áreas de rocas duras en el mundo se definen como lutitas no reactivas.

#### FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD DE LAS LUTITAS

##### A) HIDRAULICA ANULAR

La hidráulica anular es la fuente de mayores problemas en la estabilidad del hueco. Debe ajustarse la tasa de bombeo y la reología del lodo para colocar el flujo dentro del régimen laminar para evitar el erosionado de las paredes del hueco en la zona de lutitas. Ver Fig.4.1

##### B) PRESIONES DESBALANCEADAS

Las lutitas son inherentes al campo de rocas débiles bajo esfuerzos compresionales, de esta forma cuando una arcilla o lutita contiene una presión significativamente

mayor que la presión del hueco, la lutita caerá hacia el pozo, causando inestabilidad y ensanchamiento del hueco. Un ajuste en las propiedades físicas del lodo (peso del lodo) para balancear la presión del pozo y la presión de formación ayudara a resolver este problema.

Un ajuste en las propiedades químicas del lodo no causara un cambio en las presiones del pozo y no ayudara a controlar la parte de la presión de el problema.

El reconocimiento de las presiones desbalanceadas no siempre es fácil. Mucha gente asocia las presiones desbalanceadas con una arremetida del pozo o una perdida de circulación. Las lutitas son poco permeables. Es posible perforar lutitas en pozos cuasi-verticales con presiones del pozo menores que la presión de formación sin causar un reventón. Una indicación directa de la presión de desbalance en las lutitas es la inmediata inestabilidad del hueco, con problemas de torque, arrastre, hueco apretado y exceso de recortes de lutitas en la zaranda mientras se perfora a través de secciones de lutitas o arcillas.

Esto ultimo es asumiendo que el perfil de flujo anular es suficiente para levantar los recortes formados y que no erosionan las paredes del hueco.



**FIG. 4.1 ESQUEMA DEL MOVIMIENTO TURBULENTO DE LOS RIPIOS**

### C) LUTITAS NATURALMENTE FRACTURADAS

En muchas partes del mundo donde los procesos de levantamiento de cordillera tuvieron efecto y se encuentran en acción (esfuerzos tectónicos), las lutitas han sido levantadas y plegadas, con la consecuencia de esfuerzos severos y fracturamiento excesivo. Cuando se perfora estas secciones de lutitas la estabilidad del hueco es siempre un problema. La lutita tiene una tendencia natural a caer dentro del hueco debido a que los fragmentos de la lutita se desmoronan en forma descontrolada. No hay una forma efectiva de cementar los fragmentos de lutita unos con otros. Debe por lo tanto evitarse flujo turbulento, presiones desbalanceadas e hidratación de las lutitas para no complicar esta condición original.

Los aditivos asfálticos ayudaran a sellar los flancos expuestos de las lutitas de forma similar a sellar con breya una fisura en un techo. Es principalmente una acción hacia la superficie y afecta primariamente la lutita expuesta en el hueco.

Estos materiales no alteran de forma apreciable las condiciones dentro del cuerpo de la lutita.

Cuando se perfora a través de lutitas con alto esfuerzo tectónico debemos considerar y controlar los siguientes factores:

- a. Asegurar el perfil de flujo correcto en hueco abierto
- b. Asegurar que se tenga adecuado peso de lodo para balancear la presión de formación.

NOTA: la ausencia de un reventón no asegura que la presión esta balanceada.

- c. Asegurarse que el sistema de lodo es inhibitorio y que esta acorde con la economía de la perforación del pozo.

Alterando las propiedades del lodo tales como pérdida de fluido o cambio del sistema de lodo es una operación bastante costosa y debe ser considerada solamente luego que los puntos a y b hayan sido alcanzados. En muchos casos, cambios en los puntos a y b no resolverán los problemas en las lutitas, pero reducirán su severidad a un punto tal que puede ser tolerado sin mayores cambios en los costos en el sistema de lodo.

# **CAPITULO V**

## **DISCUSION DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS POR LA OPTIMIZACION DEL SISTEMA DE FLUIDO DE PERFORACION**

Para este tipo de análisis de los resultados obtenidos en la perforación de los tres pozos en Bermejo Sur se ha tenido a bien de hacerlo por pozo, para luego obtener conclusiones al respecto y dar las recomendaciones del caso a fin de mejorar la perforación en esta zona y en general en Campos Marginales donde se esta usando este tipo de fluido de perforación

### **5.1 PERDIDAS DE CIRCULACION**

Las pérdidas de circulación acaecidas en el pasado, durante la perforación de los primeros pozos de desarrollo del campo Bermejo no se han suscitado en el presente. Por el uso eficiente del equipo de control de sólidos, el tipo de fluido de

perforación y los aditivos se obtuvo resultados aceptablemente buenos, los cuales pudieron apreciarse en las operaciones diarias.

Durante la perforación de los tres pozos no se tuvo problemas de pérdida de circulación, ya que se controló continuamente el peso, contenido de sólidos y reología del lodo.

## **5.2 INHIBICION DE LAS ARCILLAS HIDRATABLES PRESENTES**

Las arcillas presentes en las formaciones superiores (desde la superficie hasta Tena) están compuestas, según un análisis de difracción de Rayos- X, de minerales de cuarzo, illita, plagioclasa, Kaolinita y Minerales de Capas Mezcladas.

La proporción en la cual se encuentran estos minerales varía, pero en ellos los minerales de capas mezcladas se tiene más del 90% de capas expandibles, por lo que se tenía que formular un sistema de lodo inhibitorio que permita controlar el hinchamiento de las arcillas.

Las pruebas hechas para seleccionar el sistema de lodo estuvieron orientadas a cubrir esta parte del problema. Es por eso que se usó adicional al polímero PHPA, Alplex y  $\text{KNO}_3$ .

El uso de Alplex responde a una antigua tradición del complejo aluminato para inhibir las lutitas compuestas de arcillas hinchables y problemáticas. El  $\text{KNO}_3$  en

cambio se lo usa como sustituto del KCl como agente inhibidor de arcillas, puesto que en esta parte del Oriente el problema de la sensibilidad del medioambiente hace que se minimicen las descargas de efluentes alta concentración de cloruros que provendrían del KCl.

No se tuvo problemas de hinchamiento de arcillas en los pozos #3 y #1, en los que se uso el aditivo  $KNO_3$ , mas en el pozo #2 hubo problemas en toda la sección de arcillas. En el pozo #2 se tuvo problemas de embolamiento de la broca y atascamiento de la tubería de perforacion. En las zarandas se noto la presencia de recortes de consistencia plástica que provenían con seguridad del hinchamiento de las arcillas de algunas de las formaciones que las contienen.

Estas arcillas al expandirse atrapaban secciones de la tubería, por lo que hacia indispensable el uso de aditivos para desatascar la tubería y el embolamiento de la broca. Pero al inyectar Penetrex con Alplex se notaba que era insuficiente para lograr este objetivo, dando como resultado el retiro de la sarta del hueco. Esto contribuyo a incrementar el tiempo programado para perforar el pozo, dando como resultado el incremento de los costos de perforacion.

En forma general las arcillas hidratables y la bentonita en particular, forman una pasta que llega a saturarse entre los dientes y los conos de la broca ocasionando una gran reducción en la tasa de penetración.

La integridad del hueco estaba en peligro por lo anteriormente expuesto, así que fue una mala decisión el retirar el KNO<sub>3</sub> para el pozo #2.

### **5.3 MANTENIMIENTO DE LA ESTABILIDAD DEL HUECO**

La estabilidad del hueco era uno de los factores más importantes que se tenía presente.

La principal causa que produce la inestabilidad del hueco es la acción de la lutita de la formación Napo, puesto que se encuentra bajo esfuerzos tectónicos que la han deformado y esta se presenta muy microfracturada y mecánicamente débil.

Para controlar el efecto de inestabilidad en las lutitas de la formación Napo se necesita:

- Controlar el tiempo de exposición (ROP)
- Controlar la invasión de filtrado (Filtrado HT-HP)
- Usar elementos sellantes (carbonato de calcio, Check Loss, asfalto)
- Minimizar la presión diferencial
- Mantener en lo posible flujo laminar en la cara de la lutita y evitar la acción erosiva de la corriente del lodo.
- Mantener buenas practicas de perforacion
- Mantener geles bajos.

#### **5.4 CONTROL DE LAS LUTITAS DESMORONABLES**

Las lutitas de la formación Napo se comportaron muy inestables durante la perforación. En los dos primeros pozos perforados se observó en las zarandas la presencia de derrumbes de la lutita. Además hubo problemas en la corrida de registros eléctricos, lo que motivó el incremento del peso del lodo para mantener las paredes del pozo y así evitar que se siga derrumbando y poder correr registros sin mayor inconvenientes.

El uso de asfalto cuando se perfora en la lutita para el tercer pozo ayudó a minimizar el problema.

#### **5.5 CONTROL DEL DAÑO DE FORMACION**

El daño de formación se minimiza controlando las tasas de filtración en las formaciones objetivo.

Para el caso de los pozos #3 y #1 aun no se conocía como se comportaría el lodo con respecto a las formaciones, pero se estimaba que el factor de daño estaría en una magnitud menor a la unidad. Luego de las pruebas de pozo realizadas se estableció que la invasión de filtrado en la Formación Hollín había llegado muy lejos.

Esto se debió en gran parte al incremento del peso del lodo para controlar las paredes del pozo por los derrumbes en la lutita Napo. Esto ocasionó que el diferencial de

presión existente entre la columna hidrostática del lodo y la formación Hollín haga que el filtrado ingrese sin poder controlarlo.

En este transcurso el peligro de perder el pozo sopesó para tomar esta decisión, con las consecuencias antes anotadas.

Generalmente el daño asociado por la intrusión del filtrado del lodo en la formación productiva se debe en mayor o menor grado al hinchamiento, desestabilización y migración de las arcillas que se encuentran formando parte de la arenisca.

La mayoría de las arcillas de los yacimientos son no hinchables, sino que se dispersan y sufren migración de finos.

Cuando el reservorio contiene arcillas de capas mezcladas el problema es mayor, debido a que al hincharse ciertas arcillas se rompe el empaquetamiento y quedan en mayor libertad de migrar.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

1. El lodo utilizado (de bajo contenido de sólidos, no disperso e inhibitorio) resultó ser eficaz para perforar formaciones que tengan bajos gradientes de presión.
2. El poder encapsulador del polímero PHPA se ve mejorado cuando el nivel de calcio en el lodo se encuentra por debajo de 400 ppm.
3. El potasio ofrece el medio salino apropiado para ayudar al sistema de polímero en la inhibición de muchas de las arcillas expansibles que se tienen en Bermejo. La eliminación del  $\text{KNO}_3$  en el programa de lodos del Pozo#2 y su reemplazo por mas GHA, no resultó eficiente para controlar arcillas y lutitas reactivas. Por lo tanto, el uso del GHA no debe recomendarse para el control de este tipo de formaciones.

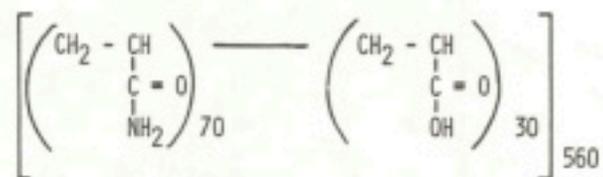
4. Las lutitas de la formación Napo está intensamente microfracturada y sometida a fuertes esfuerzos tectónicos, por lo que el sistema de lodo a base de polímero PHPA es insuficiente para mantener las paredes del hueco. El uso de asfalto a base de glicol en conjunto con el sistema de lodo resulta muy efectivo en este caso para ayudar a estabilizar la lutita.
5. Para incrementar la tasa de penetración debe asegurarse la buena limpieza del agujero por medio de la reología del lodo en conjunto con los equipos de control de sólidos.
6. .-Las trampas de arena en el sistema de tanques deben de usarse cuando la dilución ya no sea efectiva para reducir el contenido de sólidos en el lodo.
7. El polímero XCD (goma xántica) ayuda a mantener el punto cedente con lo que asegura la buena limpieza del hueco.
8. El fluido con mayor capacidad de sello contendrá una óptima concentración de bentonita comercial,  $\text{CaCO}_3$  y muy bajo contenido de sólidos, que se entiende que un fluido con estas características podrían tener una costra de filtrado delgada e incompresible.

9. Los agentes sellantes son usados en el fluido para prevenir la propagación de fracturas, naturales e inducidas, de esta forma restringiendo el movimiento de la fuerza hidrostática detrás de la cara del hueco. Sin embargo, es imposible hacer el “sello perfecto” y sobretiempos con viajes y cambios en la presión del pozo, el filtrado, progresivamente se introducirá a través de cualquier fractura disponible.
  
10. El daño de formación se aumenta debido al incremento de presión para mantener las paredes del hueco, especialmente en la lutita Napo y cuando se hinchan las arcillas. El daño se presenta no solo con la invasión de filtrado, sino también porque el agua del filtrado al entrar en contacto con arcillas que forman parte de la matriz de las arenas productivas hace que se expandan o migren, según sea el caso, de modo que la permeabilidad se reduce debido a la reducción de la garganta de los poros de la roca provocado por estas arcillas.
  
11. Los lodos de Campo pueden modelarse bajo la Ley de Potencia o la Ley de Potencia Modificada, por lo tanto, aunque en el campo se usen los parámetros de VP y PC del modelo de Bingham, son imprescindibles para dar una idea de su comportamiento futuro y de esta manera corregir cualquier desviación de los parámetros de diseño.

## **RECOMENDACIONES**

1. Debe implementarse en el Laboratorio de fluidos de perforación, por parte de la compañía contratista respectiva el equipo adecuado para medir la concentración de PHPA en el lodo.
2. Hay que hacer las lecturas en el viscosímetro Fann con la mayor precisión posible, puesto que de esto dependen los valores de Viscosidad Plástica y Punto Cedente, los que son fundamentales para tomar las medidas correctivas del caso cuando no se encuentren en los parámetros recomendados en el programa de lodos.
3. Monitorear continuamente el contenido de sólidos en el lodo, ya que esto asegura que no haya problemas durante la perforación.
4. Controlar el nivel de calcio en el lodo al ingresar a las calizas de la Formación Napo.

5. Usar una fuente de potasio, la más conveniente, como es el caso del  $KNO_3$ , para mejorar la capacidad de inhibición de arcillas del fluido de perforación.
6. Tener siempre a mano los materiales de contingencia para pérdidas de circulación.
7. Mantener el peso del lodo lo mas bajo posible para no inducir fracturas en la formación.
8. Hacer las pruebas de compatibilidad con núcleos representativos de las formaciones que serán atravesadas durante la perforación. Las pruebas deben especificar el comportamiento simulado a altas temperaturas, para de esta forma minimizar los riesgos durante la perforación de nuevos pozos.



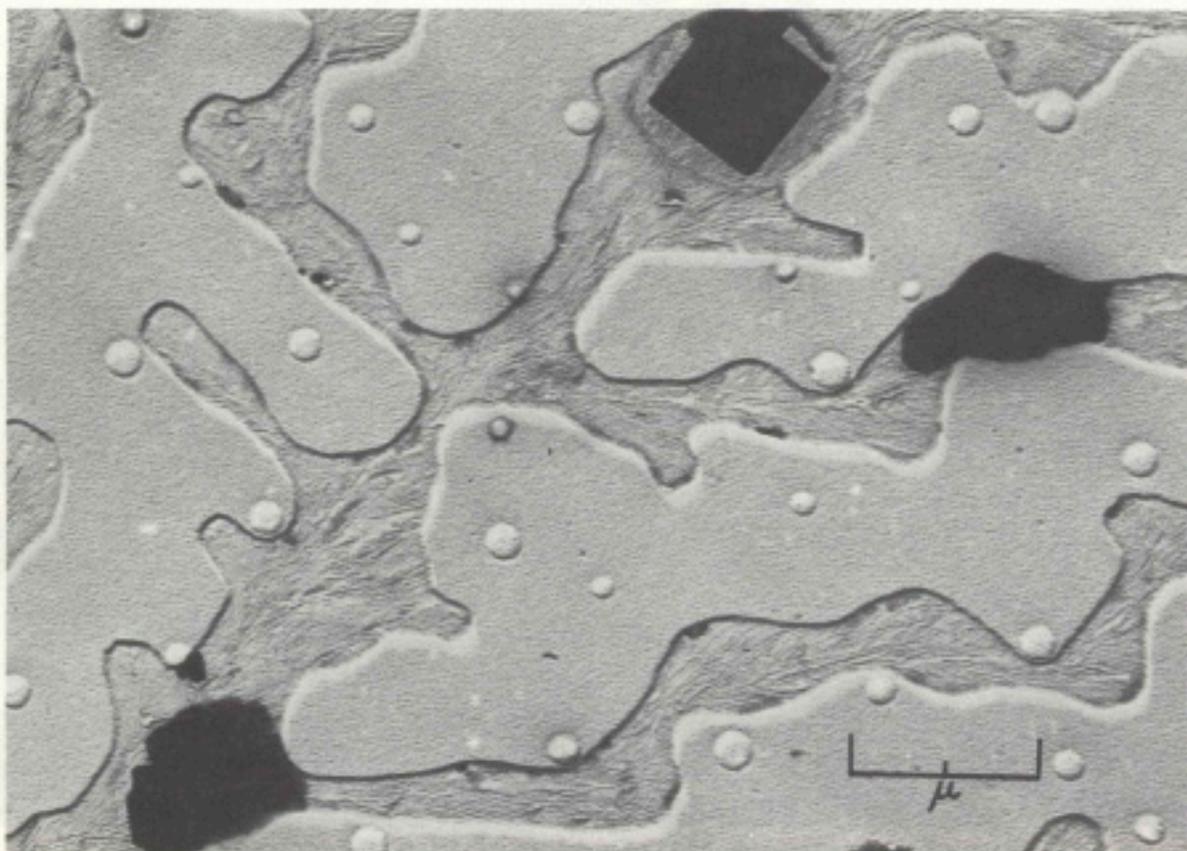
SUBSTITUENT POLYMER GROUPS

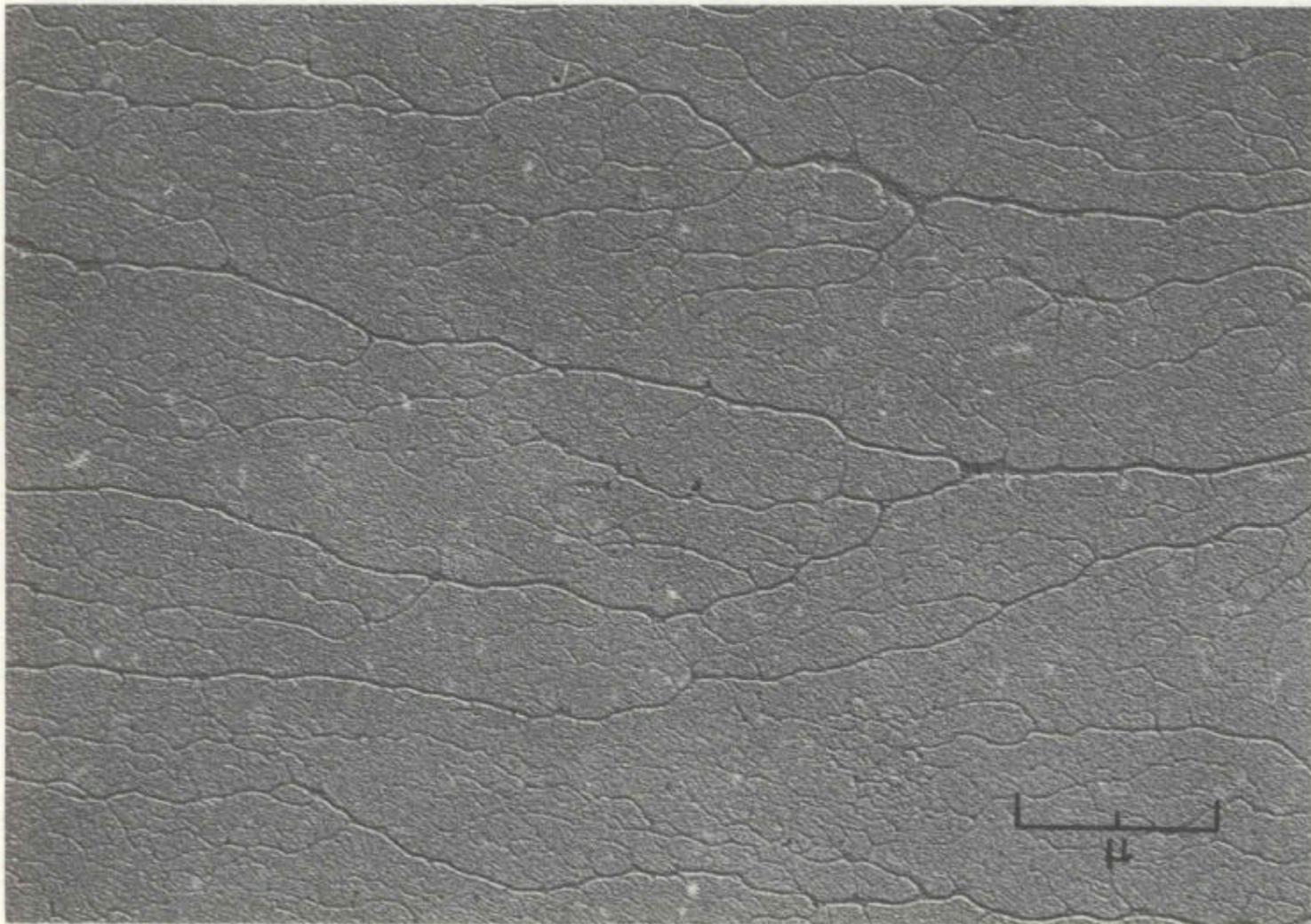
$$(70 + 30) 560 = 5.6 \times 10^4 \text{ MER UNITS}$$

LENGTH OF ONE MER UNIT  $\text{CH}_2\text{-CHCONH}_2$   
OR  $\text{CH}_2\text{CHCOOH}$  IS 2.5 ANGSTROMS

MOLECULAR LENGTH  
 $L = 2.5\text{\AA}/\text{MER} \times 5.6 \times 10^4 \text{ MER} = 1.4 \times 10^5 \text{\AA}$   
 EXTENDED MOLECULE 14 MICRONS

MOLECULAR DIAMETER FROM  
MODEL STUDIES 7-25 Å





Electron micrograph of high MW polyacrylamide,  
30 percent hydrolysis, in distilled water, 500 ppm  
concentration.

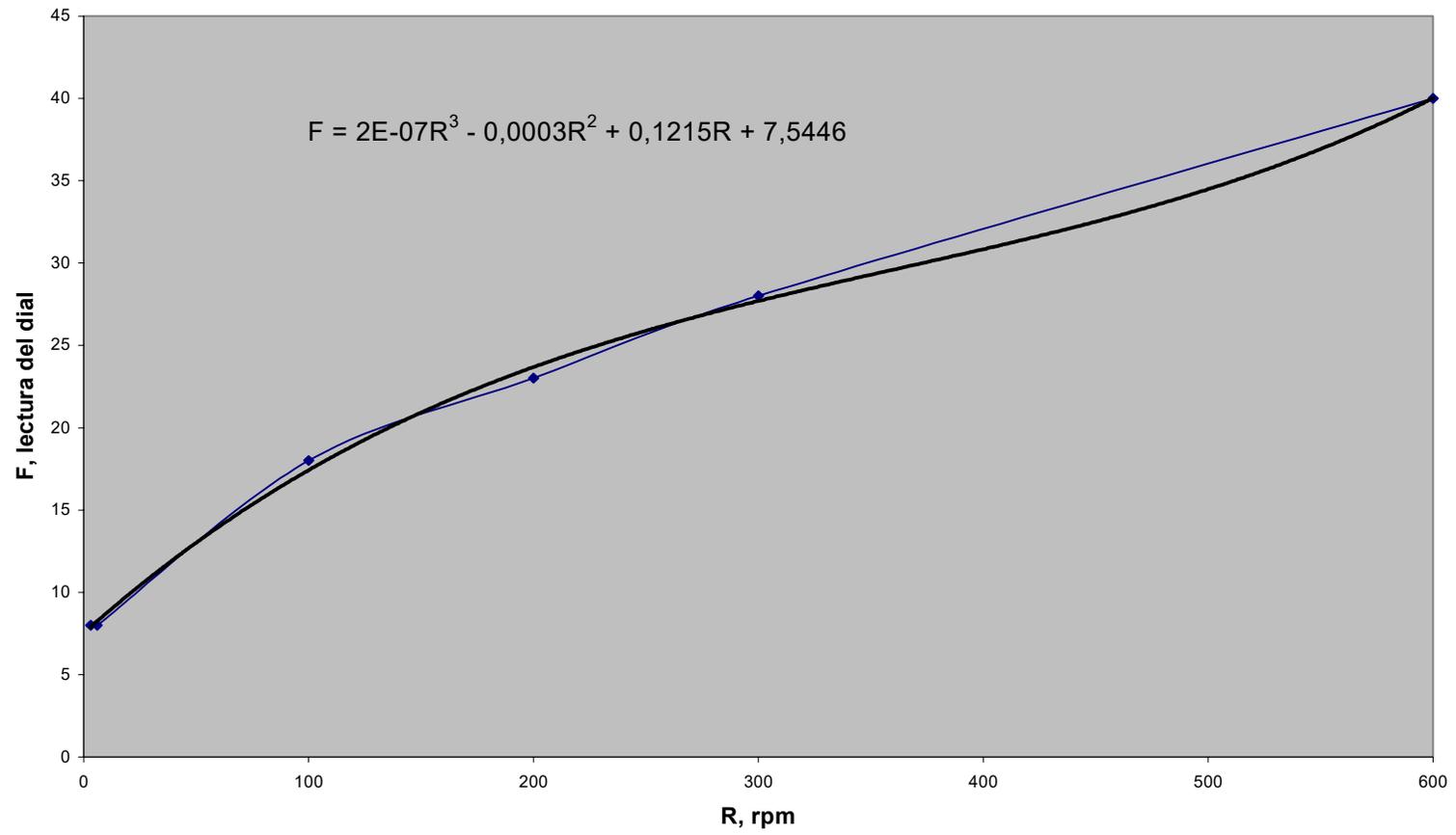
## **APENDICE A.1**

### **POZO #1**

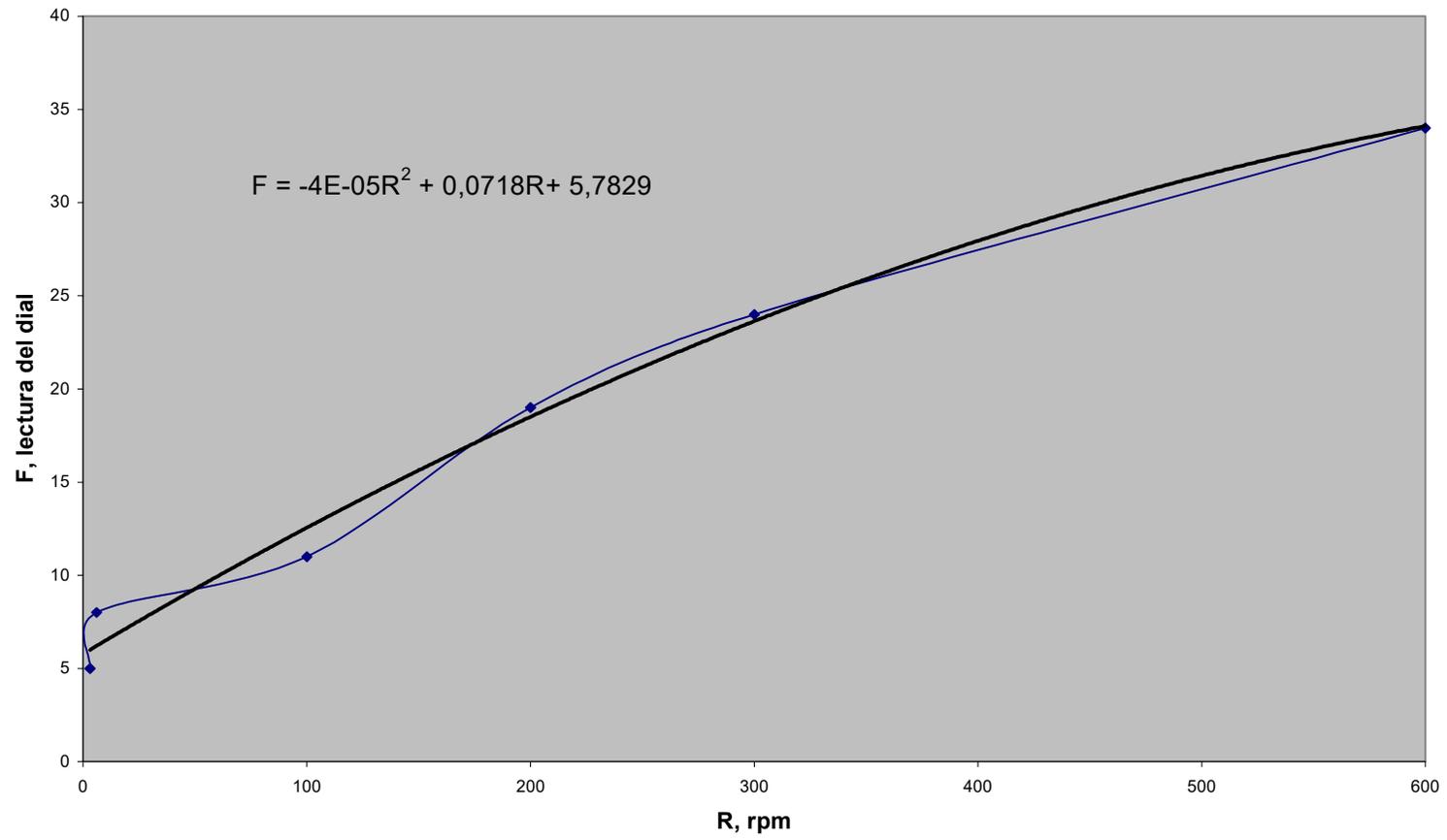
#### **GRAFICOS DE LEY DE POTENCIA Y LEY DE POTENCIA MODIFICADA (MODELO HERSCHEL-BULKLEY)**



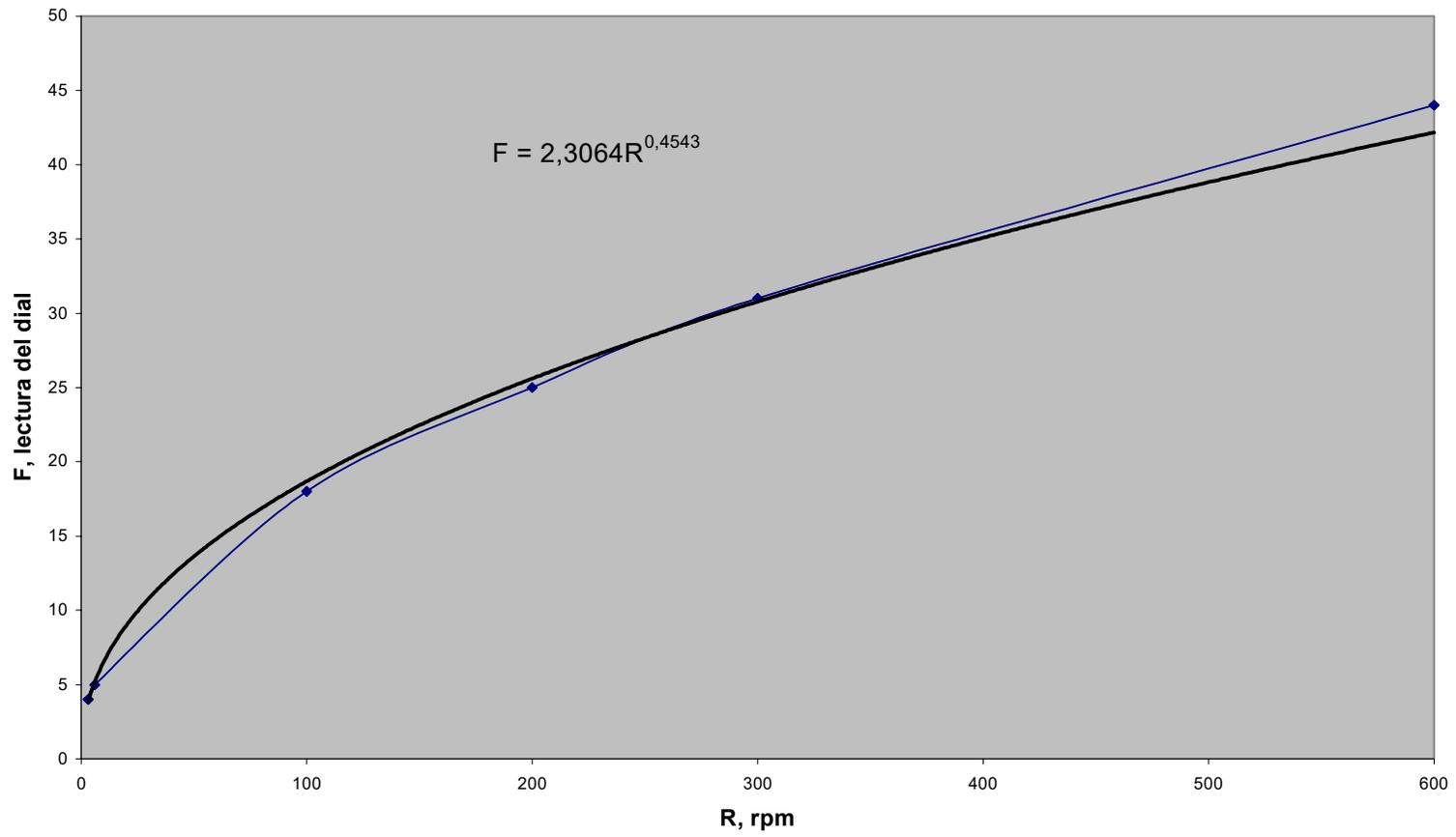
REOGRAMA POZO#1  
DIA 2



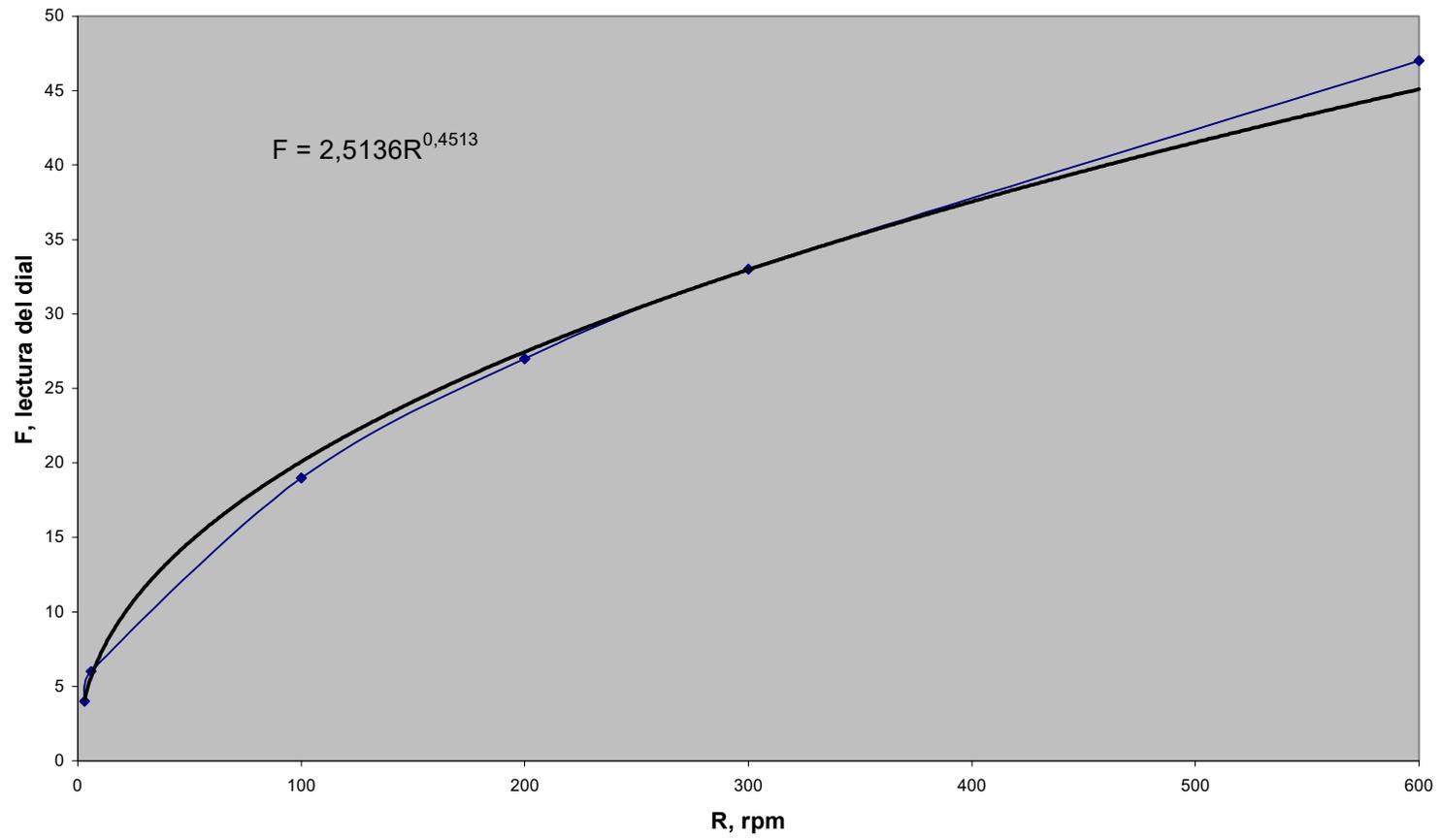
REOGRAMA POZO#1  
DIA 7



REOGRAMA POZO#1  
DIA 10



REOGRAMA POZO#1  
DIA 13



REOGRAMA POZO#1  
DIA 14

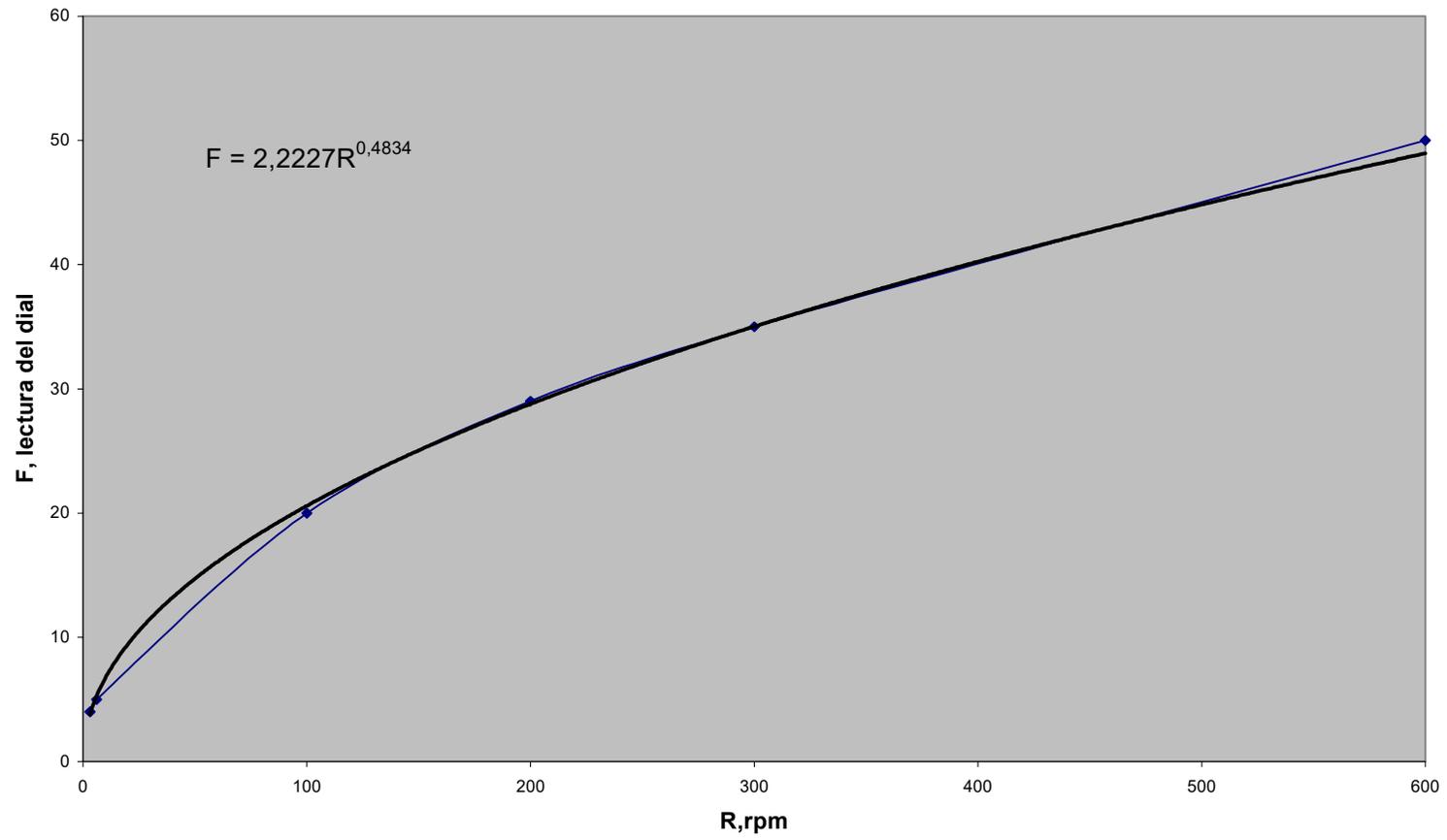


Grafico Ley de Potencia Modificada para lodo de campo Pozo #1  
Dia 2

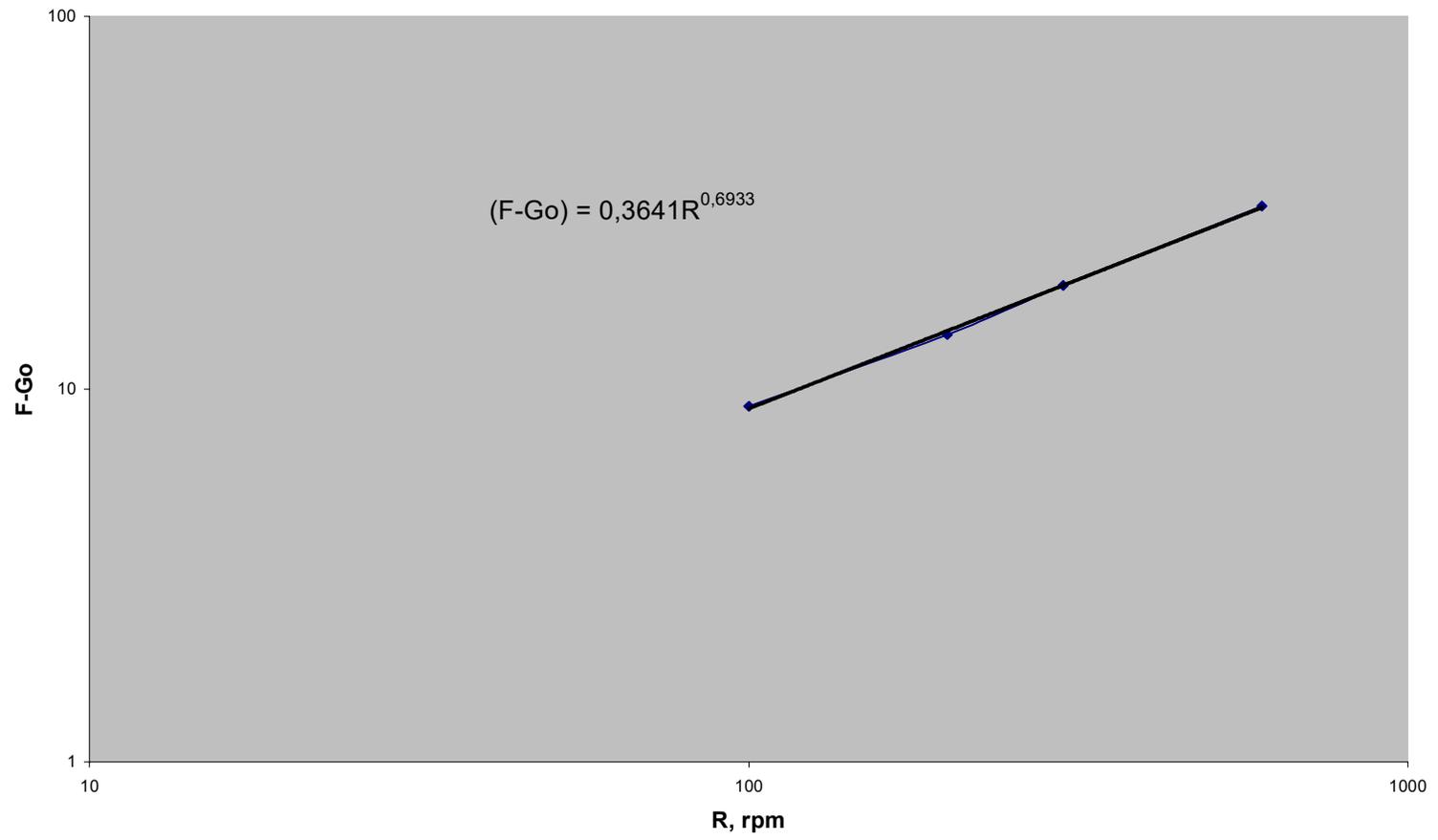


Grafico Ley de Potencia Modificada para lodo de campo Pozo #1  
Dia 7

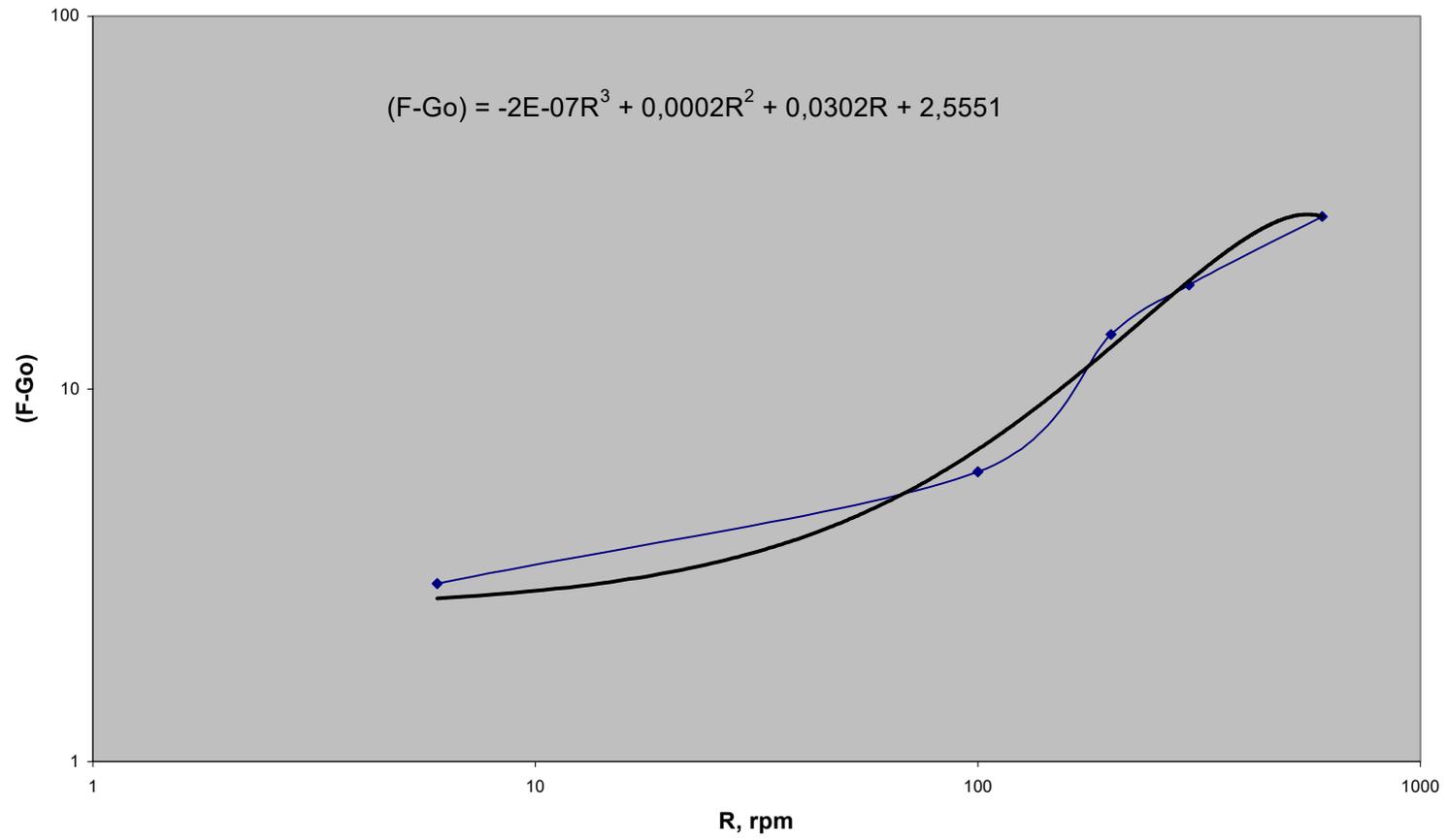


Grafico Ley de Potencia Modificada para lodo de campo Pozo#1

Dia 10

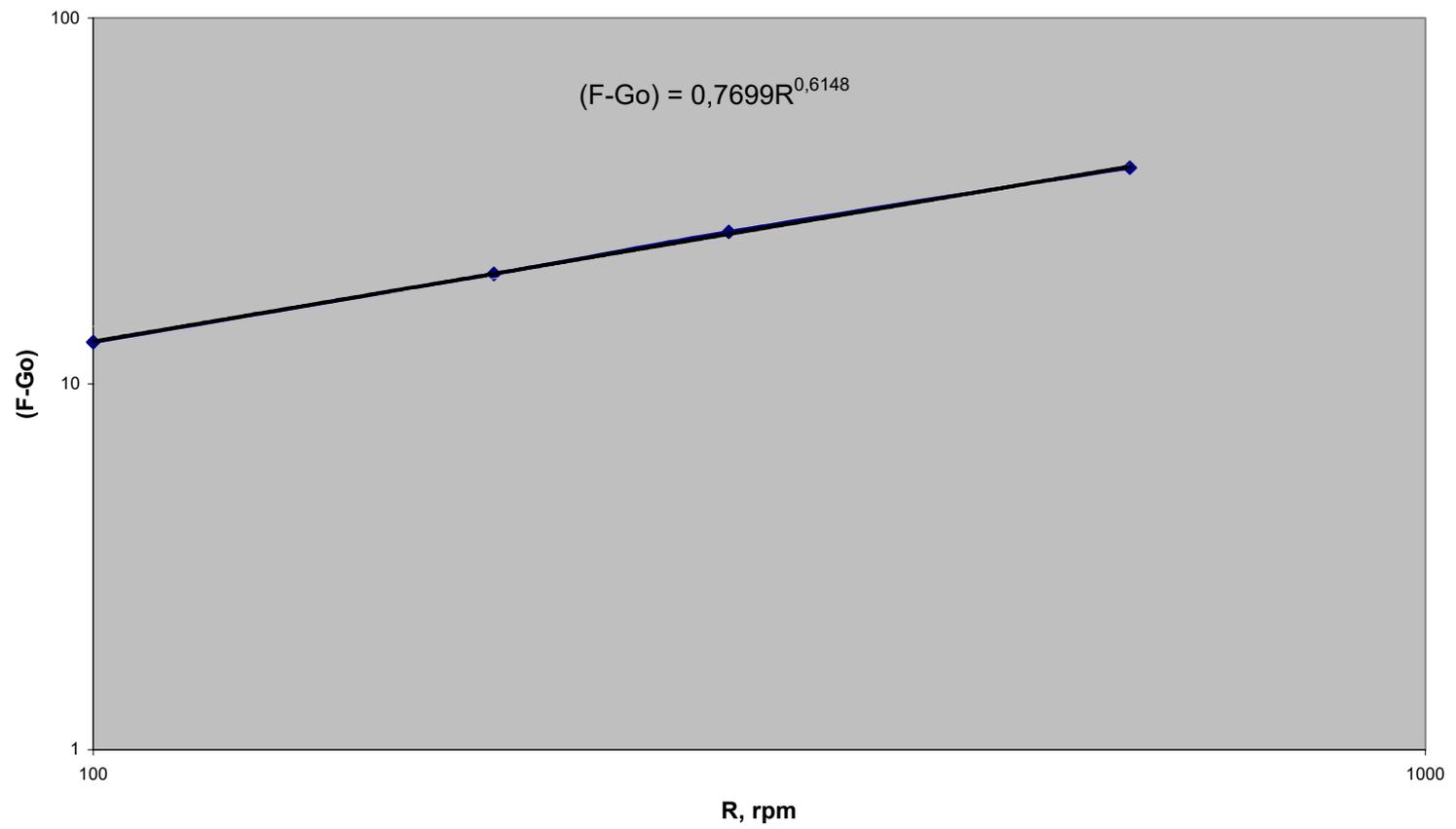


Grafico Ley de Potencia Modificada lodo de campo Pozo#1  
Dia 13

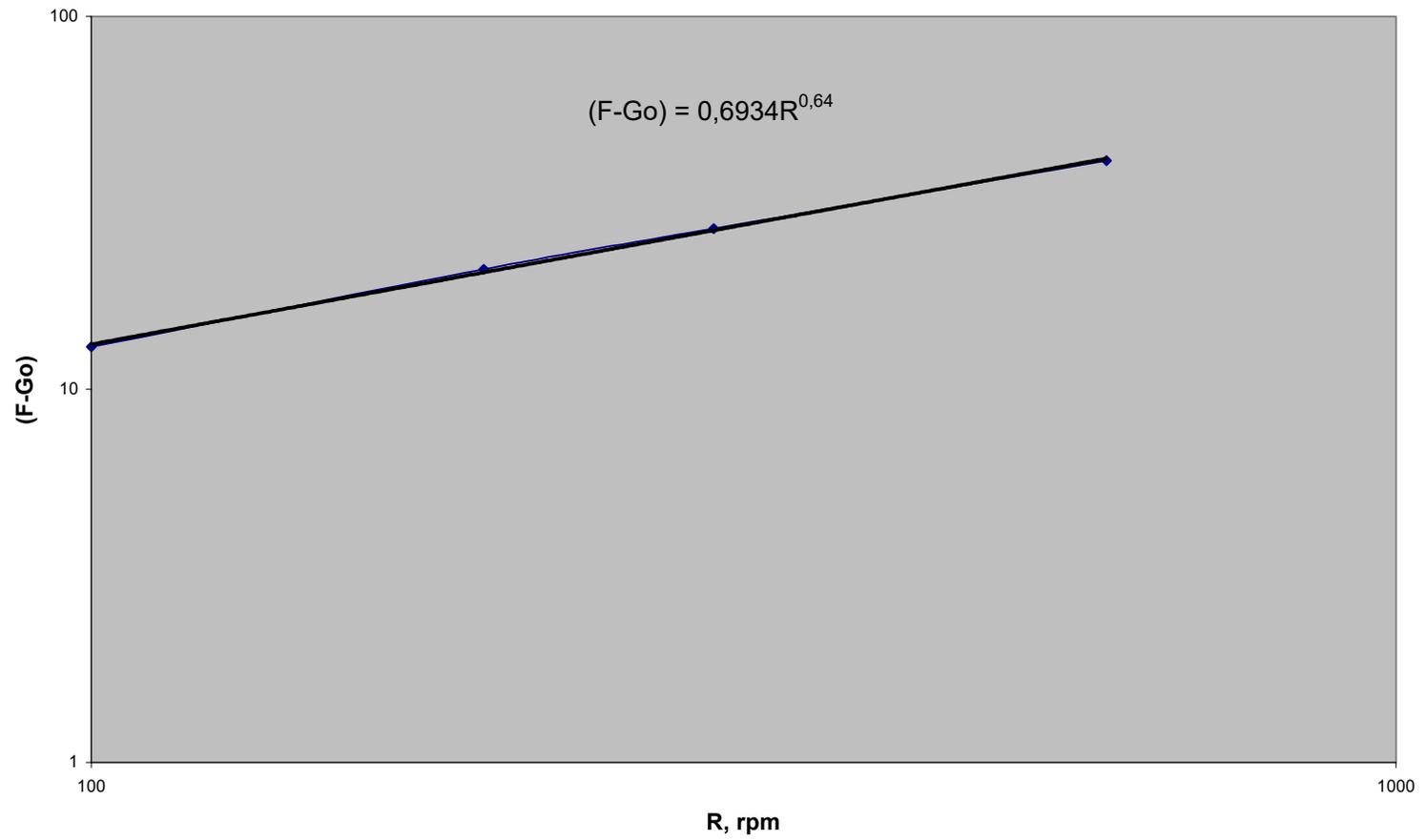
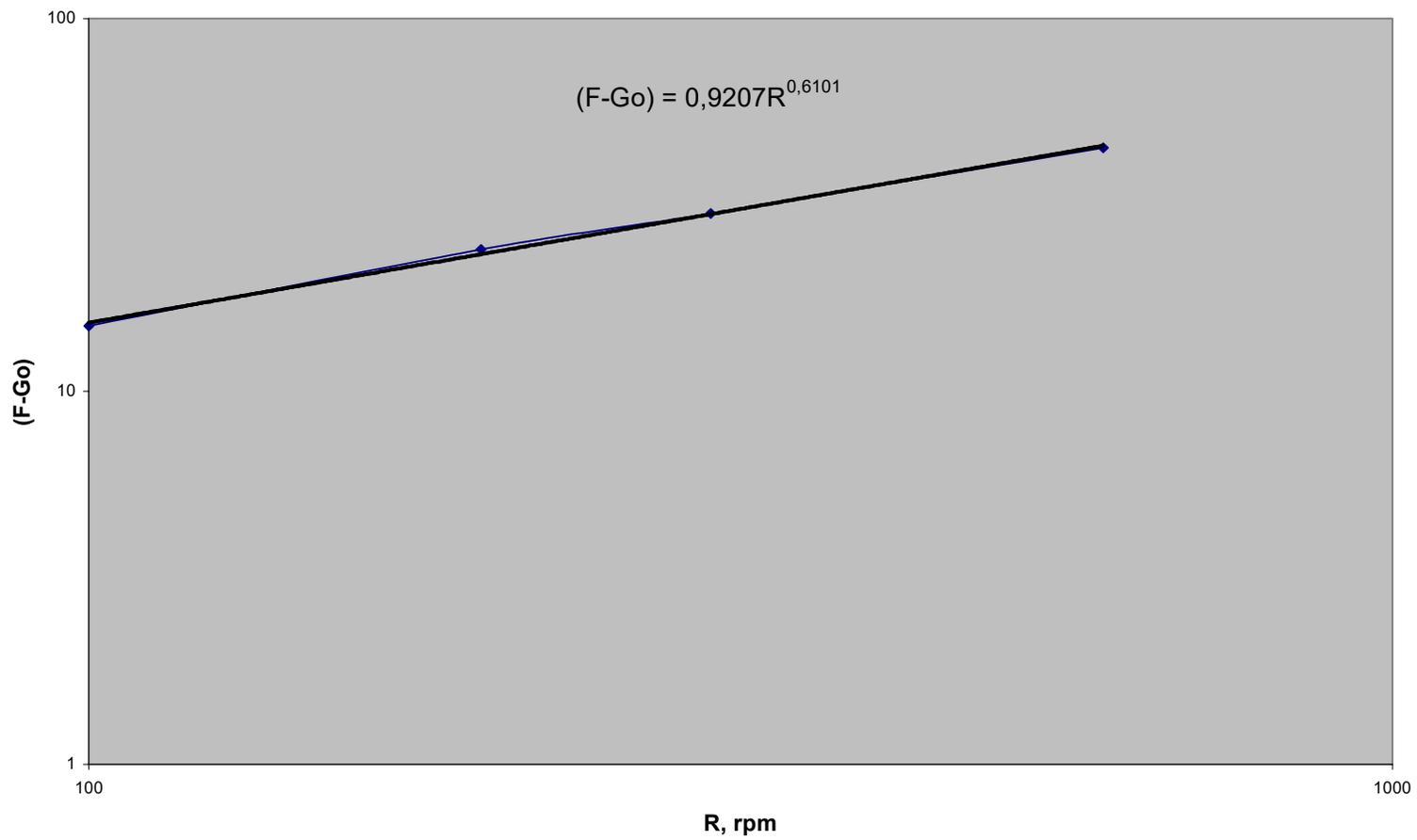


Grafico Ley de Potencia Modificada Pozo#1  
Dia 14

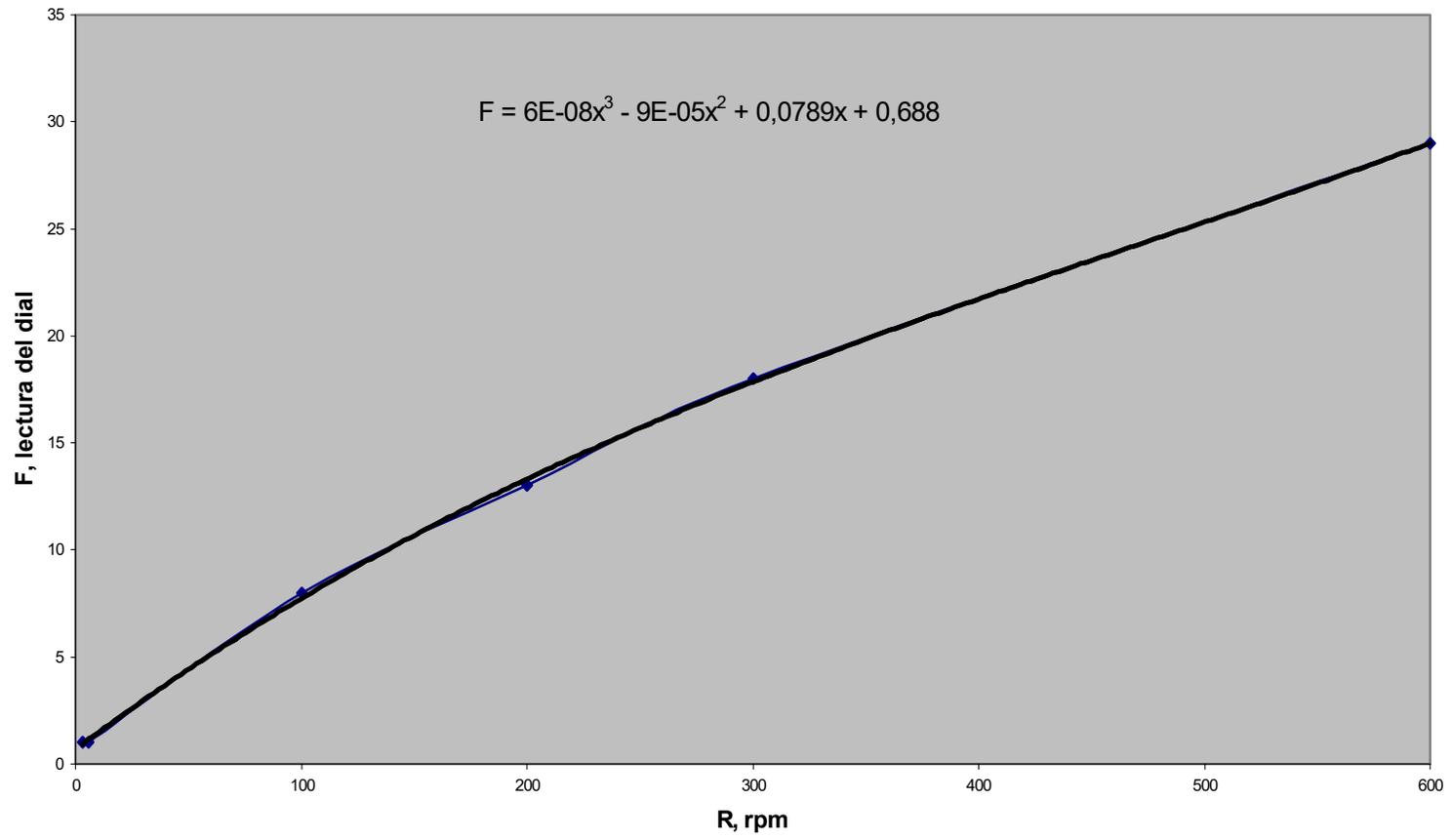


## **APENDICE A.2**

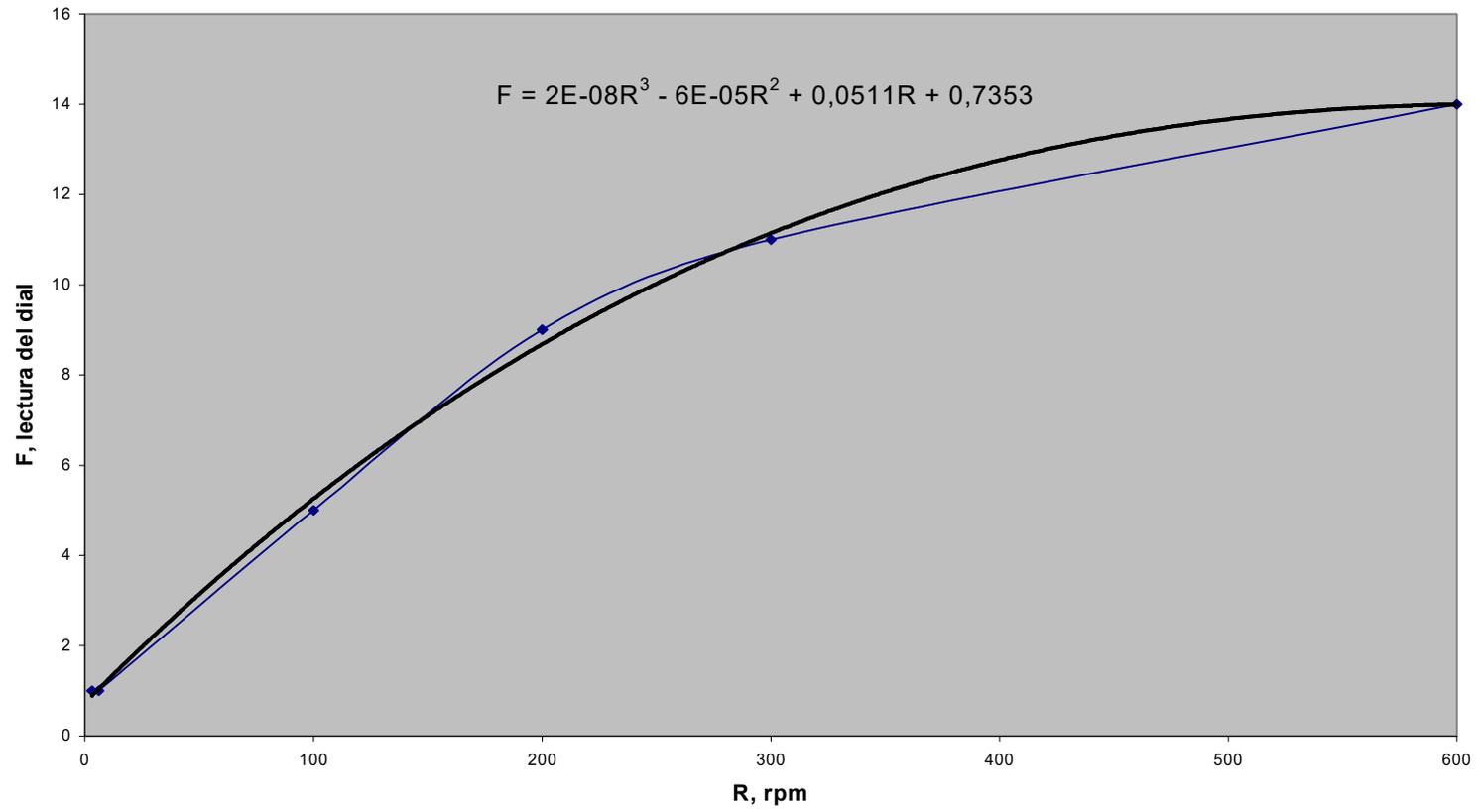
### **POZO #2**

#### **GRAFICOS LEY DE POTENCIA Y LEY DE POTENCIA MODIFICADA (MODELO HERSCHEL-BULKLEY)**

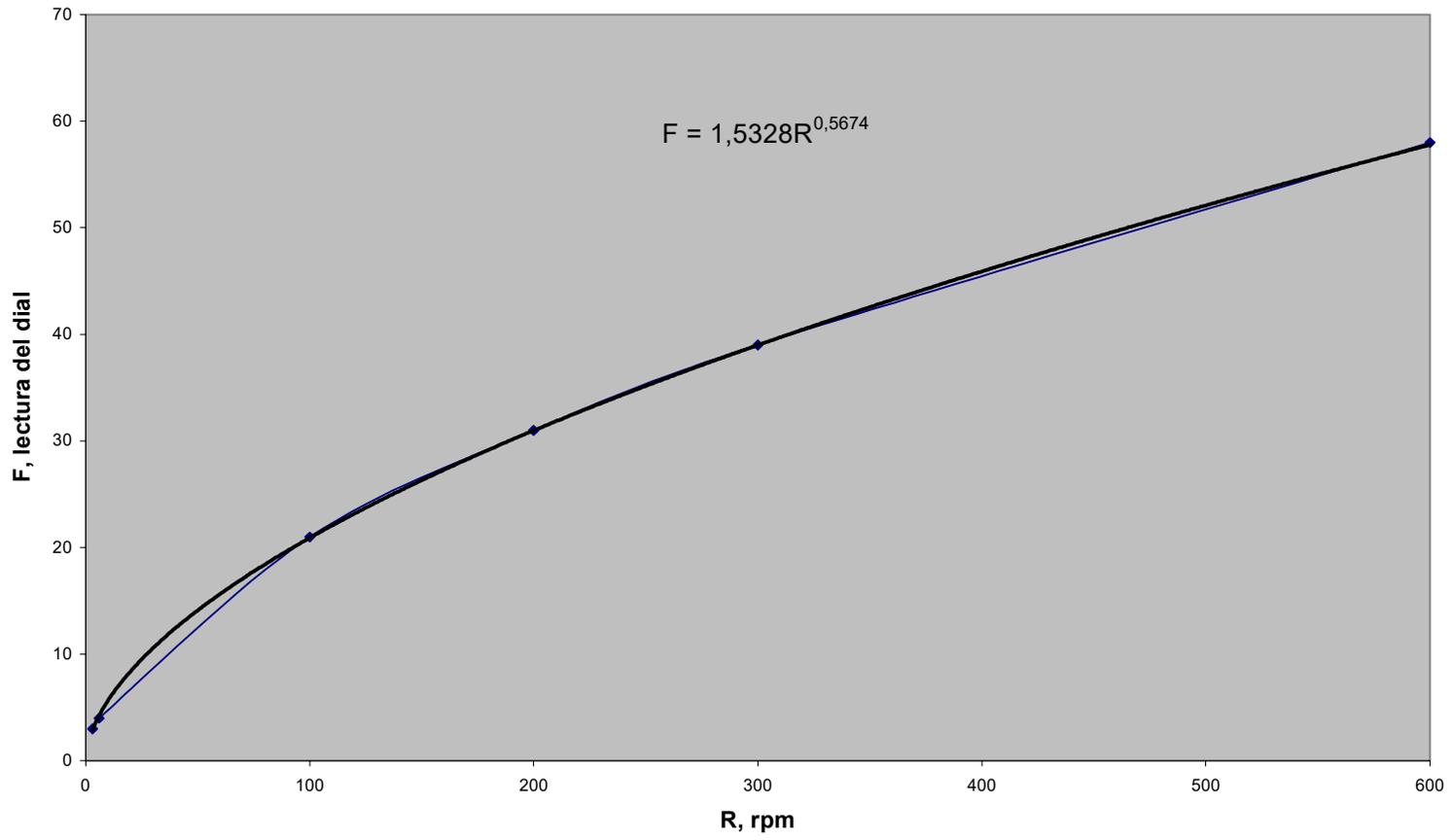
REOGRAMA POZO#2  
DIA 4



REOGRAMA POZO#2  
DIA 6



REOGRAMA POZO#2  
DIA 10



REOGRAMA POZO#2  
DIA 11

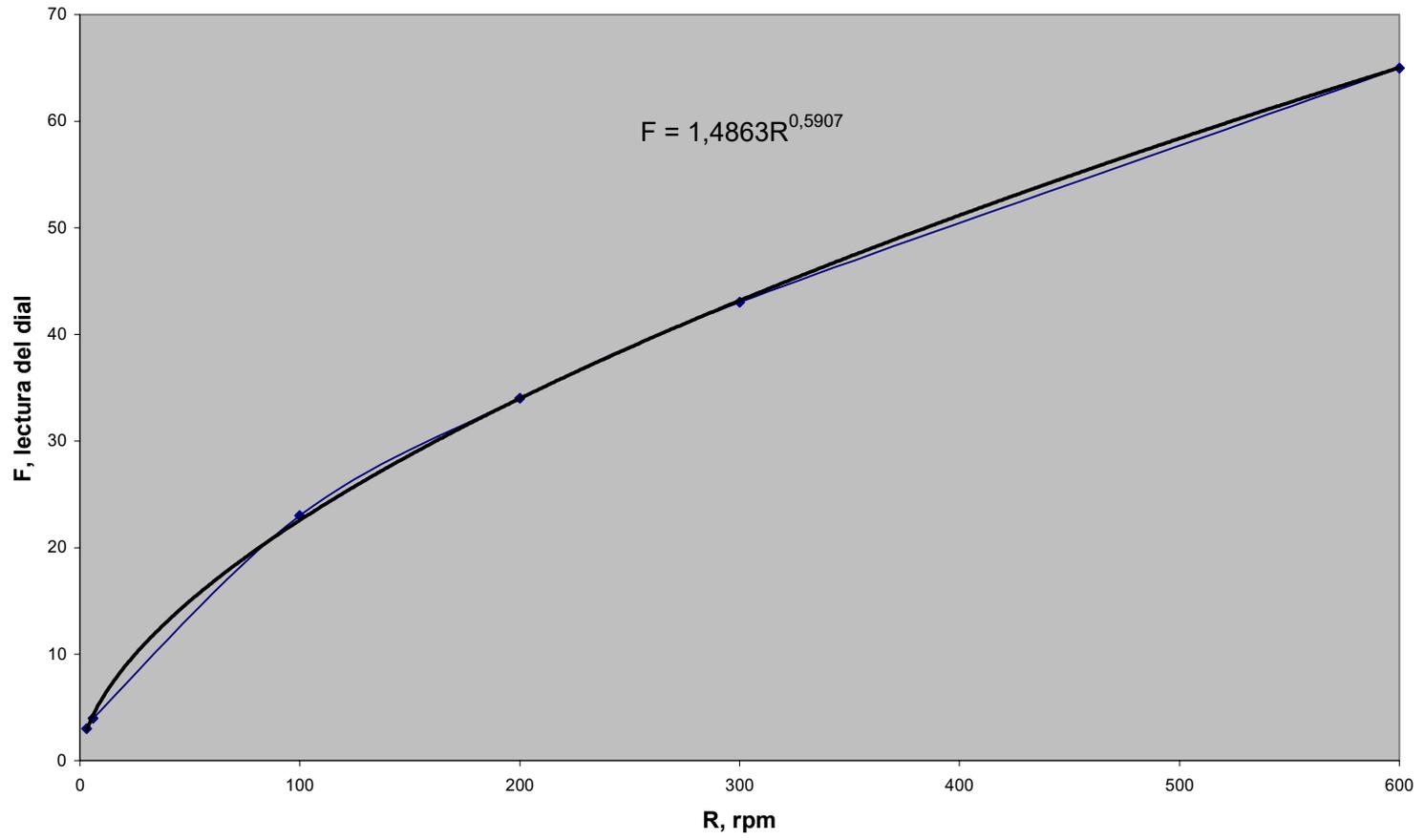


Grafico Ley de Potencia Modificada lodo de campo Pozo#2  
Dia 4

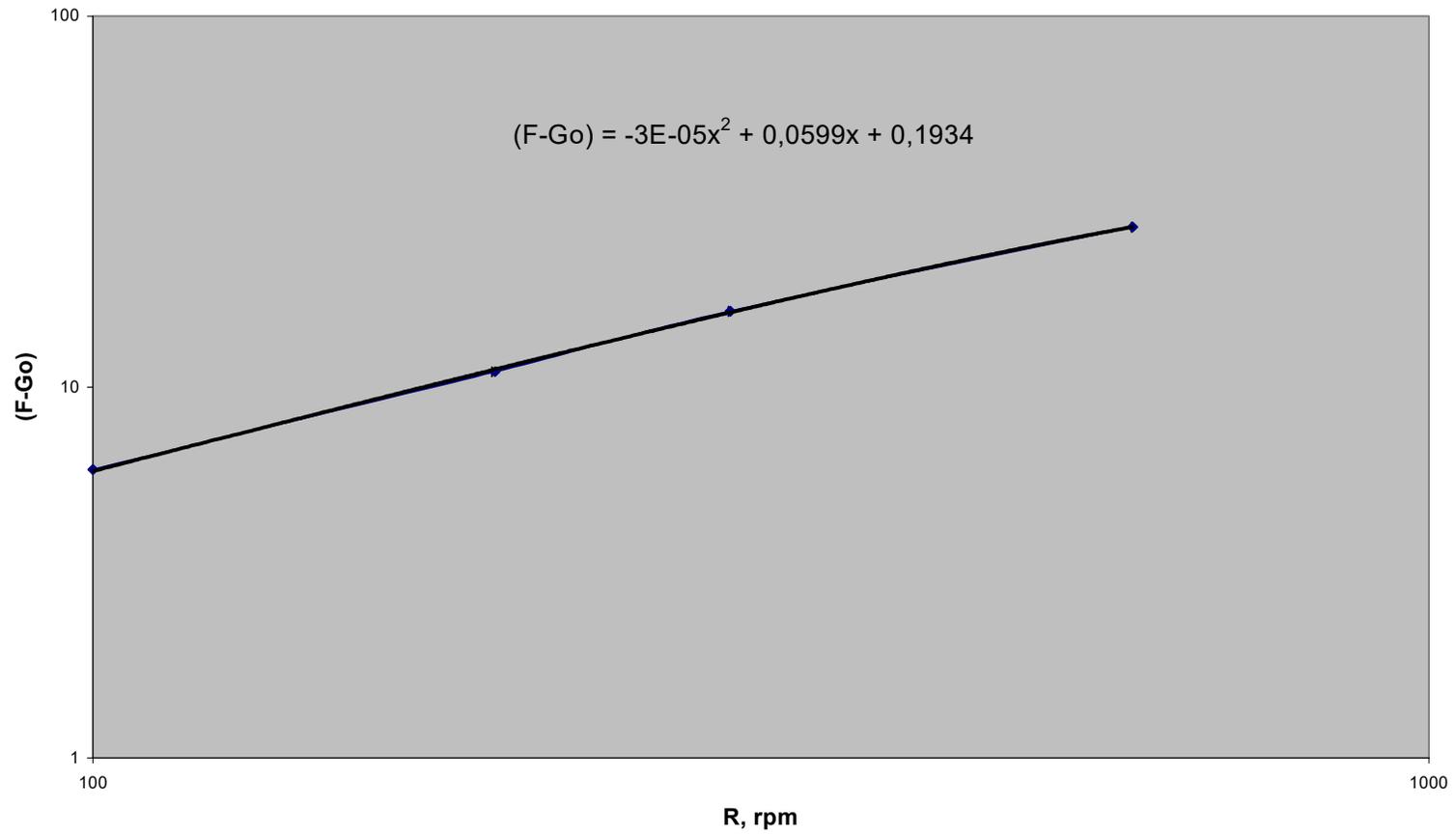


Grafico Ley de Potencia Modificada lodo de campo Pozo#2  
Dia 6

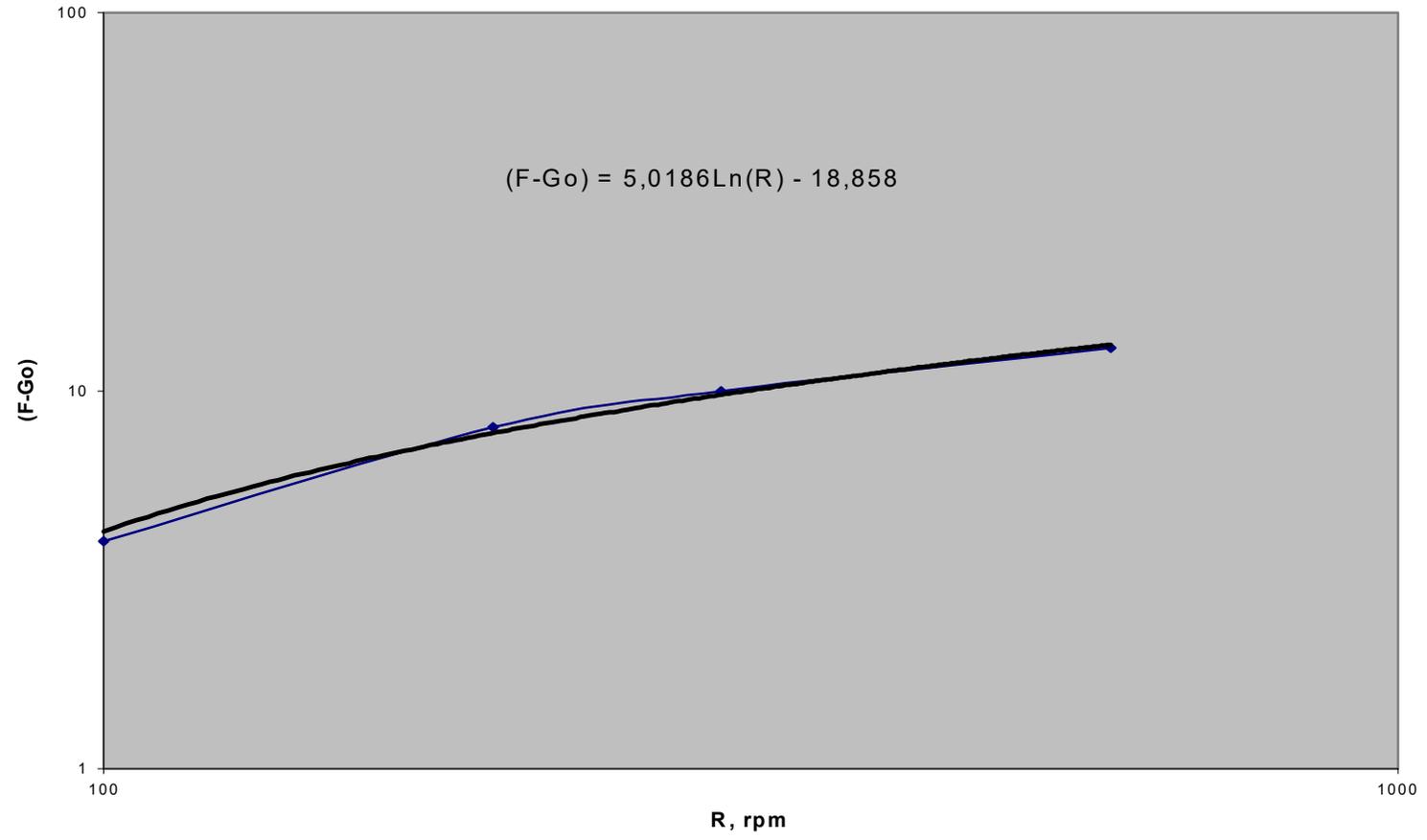


Grafico de Ley de Potencia lodo de campo Pozo#2  
Dia 10

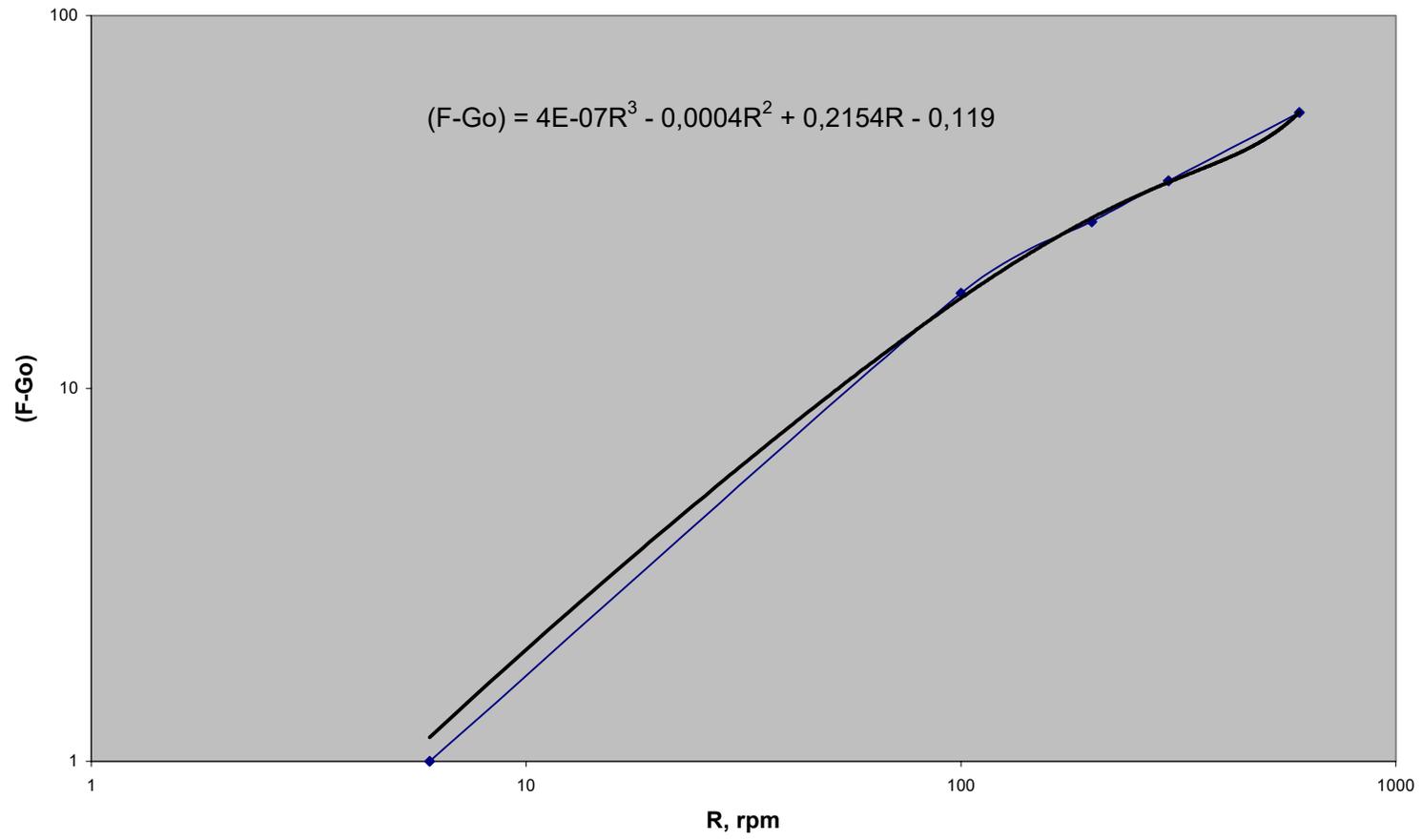
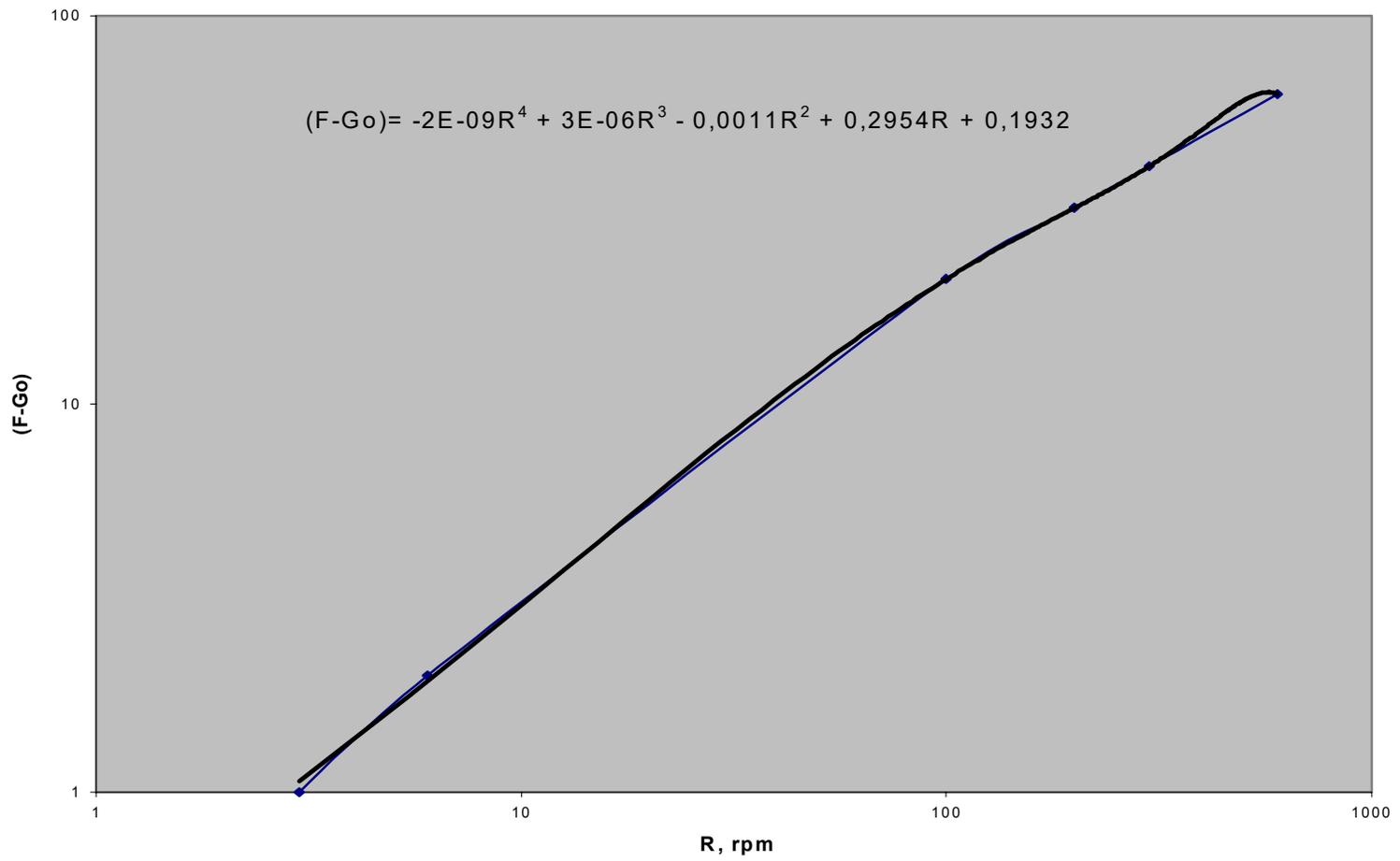


Grafico Ley de Potencia Modificada lodo de campo Pozo #2  
Dia 11

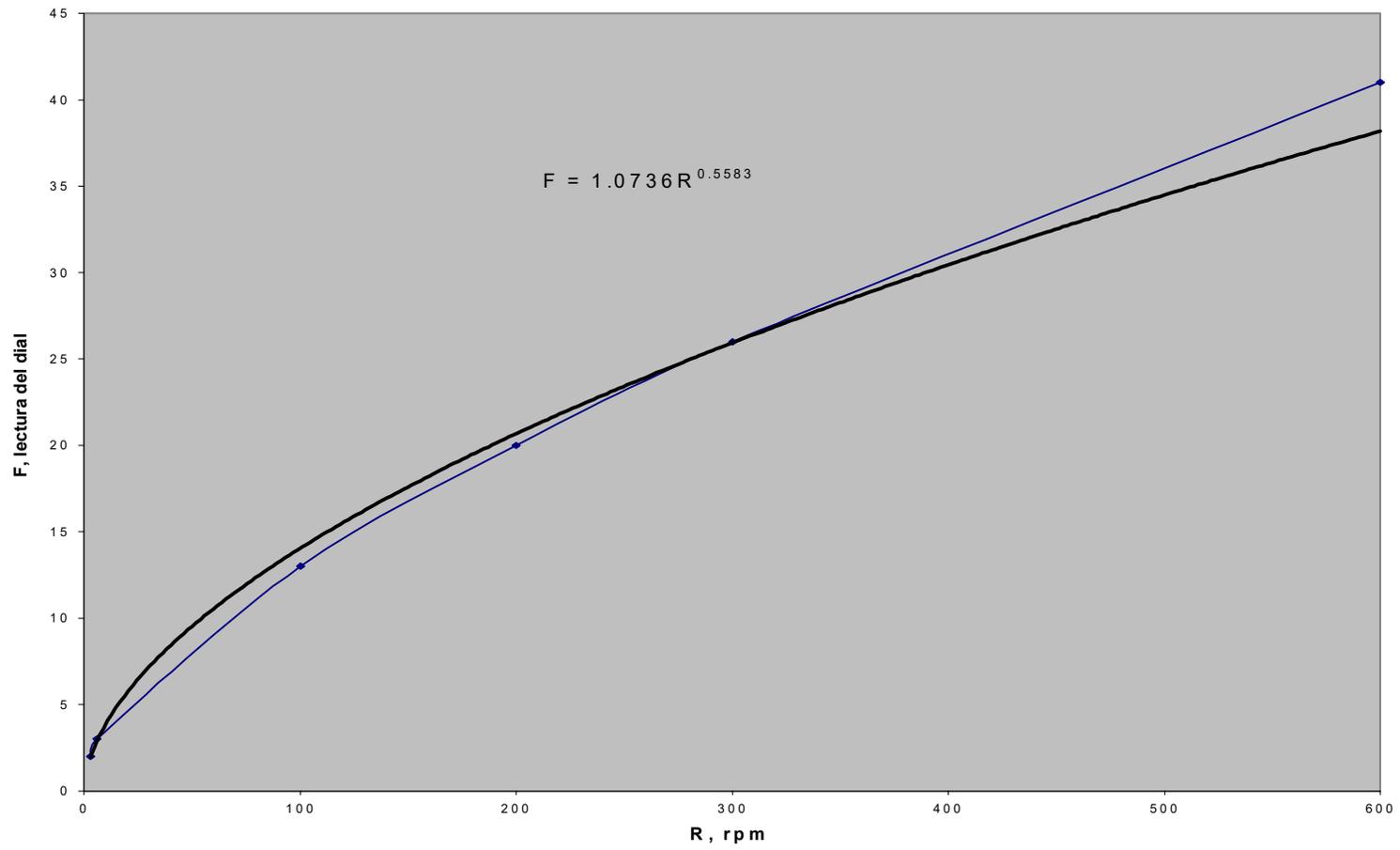


## **APENDICE A.3**

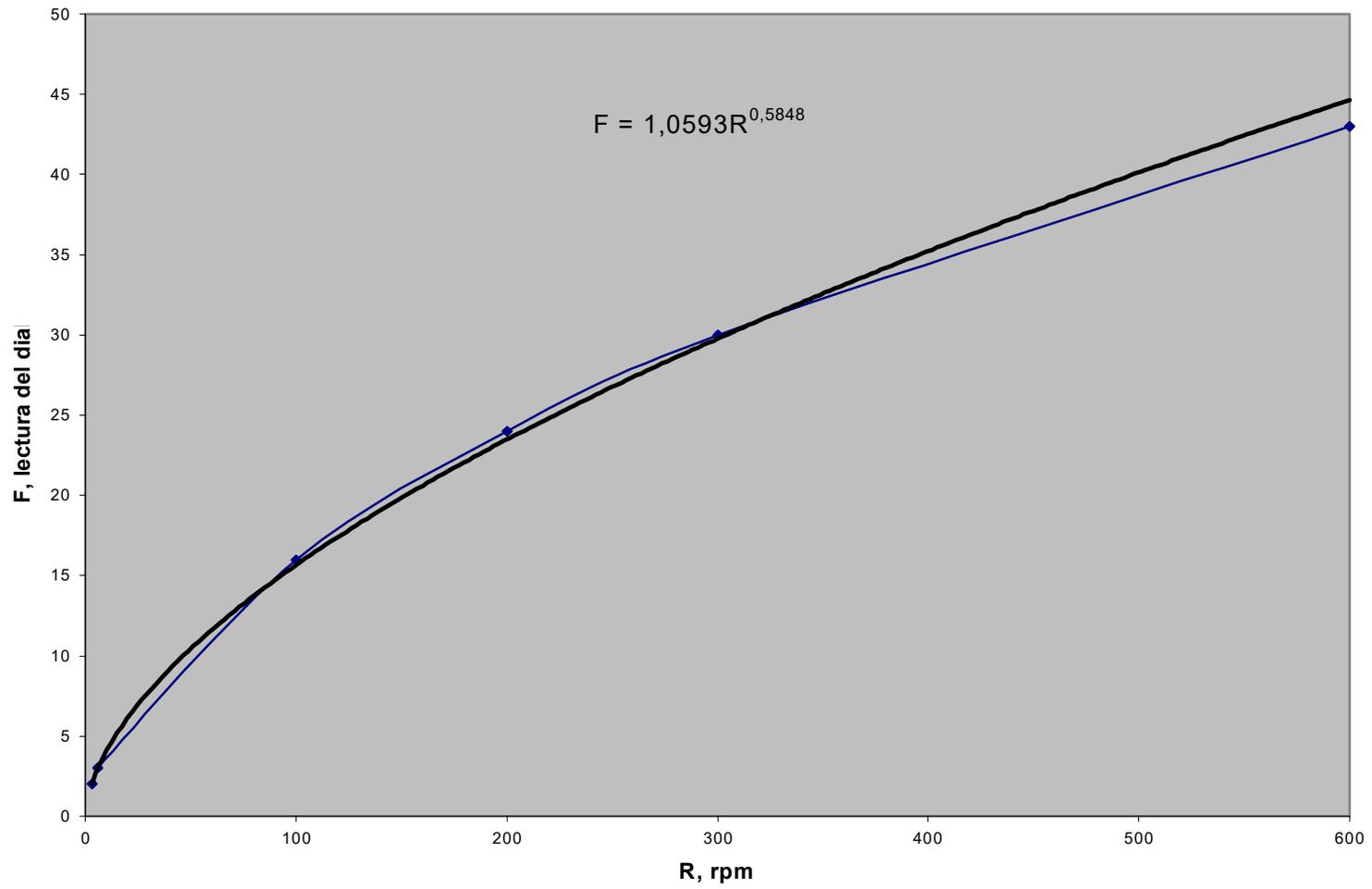
### **POZO #3**

#### **GRAFICOS DE LEY DE POTENCIA Y LEY DE POTENCIA MODIFICADA (MODELO HERSCHEL-BULKLEY)**

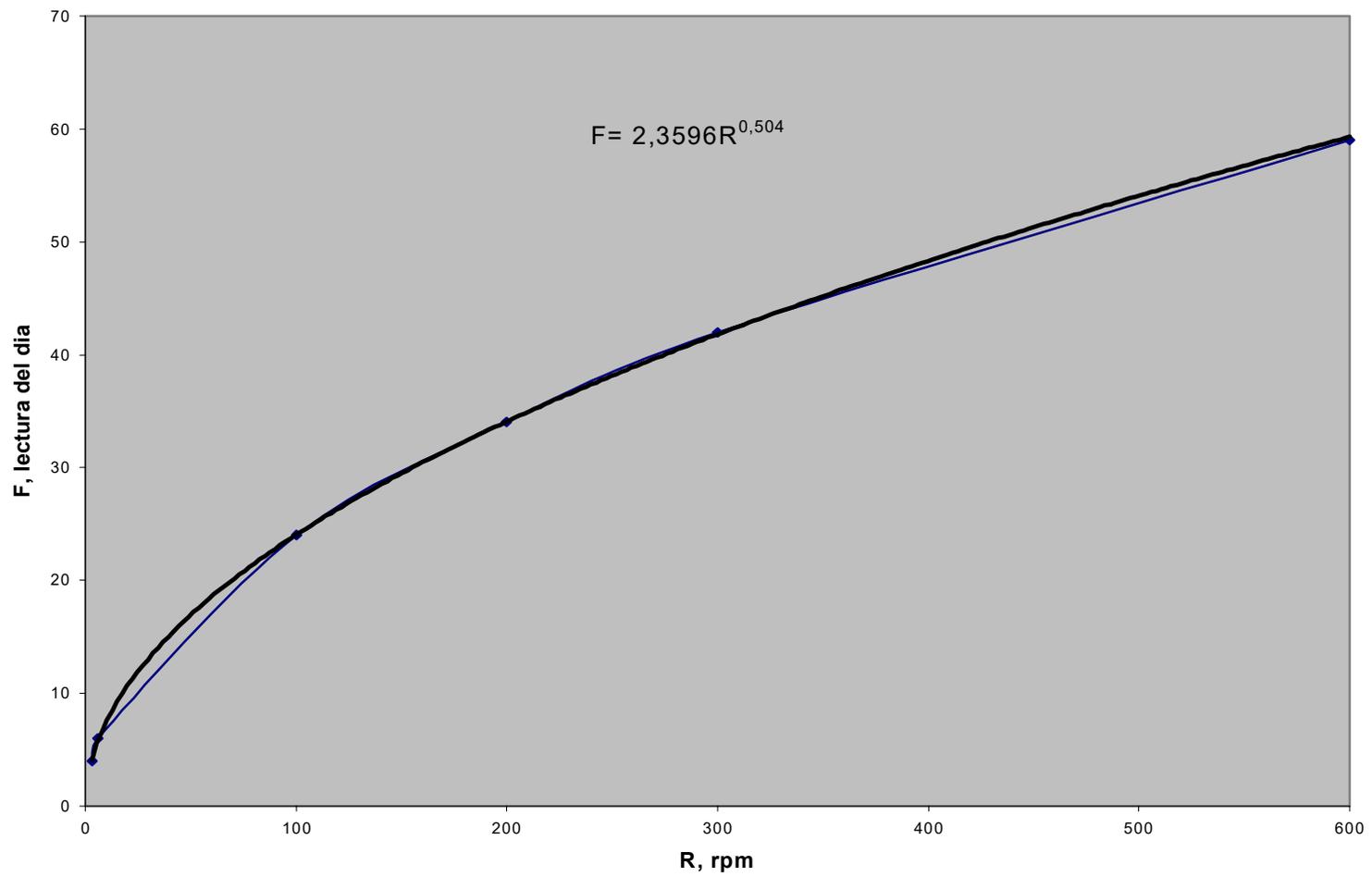
REOGRAMA  
DIA 4



REOGRAMA  
DIA 11



REOGRAMA  
DIA 16



REOGRAMA  
DIA 21

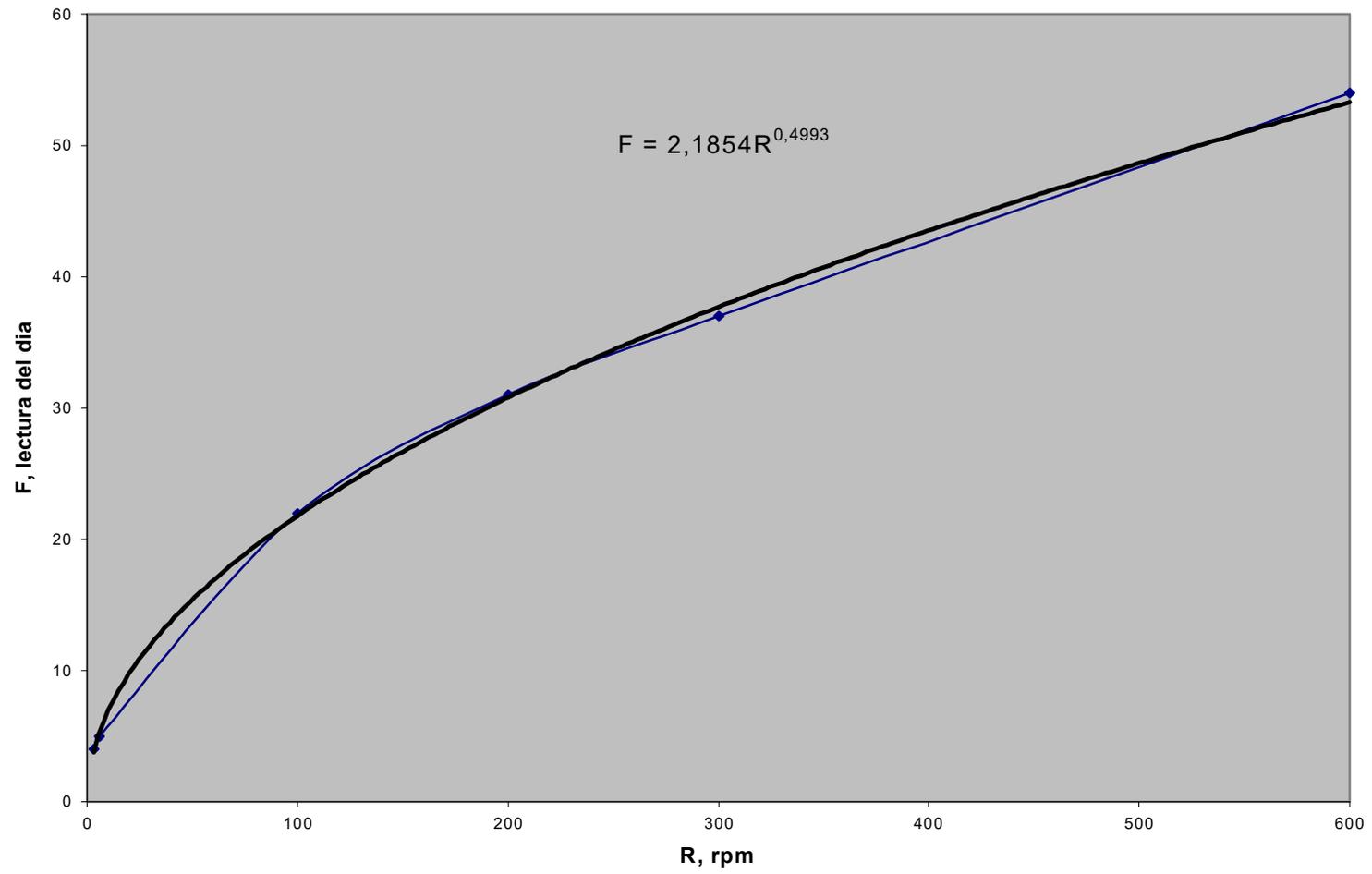


Grafico Ley de Potencia Modificada lodo de campo  
Dia 11

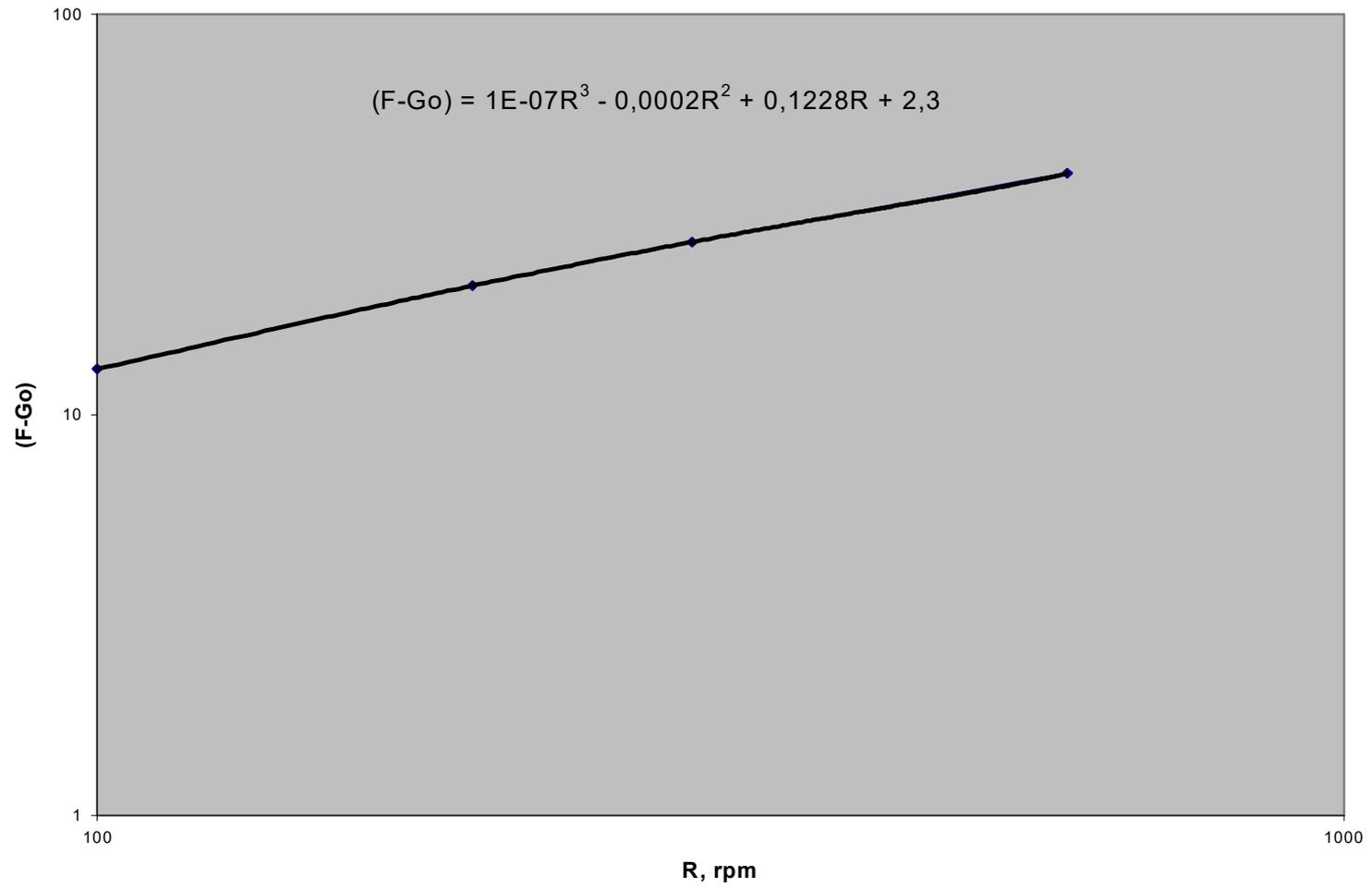


Grafico Ley de Potencia Modificada lodo de campo  
Dia 16

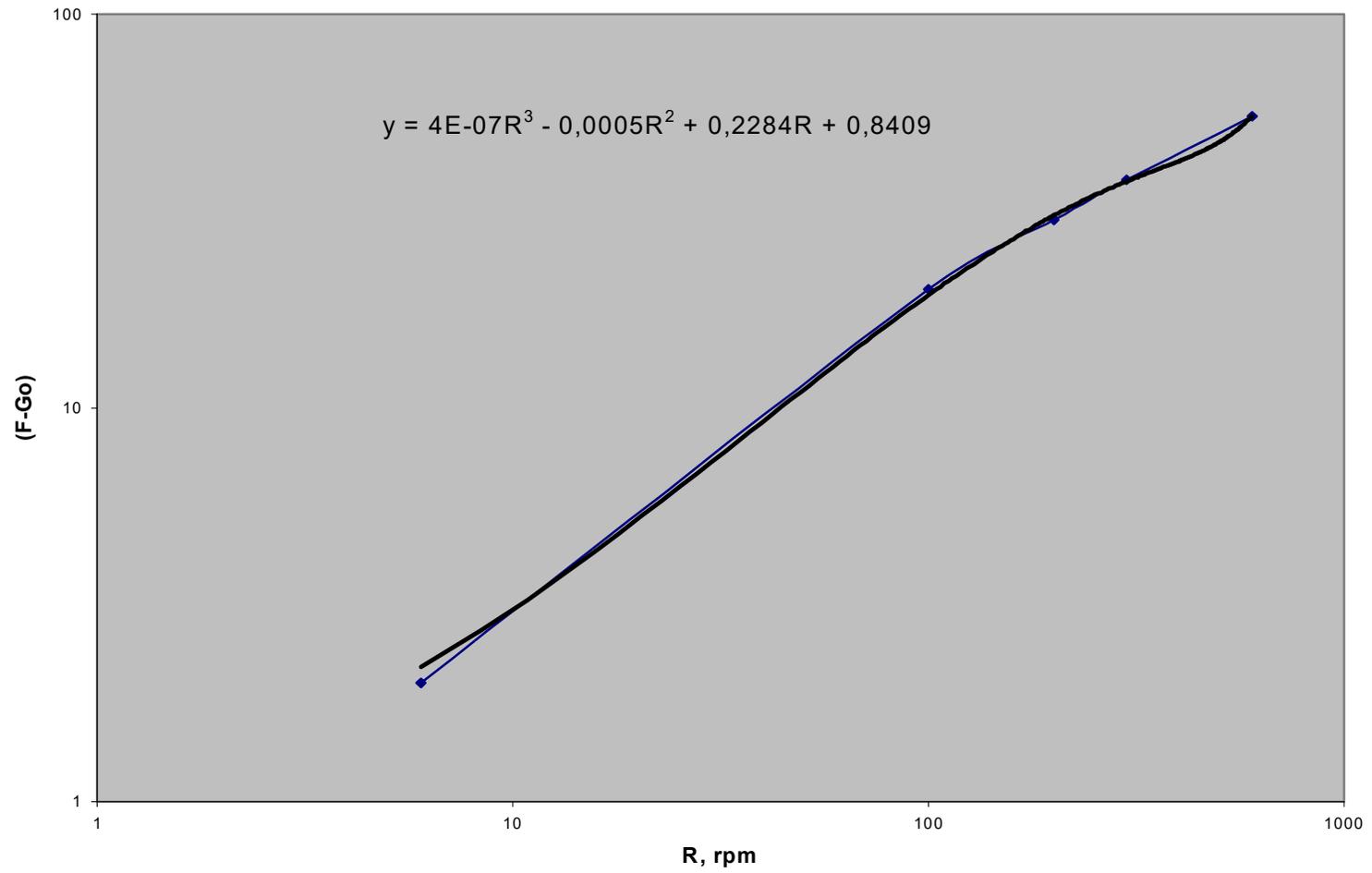
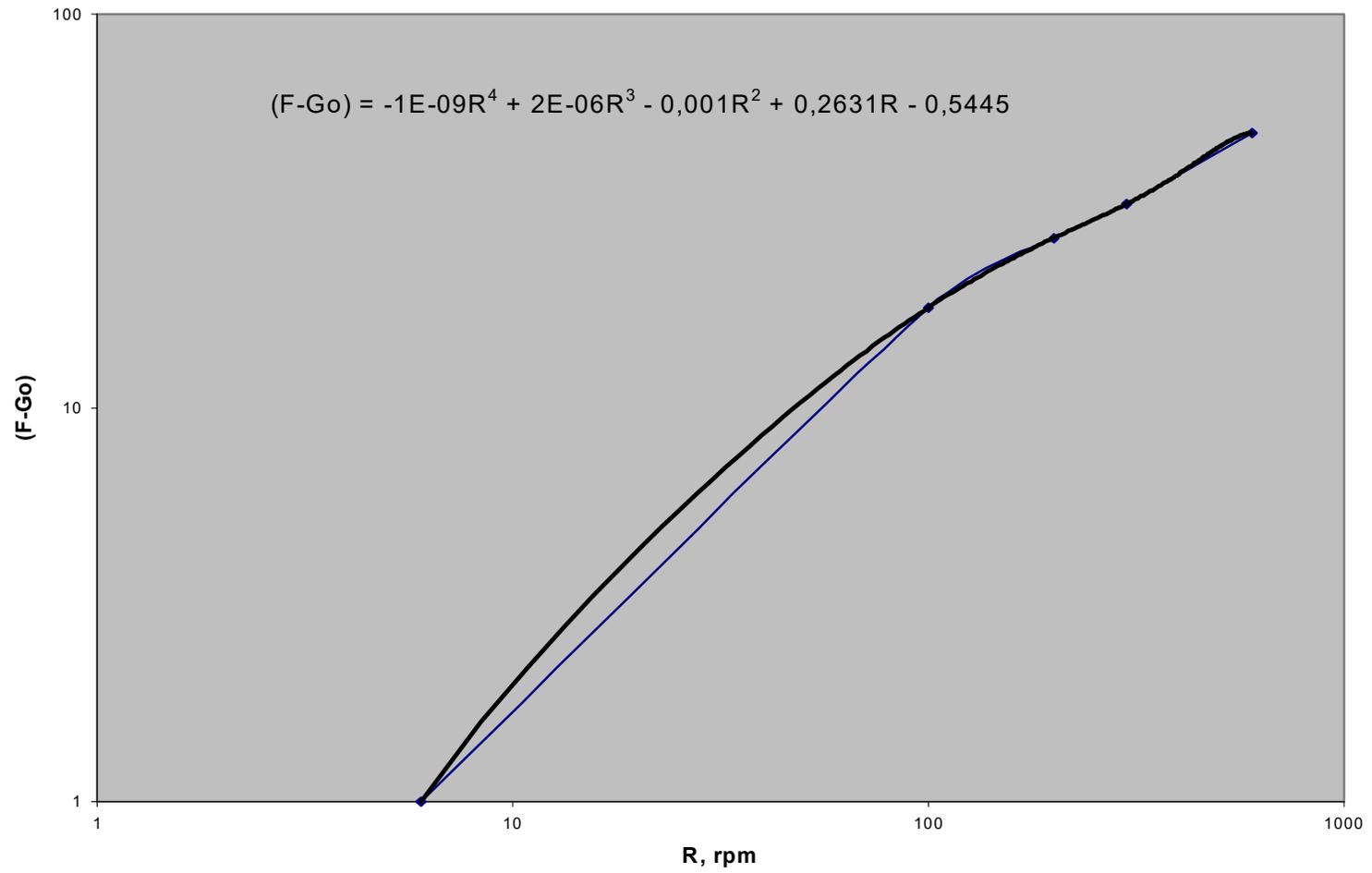


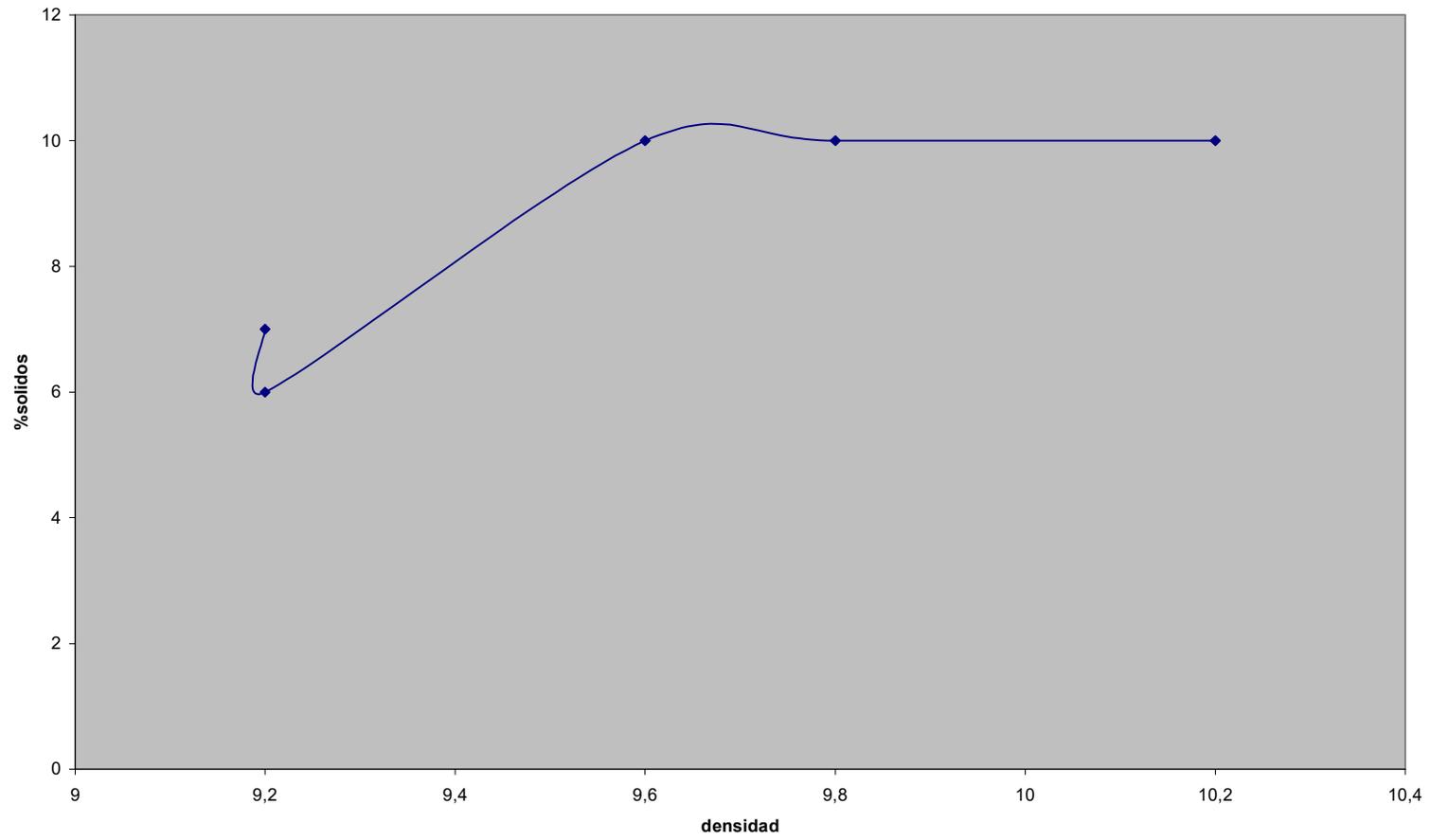
Grafico Ley de Potencia Modificada lodo de campo  
Dia 21



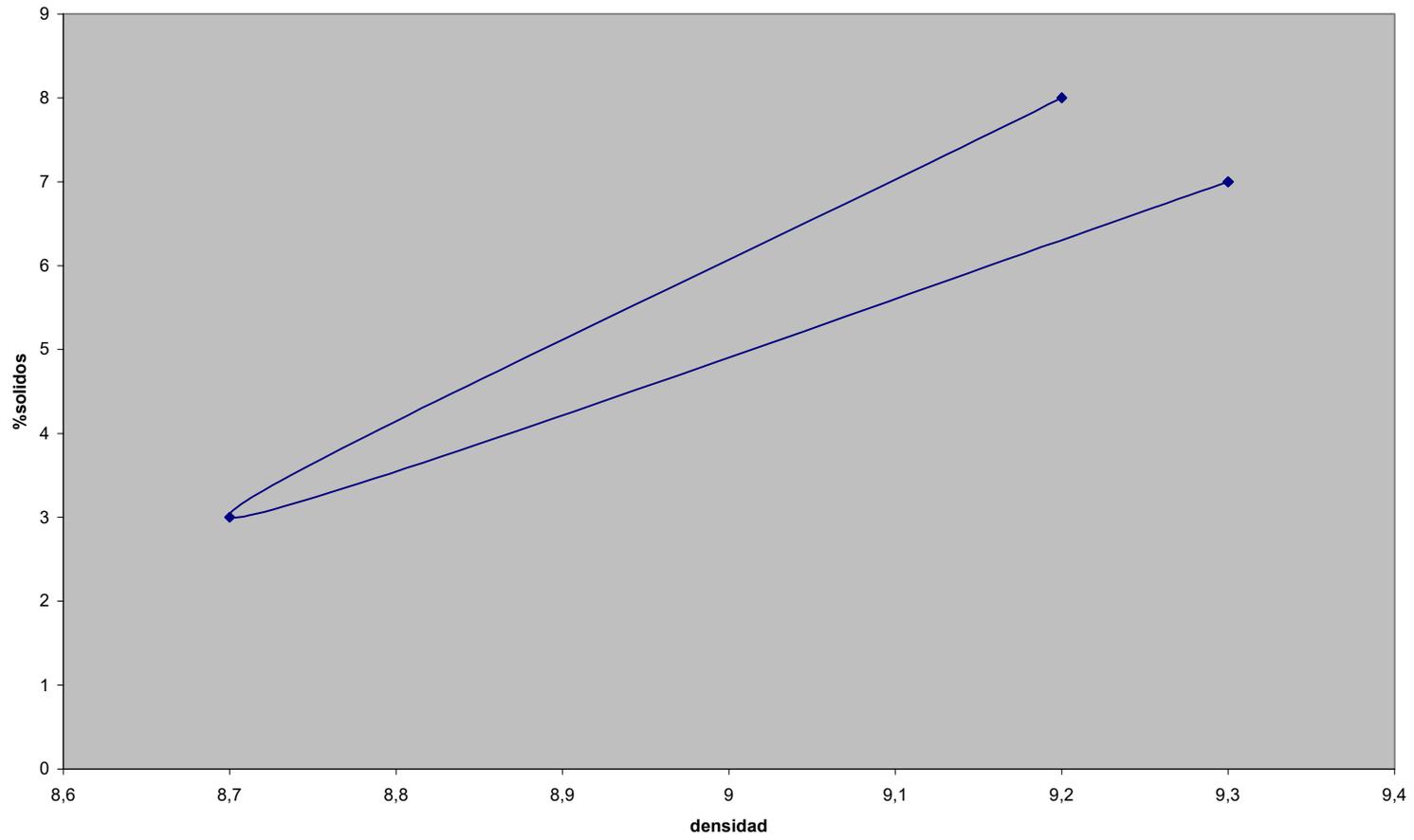
## **APENDICE B**

### **COMPORTAMIENTO DEL CONTENIDO DE SOLIDOS DE LOS POZOS**

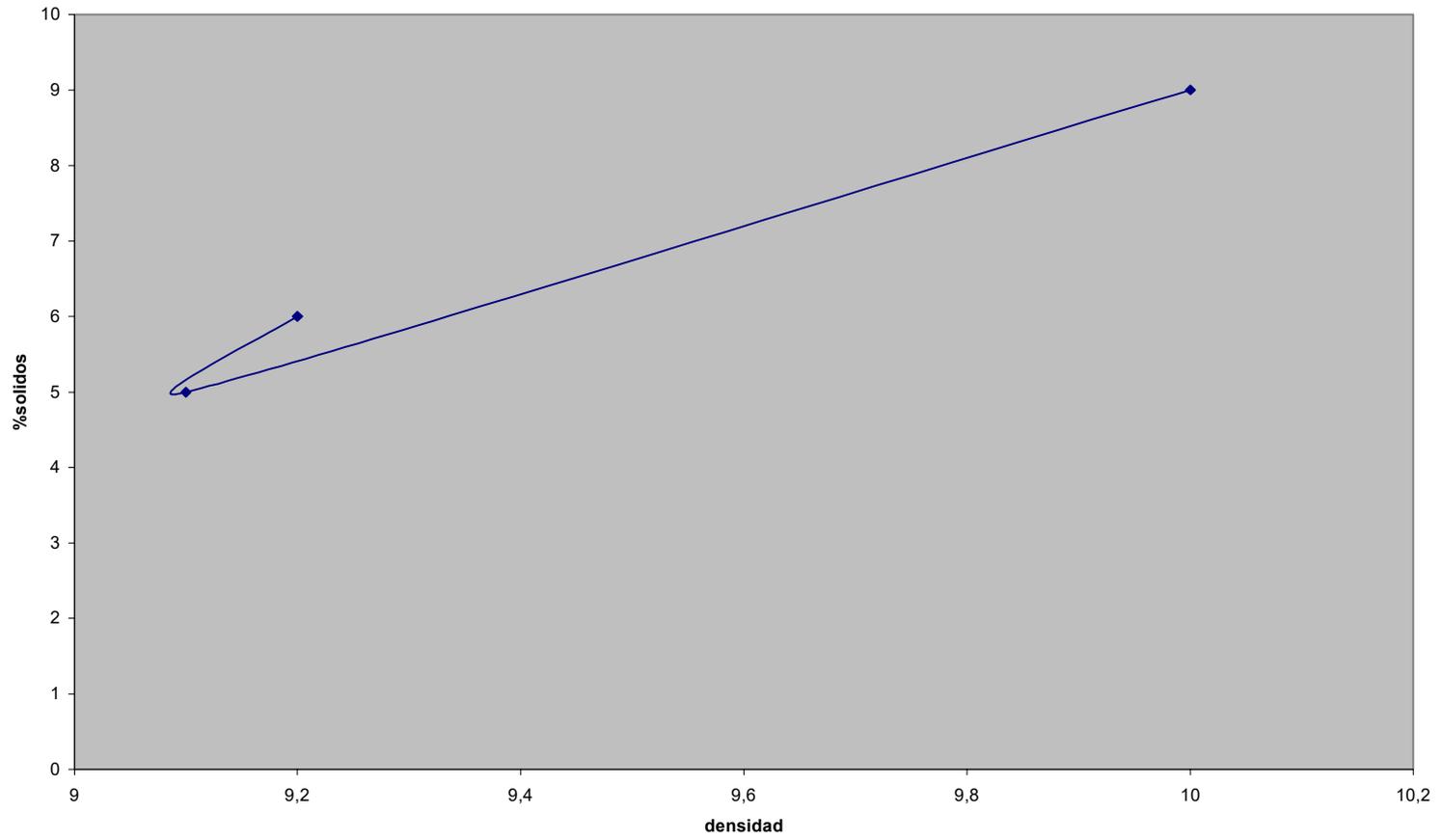
**%Sólidos vs. Densidad  
Pozo #1**



**%Sólidos vs. Densidad  
Pozo#2**



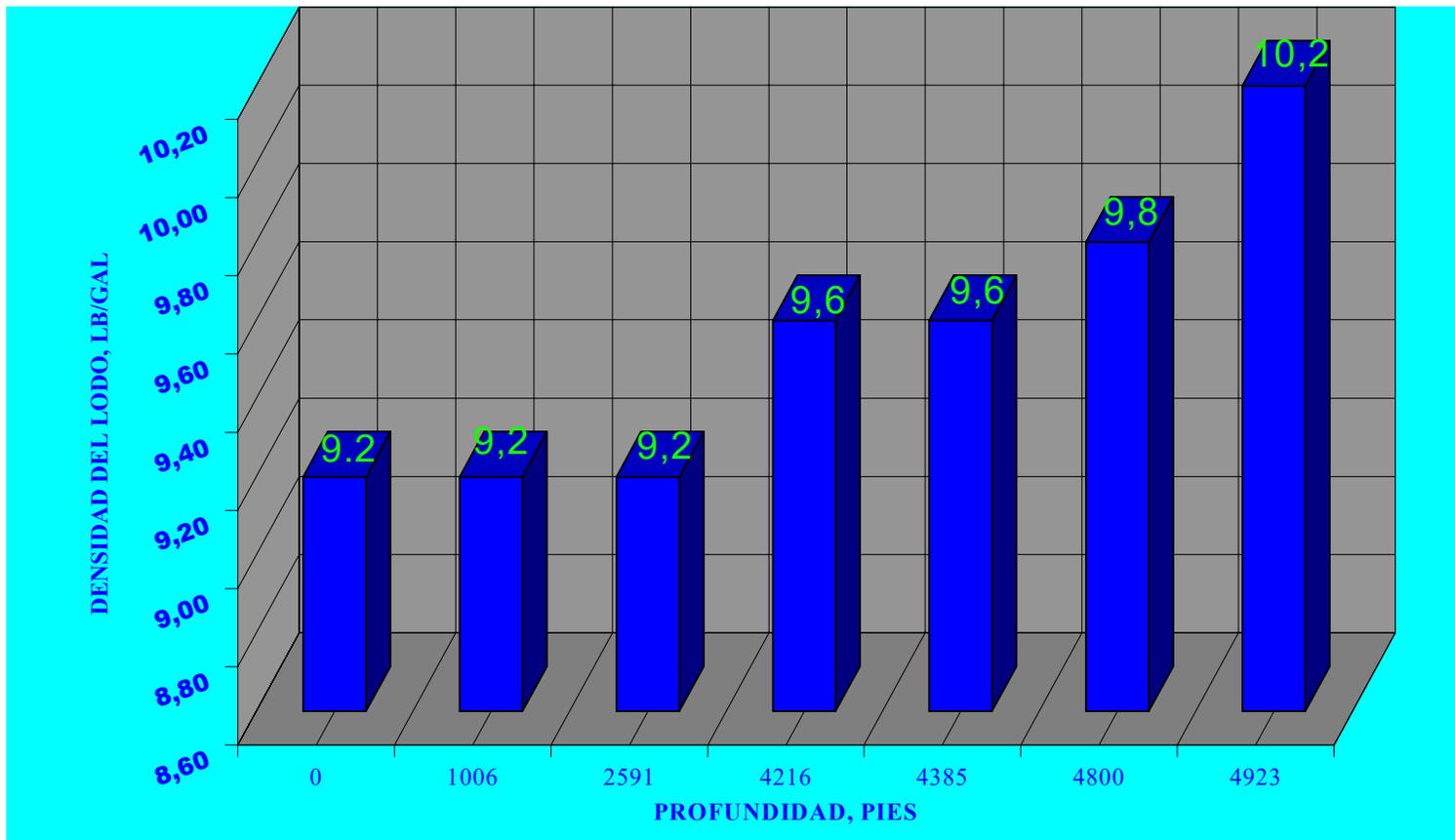
**%Sólidos vs. Densidad  
Pozo#3**



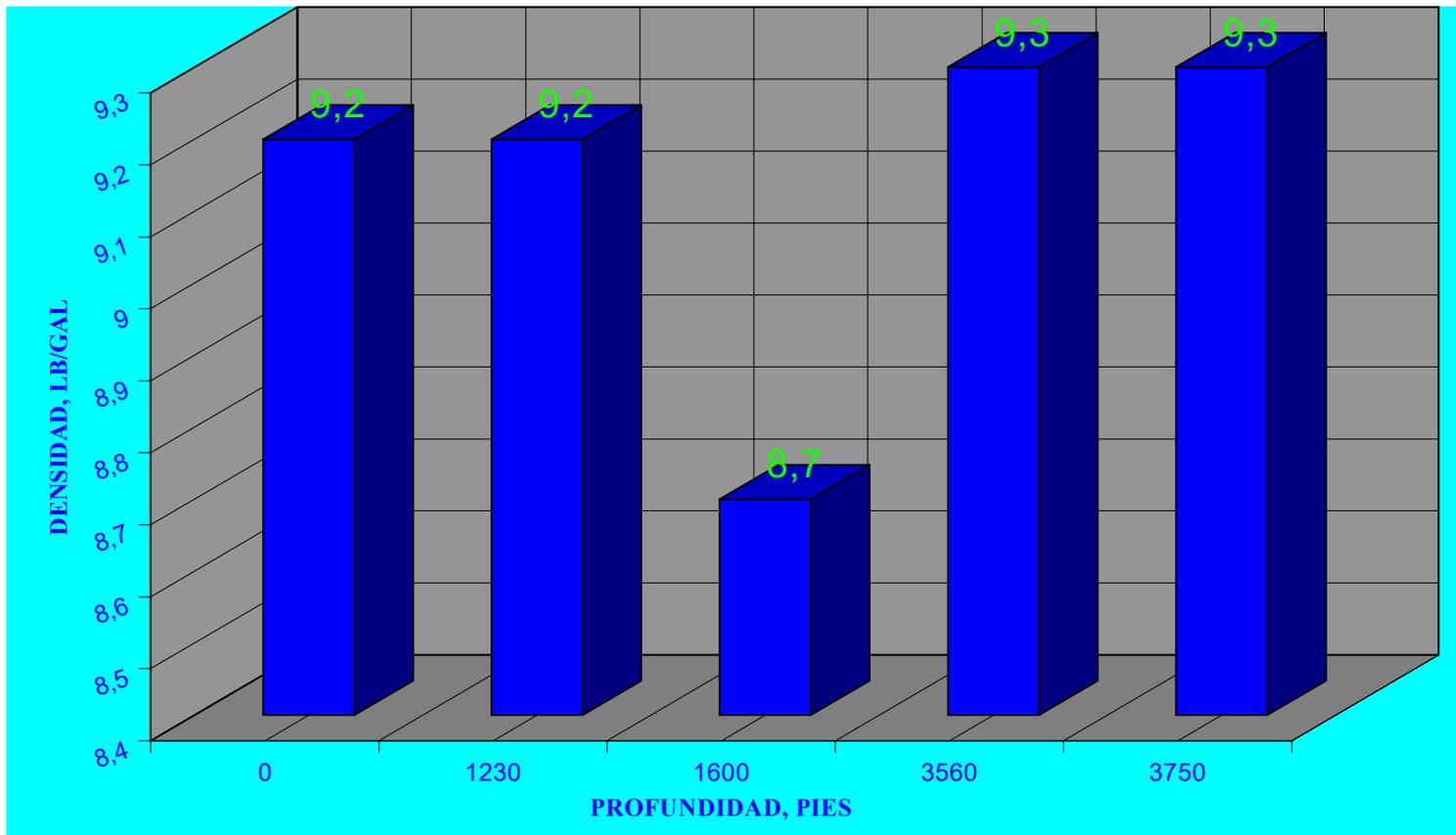
## **APENDICE C**

### **GRAFICOS DE DENSIDAD DEL LODO DE PERFORACION**

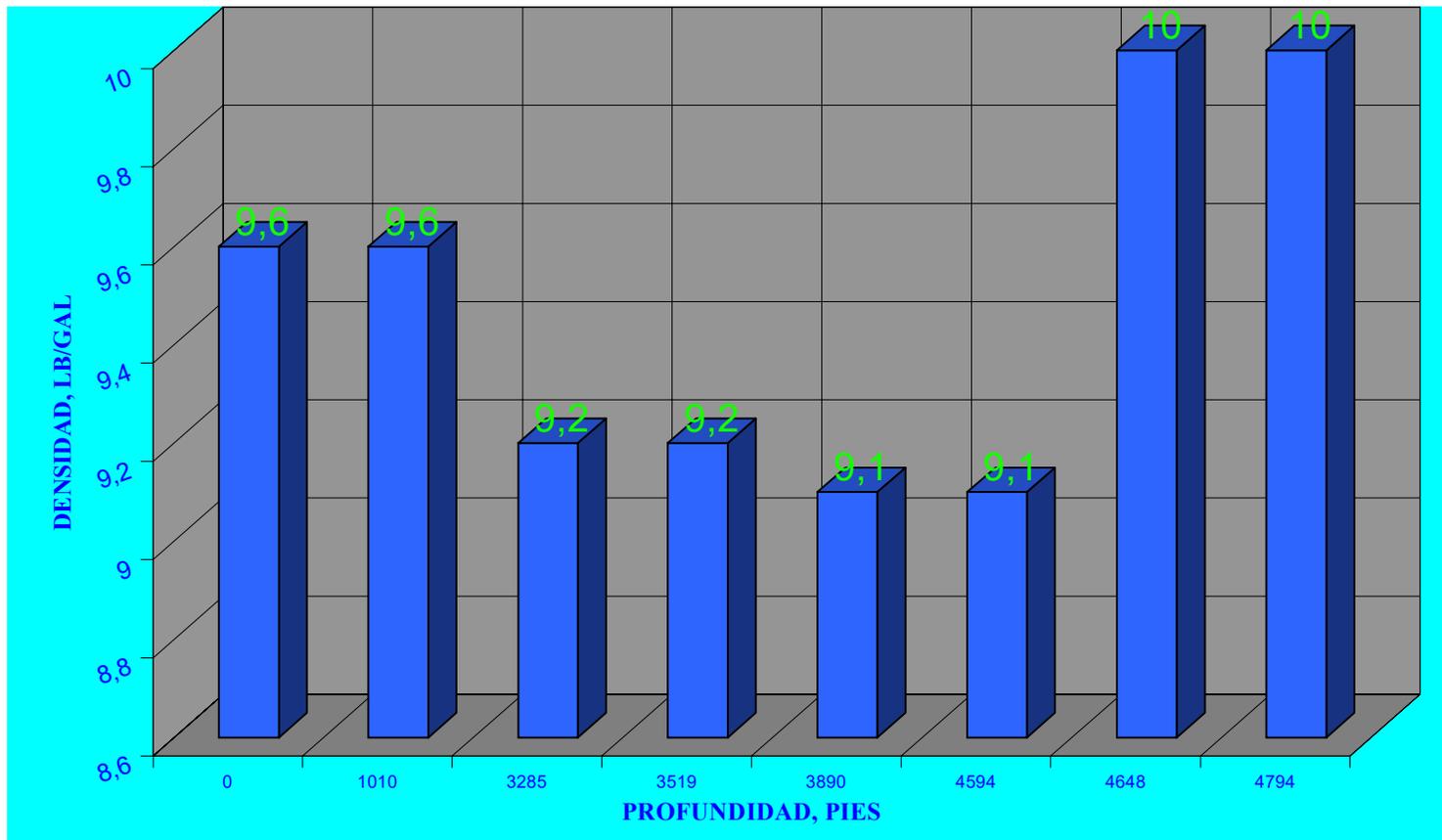
DENSIDAD DE LODO VS. PROFUNDIDAD  
POZO#1



DENSIDAD DEL LODO VS. PROFUNDIDAD  
POZO#2



**DENSIDAD DEL LODO VS. PROFUNDIDAD  
POZO #3**

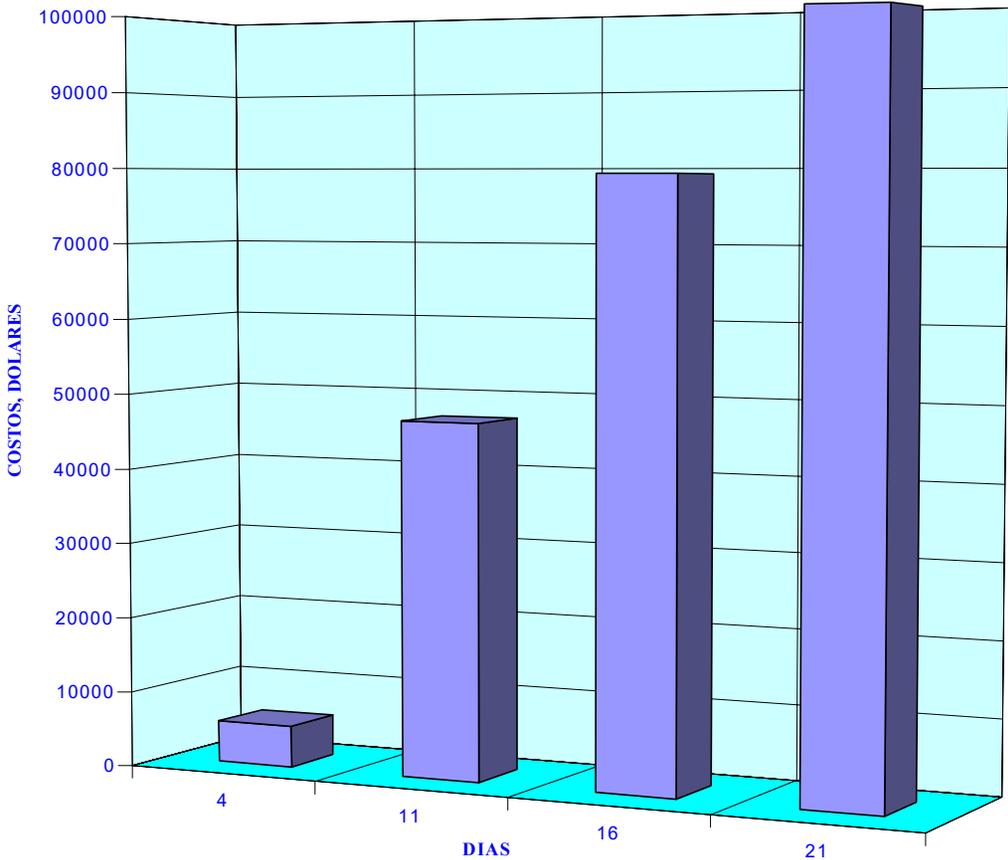


## **APENDICE D**

### **GRAFICOS DEL COSTO DEL LODO**

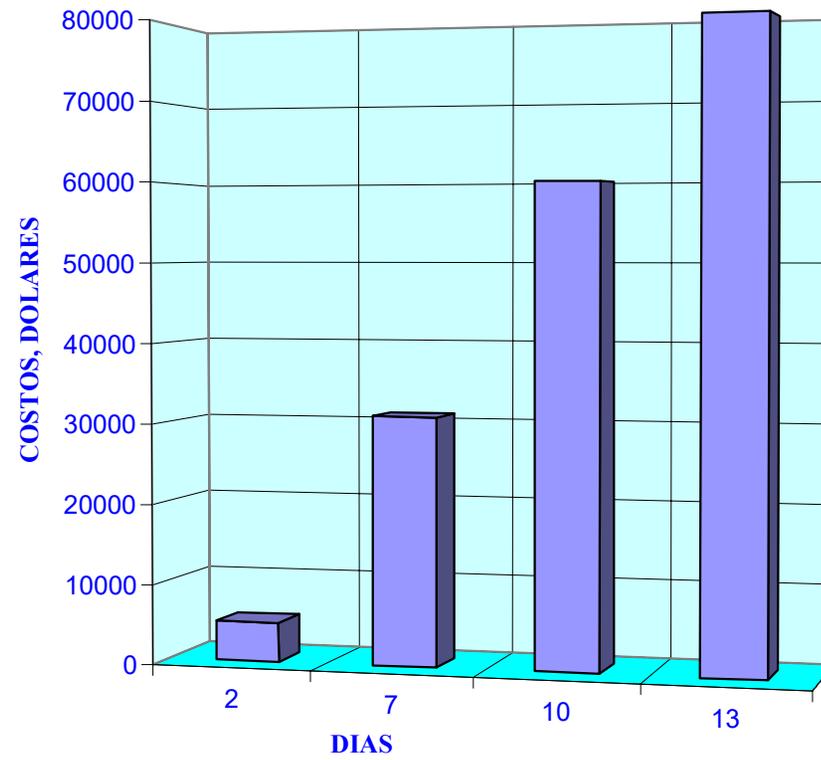
**COSTOS ACUMULADO DE LODO POR DIA**

**POZO#3**

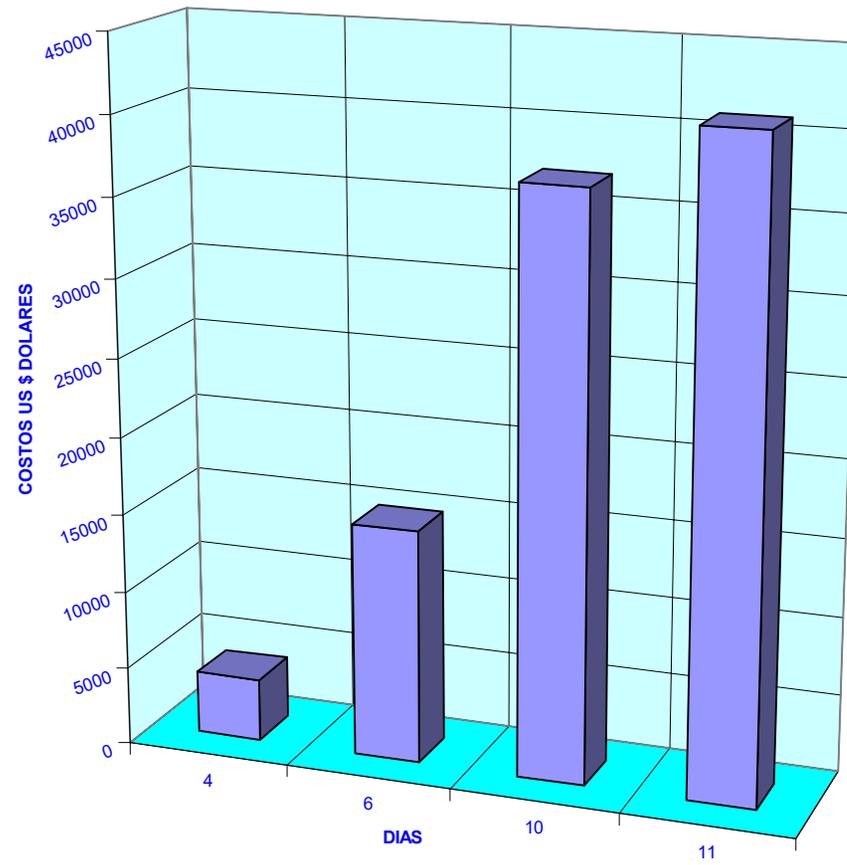


## COSTO ACUMULADO DEL LODO POR DIA

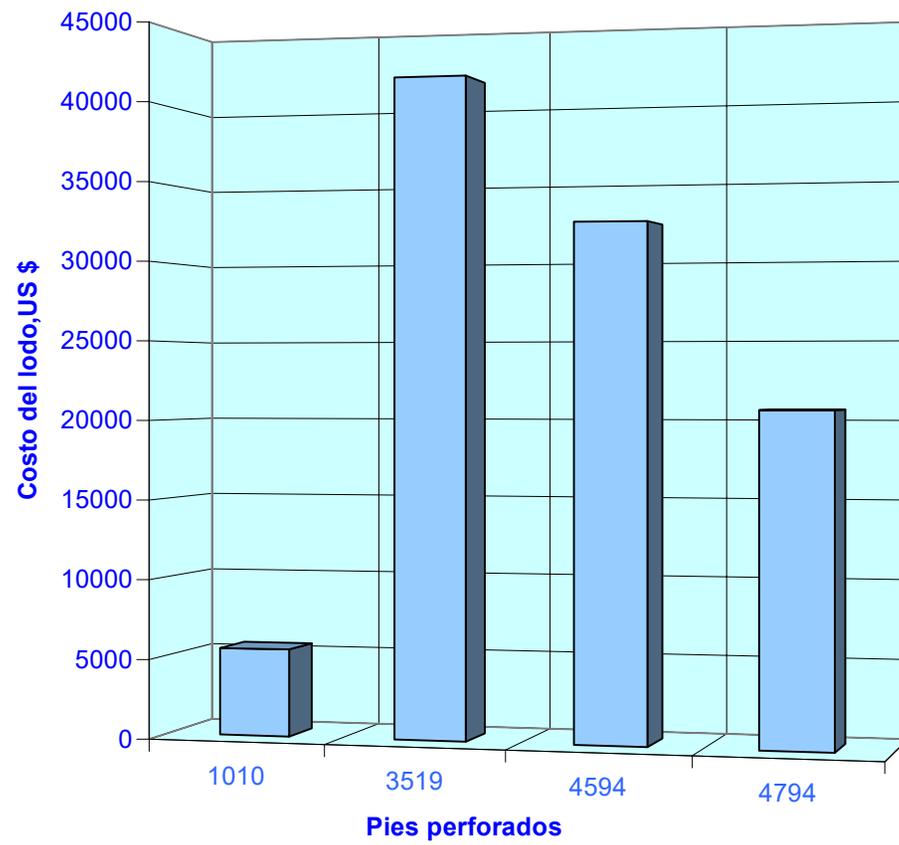
POZO#1



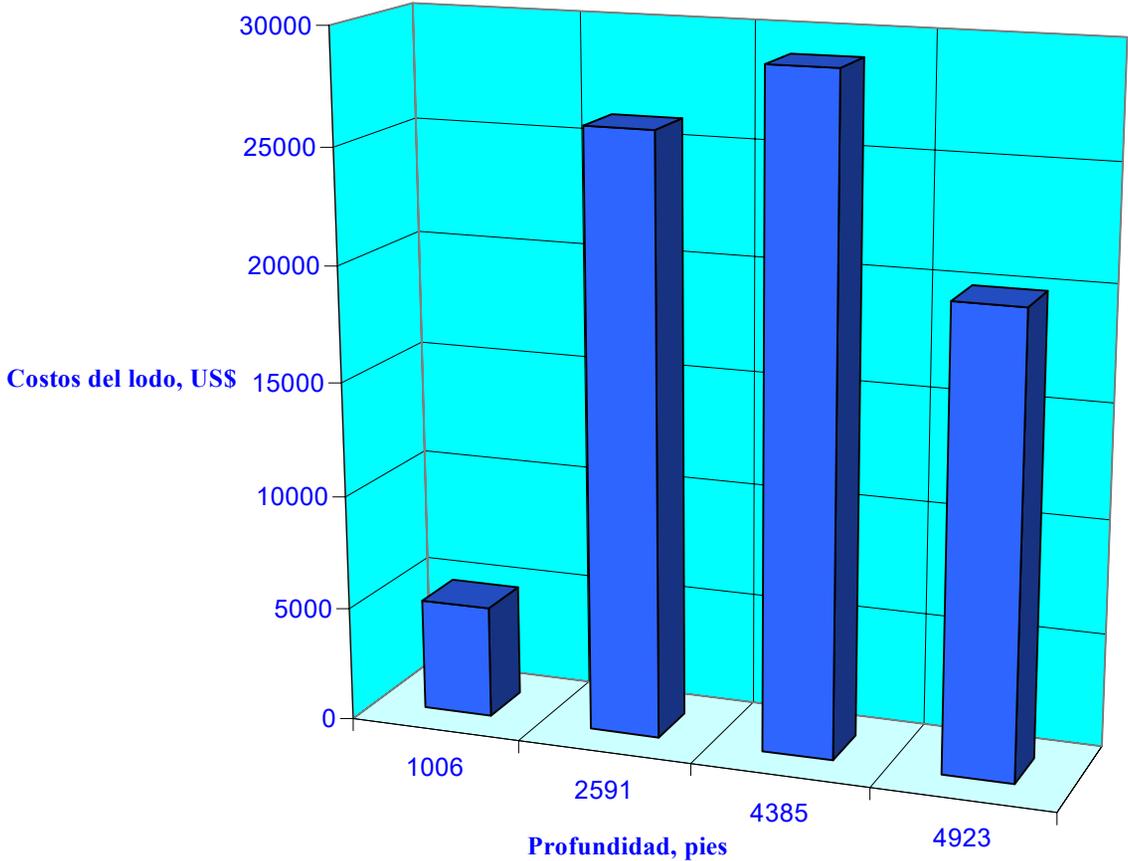
### COSTOS ACUMULADO DEL LODO POR DIA POZO #2



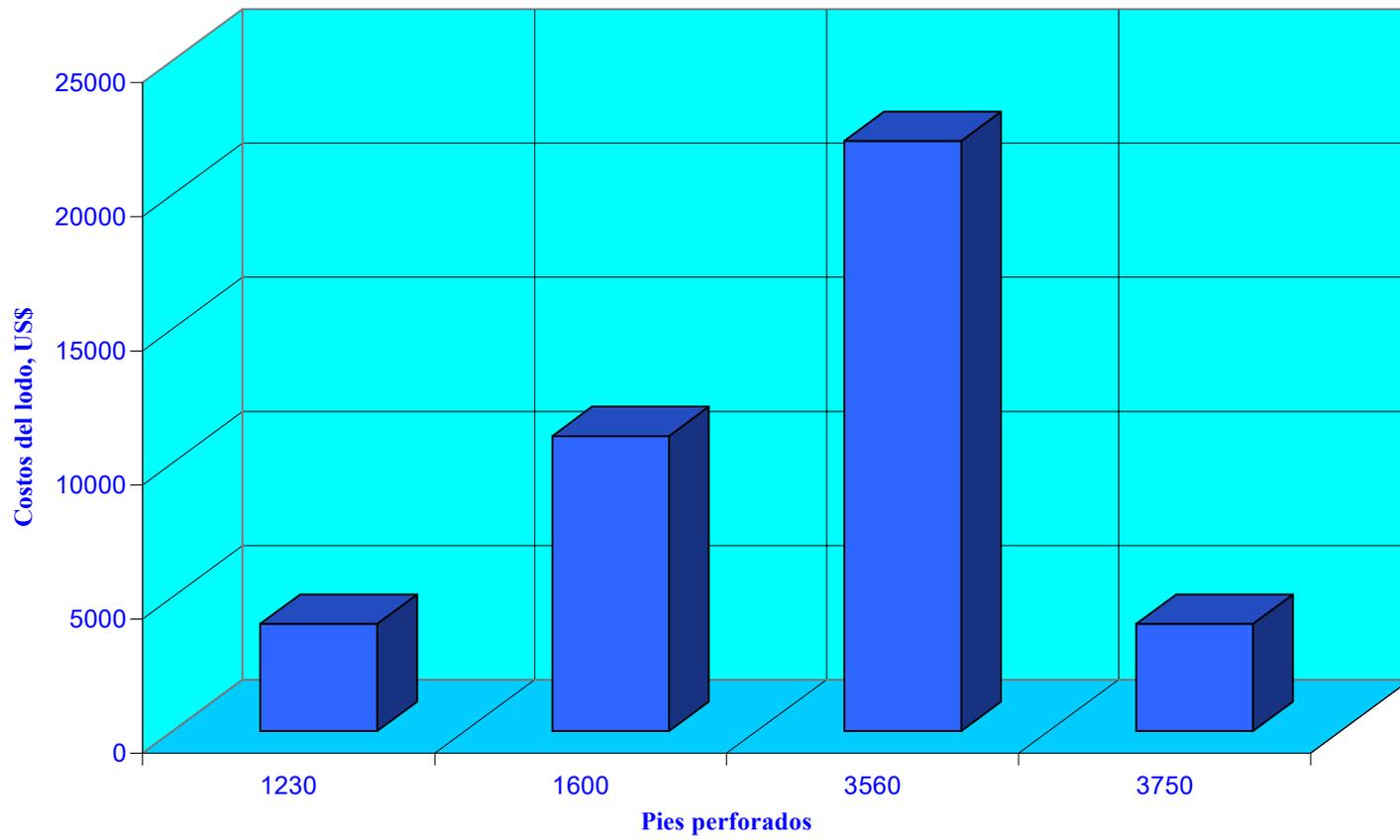
**Costo del lodo por intervalo perforado  
Pozo #3**



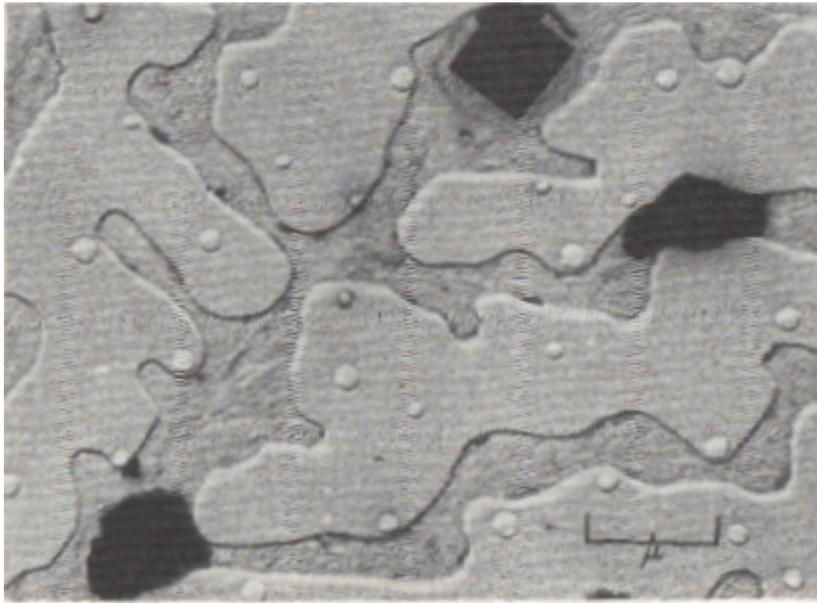
**Costos del lodo por intervalo perforado  
Pozo #1**



**Costos del lodo por intervalo perforado  
Pozo #2**



## **APENDICE E**



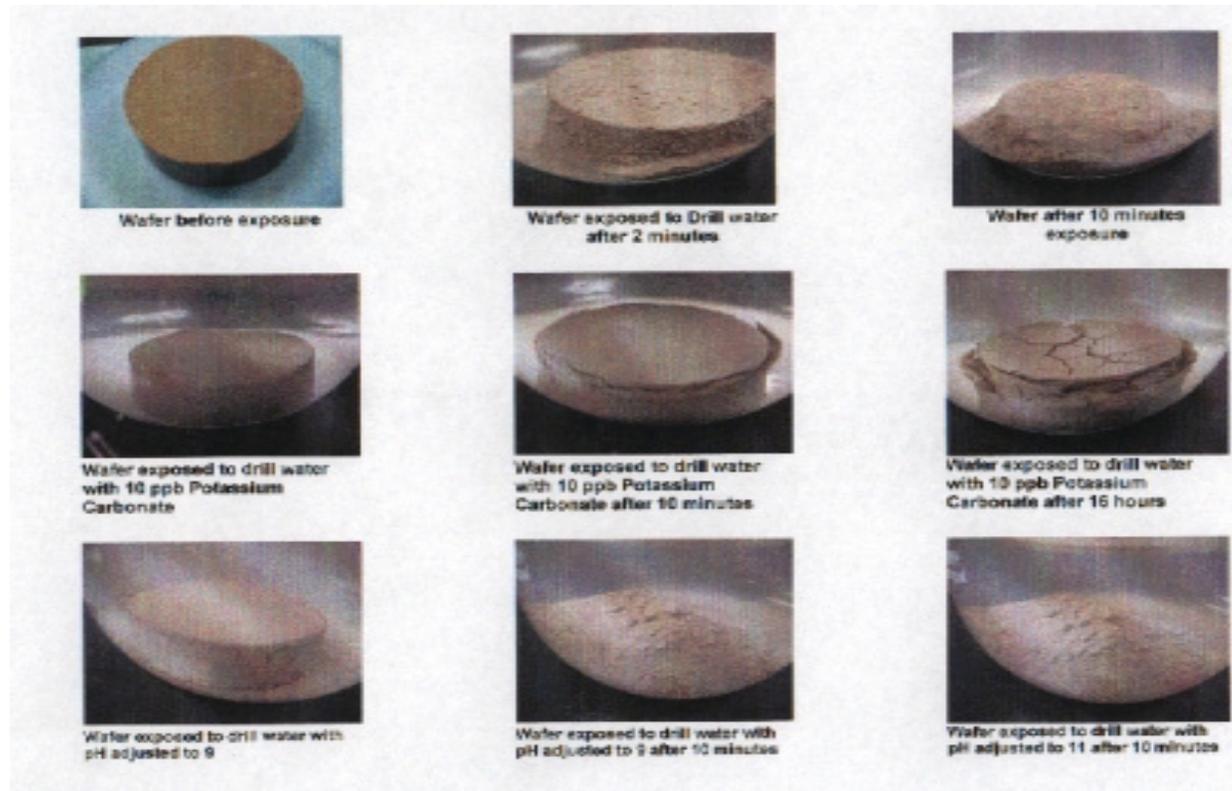
**POLIACRILAMIDA EN AGUA DESTILADA**

## **APENDICE F**



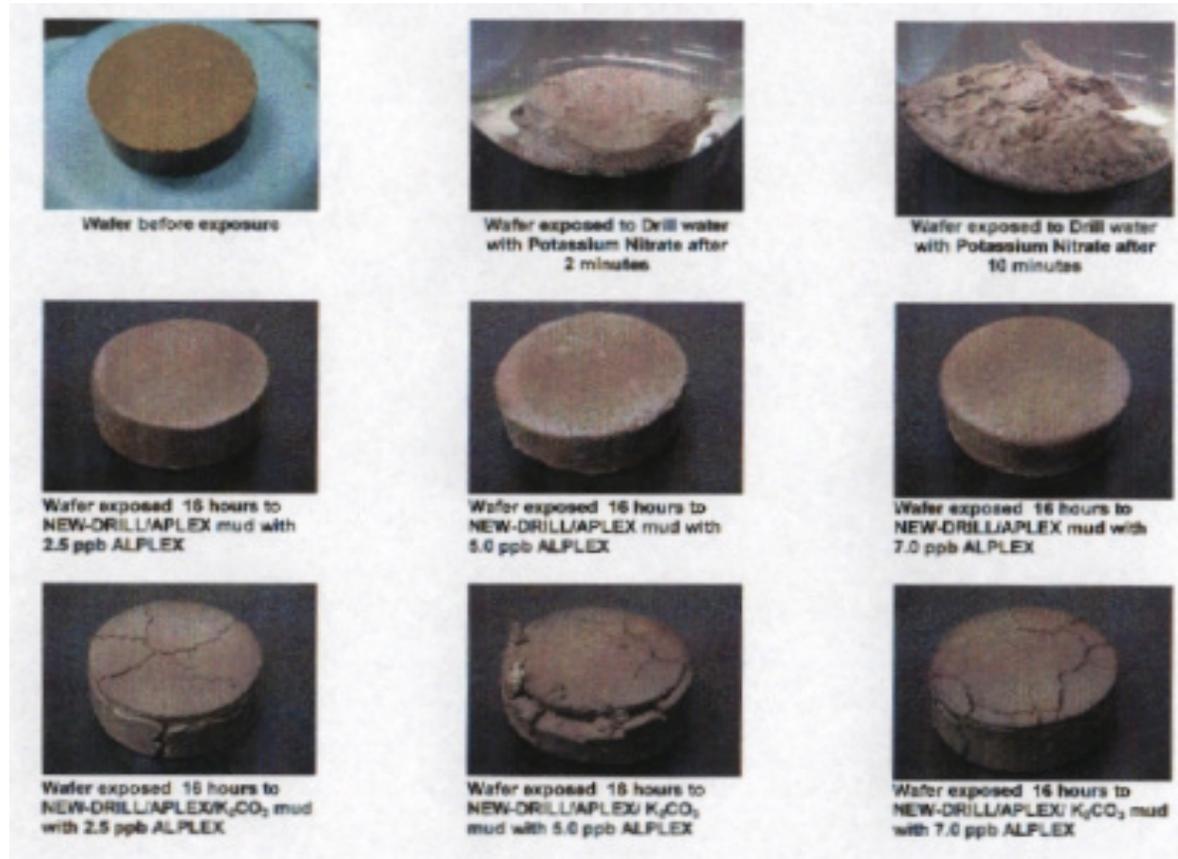
**MICROFOTOGRAFIA DE POLIACRILAMIDA DE ALTO PESO MOLECULAR CON 30% DE HIDRÓLISIS, EN AGUA DESTILADA, CONCENTRACIÓN 500 PPM**

## APENDICE G



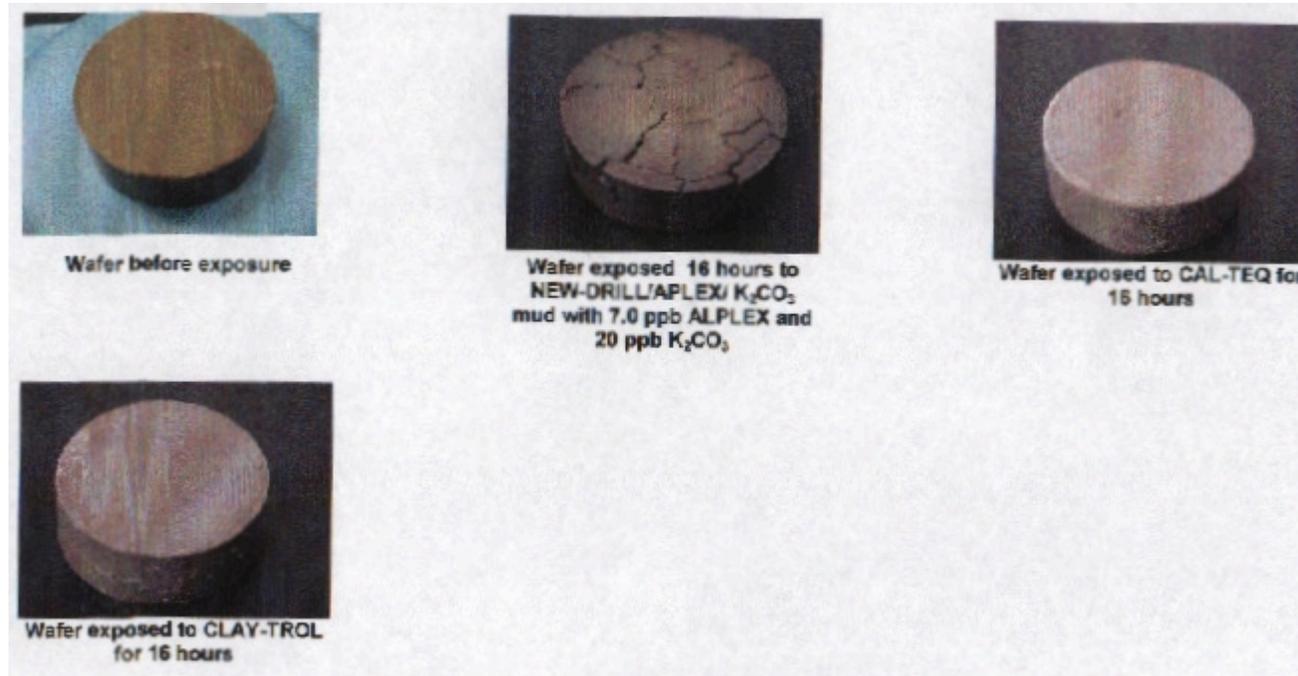
## PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD CON FLUIDO DE FORMACION

## APENDICE G.2



**PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD CON FLUIDO DE FORMACION**

## APENDICE G.3



**PRUEBAS DE COMPATIBILIDAD CON FLUIDO DE PERFORACION**



# APENDICE E

## CALCULOS HIDRAULICOS

### DATOS

Tuberia de perforacion de 4-1/2", 16.6 lb/pie; Lastrabarrenas de 6-3/4" de 100.08 y 108 lb/pie; broca de 8-3/4"

**PROFUNDIDAD = 2000 pies**

$\rho = 8,6$  lb/gal       $Q = 515$  gal/min      Capac tub. = 25.29 bbl  
 $P_p = 1350$  psi      Vol. Anular = 99.76 bbl      Vol. Piscinas = 402,8 bbl  
Lectura Fann: F300 = 36 ; F600 = 53

### 1) IMPACTO HIDRAULICO

$$A_n = 0.000767 * (15^2 + 3 * 13^2) = 0.5615 \text{ pulg}^2 \text{ (21)}$$
$$I_j = 1,73 * 10^{-3} * 8.6 * 515^2 / 0.5615 = 703,4 \text{ Lbf (22)}$$

### 2) VELOCIDAD EN LAS TOBERAS

$$V_j = 0.32086 * 515 / 0.5615 = 294,55 \text{ pie/seg (30)}$$

### 3) POTENCIA SOBRE LA BROCA

$$P_b = 294,55^2 * 8.6 / 1120 = 666,19 \text{ psi (25)}$$
$$H_{pb} = 666,19 * 515 / 1714 = 200,17 \text{ hp (26)}$$
$$\text{Area de la broca} = 0.7853 * 8,75^2 = 60,12 \text{ pulg}^2 \text{ (28)}$$
$$H_{pb}/\text{area} = 200,17 / 60,12 = 3.33 \text{ hp/pulg}^2 \text{ (27)}$$

$$\%Pb = 666,19/1350 = 49,39 \%(29)$$

$$Hps = 1350 * 515 / 1714 * 0,95 = 450,70 \text{ hp} (20)$$

#### 4) VELOCIDAD ANULAR

$$DC: V_a = (24,51 * 515) / (8,75^2 - 6,75^2) = 407,18 \text{ pie/min} (31)$$

$$DP: V_a = (24,51 * 515) / (8,75^2 - 4,5^2) = 224,15 \text{ pie/min}$$

#### 5) INDICE DE ACARREO DE RIPIOS

$$n = 3,32 \log(53/36) = 0,558 (12)$$

$$K = 36 * 511^{(1-0,558)} = 567,96 (33)$$

$$DC: CCI = 8,6 * 567,96 * 407,18 / 400.000 = 4,97 (32)$$

$$DP: CCI = 8,6 * 567,96 * 224,15 / 400.000 = 2,73$$

#### 6) TIEMPOS DE CIRCULACION

$$BU = 42 * 99,76 / 515 = 8,14 \text{ min} (34)$$

$$TCT = 42 * (99,76 + 25,29 + 402,8) / 515 = 43,05 \text{ min} (35)$$

### PROFUNDIDAD = 3000 pies

$$\rho = 9,3 \text{ lb/gal} \quad Q = 500 \text{ gal/min} \quad \text{Capac tub.} = 42,91 \text{ bbl}$$

$$Pp = 1050 \text{ psi} \quad \text{Vol. Anular} = 138,27 \text{ bbl} \quad \text{Vol. Piscinas} = 500 \text{ bbl}$$

$$\text{Lectura Fann: F300} = 41 ; \text{F600} = 60$$

#### 1) IMPACTO HIDRAULICO

$$A_n = 0,000767 * (15^2 + 3 * 13^2) = 0,5615 \text{ pulg}^2 (21)$$

$$I_j = 1,73 * 10^{-3} * 9,3 * 500^2 / 0,5615 = 716,34 \text{ Lbf} (22)$$

#### 2) VELOCIDAD EN LAS TOBERAS

$$V_j = 0,32086 * 500 / 0,5615 = 285,72 \text{ pie/seg} (30)$$

#### 3) POTENCIA SOBRE LA BROCA

$$P_b = 285,72^2 * 9,3 / 1120 = 677,85 \text{ psi} (25)$$

$$H_{pb} = 677,85 * 500 / 1714 = 197,74 \text{ hp} (26)$$

$$\text{Area de la broca} = 0,7853 * 8,75^2 = 60,12 \text{ pulg}^2 (28)$$

$$H_{pb}/\text{area} = 197,74 / 60,12 = 3,29 \text{ hp/pulg}^2 (27)$$

$$\%Pb = 677,85 / 1050 = 64.56 \%(29)$$

$$Hps = 1050 * 500 / 1714 * 0,95 = 322,42 \text{ hp} (20)$$

#### 4) VELOCIDAD ANULAR

$$\text{DC: } Va = (24,51 * 500) / (8,75^2 - 6,75^2) = 395,32 \text{ pie/min} (31)$$

$$\text{DP: } Va = (24,51 * 515) / (8,75^2 - 4,5^2) = 217,62 \text{ pie/min}$$

#### 5) INDICE DE ACARREO DE RIPIOS

$$n = 3.32 \log(60/41) = 0,549 (12)$$

$$K = 41 * 511^{(1-0,5615)} = 682,70 (33)$$

$$\text{DC: CCI} = 9,3 * 682,70 * 395,32 / 400.000 = 6,27 (32)$$

$$\text{DP: CCI} = 9,3 * 682,70 * 217,62 / 400.000 = 3,45$$

#### 6) TIEMPOS DE CIRCULACION

$$\text{BU} = 42 * 132,27 / 500 = 11,61 \text{ min} (34)$$

$$\text{TCT} = 42 * (138,27 + 42,91 + 500) / 500 = 57,22 \text{ min} (35)$$

### PROFUNDIDAD = 4300 pies

$$\rho = 9,5 \text{ lb/gal} \quad Q = 520 \text{ gal/min} \quad \text{Capac tub.} = 62.46 \text{ bbl}$$

$$Pp = 1200 \text{ psi} \quad \text{Vol. Anular} = 176,61 \text{ bbl} \quad \text{Vol. Piscinas} = 530 \text{ bbl}$$

$$\text{Lectura Fann: } F300 = 31 ; F600 = 44$$

#### 1) IMPACTO HIDRAULICO

$$An = 0.000767 * (15^2 + 3 * 13^2) = 0.5615 \text{ pulg}^2 (21)$$

$$Ij = 1,73 * 10^{-3} * 9,5 * 520^2 / 0.5615 = 791,46 \text{ Lbf} (22)$$

#### 2) VELOCIDAD EN LAS TOBERAS

$$Vj = 0.32086 * 520 / 0.5615 = 297,15 \text{ pie/seg} (30)$$

#### 3) POTENCIA SOBRE LA BROCA

$$Pb = 297,15^2 * 9,5 / 1120 = 748,93 \text{ psi} (25)$$

$$Hpb = 748,93 * 520 / 1714 = 227,21 \text{ hp} (26)$$

$$\text{Area de la broca} = 0.7853 * 8,75^2 = 60,12 \text{ pulg}^2 (28)$$

$$Hpb/\text{area} = 227,21 / 60,12 = 3.78 \text{ hp/pulg}^2 (27)$$

$$\%Pb = 748,93 / 1200 = 62.41 \%(29)$$

$$H_{ps} = 1200 * 520 / 1714 * 0,95 = 383,22 \text{ hp (20)}$$

#### 4) VELOCIDAD ANULAR

$$DC: V_a = (24,51 * 520) / (8,75^2 - 6,75^2) = 411,14 \text{ pie/min (31)}$$

$$DP: V_a = (24,51 * 515) / (8,75^2 - 4,5^2) = 226,33 \text{ pie/min}$$

#### 5) INDICE DE ACARREO DE RIPIOS

$$n = 3.32 \log(44/31) = 0,505 \text{ (12)}$$

$$K = 31 * 511^{(1-0,505)} = 679,25 \text{ (33)}$$

$$DC: CCI = 9,5 * 679,25 * 411,14 / 400.000 = 6,63 \text{ (32)}$$

$$DP: CCI = 9,5 * 679,25 * 226,33 / 400.000 = 3,65$$

#### 6) TIEMPOS DE CIRCULACION

$$BU = 42 * 176,61 / 520 = 14,26 \text{ min (34)}$$

$$TCT = 42 * (176,61 + 62,46 + 530) / 520 = 62,11 \text{ min (35)}$$

### PROFUNDIDAD = 4900 pies

$$\begin{aligned} \rho &= 9,8 \text{ lb/gal} & Q &= 520 \text{ gal/min} & \text{Capac tub.} &= 71 \text{ bbl} \\ P_p &= 1200 \text{ psi} & \text{Vol. Anular} &= 194,68 \text{ bbl} & \text{Vol. Piscinas} &= 600 \text{ bbl} \\ \text{Lectura Fann: } & F300 = 33 ; F600 = 47 \end{aligned}$$

#### 1) IMPACTO HIDRAULICO

$$A_n = 0.000767 * (15^2 + 3 * 13^2) = 0.5615 \text{ pulg}^2 \text{ (21)}$$

$$I_j = 1,73 * 10^{-3} * 9,8 * 520^2 / 0.5615 = 816,46 \text{ Lbf (22)}$$

#### 2) VELOCIDAD EN LAS TOBERAS

$$V_j = 0.32086 * 520 / 0.5615 = 297,15 \text{ pie/seg (30)}$$

#### 3) POTENCIA SOBRE LA BROCA

$$P_b = 297,15^2 * 9,8 / 1120 = 772,61 \text{ psi (25)}$$

$$H_{pb} = 772,61 * 520 / 1714 = 234,40 \text{ hp (26)}$$

$$\text{Area de la broca} = 0.7853 * 8,75^2 = 60,12 \text{ pulg}^2 \text{ (28)}$$

$$H_{pb}/\text{area} = 234,40 / 60,12 = 3.90 \text{ hp/pulg}^2 \text{ (27)}$$

$$\%P_b = 772,61 / 1200 = 64.38 \% \text{ (29)}$$

$$H_{ps} = 1200 * 520 / 1714 * 0,95 = 383,22 \text{ hp (20)}$$

#### 4) VELOCIDAD ANULAR

$$\text{DC: } V_a = (24,51 * 520) / (8,75^2 - 6,75^2) = 411,14 \text{ pie/min (31)}$$

$$\text{DP: } V_a = (24,51 * 515) / (8,75^2 - 4,5^2) = 226,33 \text{ pie/min}$$

#### 5) INDICE DE ACARREO DE RIPIOS

$$n = 3.32 \log(47/33) = 0,510 \text{ (12)}$$

$$K = 31 * 511^{(1-0,510)} = 701,32 \text{ (33)}$$

$$\text{DC: CCI} = 9,8 * 701,32 * 411,14 / 400.000 = 7,06 \text{ (32)}$$

$$\text{DP: CCI} = 9,8 * 701,32 * 226,33 / 400.000 = 3,89$$

#### 6) TIEMPOS DE CIRCULACION

$$\text{BU} = 42 * 194,68 / 520 = 15,72 \text{ min (34)}$$

$$\text{TCT} = 42 * (194,68 + 71 + 600) / 520 = 69,92 \text{ min (35)}$$

## BIBLIOGRAFIA

1. A. Torres, “Caracterización Regional de la Arenisca Productora M-1, Formación Napo, en la Cuenca Oriente-Ecuador”
2. M-I, Manual de Fluidos de Perforación, Cap 3, pag. 1-3.
3. IMCO, Manual de Fluidos de Perforación, Cap 13, 1-3.
4. Didier Gazaniol, Thierry Forsanz, M.J.F. Boisson y J.M. Piau, “Wellbore failure Mechanisms in Shales: Prediction and Prevention”, Paper SPE.
5. J.M. Greener, G. E. Trimble, G.M. Singer y M.J. Barnes, “Opon Gas Field, Colombia: Part II-Drilling Case History”, Paper SPE.
6. S. Benaissa, D.K. Clapper, P. Parigot y D. Dgouy, “Oilfield Applications of Aluminum Chemistry and Experience with Aluminum Based Drilling Fluid Additive”, Paper SPE.
7. Baroid, Manual de Fluidos de Perforación, Capítulos 7, 8 y 9.