

**REOLOGÍA E HIDRÁULICA DE POZOS ESTRATIGRÁFICOS TIPO SLIM
HOLE, APLICACIÓN PERFORACIÓN CUENCA CAUCA-PATÍA**

**JONATHAN ENRIQUE BUDEZ VERGARA
DIDIER ALBERTO MUÑOZ PINZÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2012**

**REOLOGÍA E HIDRÁULICA DE POZOS ESTRATIGRÁFICOS TIPO SLIM
HOLE, APLICACIÓN PERFORACIÓN CUENCA CAUCA-PATÍA**

**JONATHAN ENRIQUE BUDEZ VERGARA
DIDIER ALBERTO MUÑOZ PINZÓN**

Trabajo de grado para optar el título de Ingenieros de Petróleos

Director:

M.Sc. MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS

Codirector:

M.Sc. EMILIANO ARIZA LEÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIA

A Dios por siempre brindarme siempre la paz y sabiduría necesaria para enfrentar todos los retos a lo largo de mi vida.

A mi familia hermosa, mi padre Froilan Budez, mi madre Marelvys Vergara y mi hermanita Karen Budez, los cuales siempre me dieron su apoyo incondicionalmente y son mi motivación más importante en mí día a día.

A mi familia en general, mis abuelitas, mi cuñado Pablo, todos mis tíos, mi tía Carlota, Ania, Omar, Nancy y primos especialmente Luis que es como un hermano para mí y mis primos Geovanny, Brenda, Antonio, y por supuesto mi primita y colega Ceimy.

A mi novia Nathalia que llegó en el momento preciso en mi vida para brindarme apoyo, cariño, mucha felicidad, nuevas metas y sueños por cumplir.

A mis amigos de FOC Didier, Estevenson, Oscar, Oriol, Samuel, también a Cristina, Laura y la señora Yolanda, además de Carvajal, Jesús, Rubén, Brian, Lorena, Carito, Fadia y en general todos los que conforman mi grupo de amigos, el cual gracias a Dios es bastante y grande y mil disculpas si se me pasó algún nombre, de corazón a todos saben que están incluidos.

A los ingenieros Roberto Robayo, Andrés Orozco, Diego León, Francisco Godin y Camilo Arteaga por todo el apoyo y conocimiento brindado durante mi pasantía.

Jonathan Enrique Budez Vergara

DEDICATORIA

Dedico cada uno de mis logros a mi mamá, que con sus enseñanzas forjó el hombre que soy hoy día, a mi esposa e hijos que me enseñaron a amar cada momento de nuestras vidas y a mi familia por haber creído incondicionalmente siempre en mí.

¡Los amo mucho a todos!

Didier Alberto Muñoz Pinzón

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos todos los espacios necesarios para nuestra excelente formación académica y personal.

A la escuela de Ingeniería de Petróleos, todo su personal docente y administrativo por todas las enseñanzas personales y conocimientos.

A nuestro director Manuel Cabarcas y codirector Emiliano Ariza por su disposición en todo momento.

A todas las personas que de alguna forma contribuyeron al desarrollo de este proyecto y de nuestra formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
<i>1. MARCO TEORICO.....</i>	<i>18</i>
1.1 CARACTERÍSTICAS SLIM HOLE.....	18
1.1.1 REOLOGÍA	18
1.1.2 HIDRÁULICA.....	19
1.1.2.1 EFECTOS DEL ESPACIO ANULAR REDUCIDO.....	21
1.1.2.2 EFECTOS DE LA ROTACIÓN.....	22
1.1.2.3 EFECTOS DE LA EXCENTRICIDAD	24
1.1.3 CORAZONAMIENTO EN POZOS TIPO SLIM HOLE.....	26
1.1.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN.....	26
<i>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</i>	<i>29</i>
<i>3. RESULTADOS.....</i>	<i>39</i>
<i>4. ANALISIS DE RESULTADOS</i>	<i>54</i>
<i>5. CONCLUSIONES.....</i>	<i>60</i>
<i>6. RECOMENDACIONES</i>	<i>61</i>
<i>7. BIBLIOGRAFÍA.....</i>	<i>62</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Determinación del régimen de flujo en anulares Slim Hole.....	23
<i>Figura 2</i> Excentricidad.....	25
<i>Figura 4</i> Estado mecánico del pozo ANH-PATÍA 3-ST-S	31
<i>Figura 5</i> Estado mecánico del pozo ANH- PATÍA 29-ST-S	32
<i>Figura 6</i> Esquema tubería concéntrica (izquierda) y excéntrica (derecha)	36
<i>Figura 7</i> Registro Caliper pozos ANH-PATÍA 3-ST-S (izquierda) y ANH-PATÍA 29-ST-S (derecha)	37
<i>Figura 8</i> Esquema del criterio aplicado en los pozos para representar la geometría real	38
<i>Figura 9</i> Pérdidas de presión para geometría ideal del pozo ANH-CAUCA 32-ST-S....	40
<i>Figura 10</i> Pérdidas de presión para geometría ideal del pozo ANH-PATÍA 3-ST-S.....	41
<i>Figura 11</i> Pérdidas de presión para geometría ideal del pozo ANH-PATÍA 29-ST-S....	42
<i>Figura 12</i> Pérdidas de presión para anular excéntrico ANH-CAUCA 32-ST-S.....	43
<i>Figura 13</i> Pérdidas de presión para anular excéntrico ANH-PATÍA 3-ST-S.....	44
<i>Figura 14</i> Pérdidas de presión para anular excéntrico ANH-PATÍA 29-ST-S	45
<i>Figura 15</i> Pérdidas de presión para geometría real ANH-CAUCA 32-ST-S.....	46
<i>Figura 16</i> Pérdidas de presión para geometría real ANH-PATÍA 3-ST-S.....	47

Figura 17 Pérdidas de presión para geometría real ANH-PATÍA 29-ST-S.....	47
Figura 18 Optimización pozo ANH-CAUCA 32-ST-S.....	48
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN	48
Figura 19 Optimización pozo ANH-PATÍA 3-ST-S	49
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN	49
Figura 20 Optimización pozo ANH-PATÍA 29-ST-S.....	50
Figura 21 Pérdidas de presión con hidráulica optimizada pozo ANH-CAUCA 32-ST-S51	
Figura 22 Pérdidas de presión con hidráulica optimizada pozo ANH-PATÍA 3-ST-S...	52
Figura 23 Pérdidas de presión con hidráulica optimizada pozo ANH-PATÍA 29-ST-S .	53
Figura 24 Comparación pérdidas de presión totales esquemas ideal y excéntrico pozo ANH-CAUCA 32-ST-S.....	56
Figura 25 Comparación pérdidas de presión totales bajo los tres esquemas de simulación pozo ANH-PATÍA 3-ST-S.....	57
Figura 26 Comparación pérdidas de presión totales bajo los tres esquemas de simulación pozo ANH-PATÍA 29-ST-S.....	58
Figura 27 Diagrama de flujo metodología aplicada.....	59

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Razón de las pérdidas de presión en el anular y tubería</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2 Parámetros operacionales pozos ANH-CAUCA 32-ST-S, ANH-PATÍA 3-ST-S, y ANH-PATÍA 29-ST-S.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 3 Parámetros reológicos ANH-CAUCA 32-ST-S, ANH-PATÍA 3-ST-S y ANH-PATÍA 29-ST-S</i>	<i>34</i>

RESUMEN

TITULO: REOLOGÍA E HIDRÁULICA DE POZOS ESTRATIGRÁFICOS TIPO SLIM HOLE, APLICACIÓN PERFORACIÓN CUENCA CAUCA-PATÍA*

AUTORES: JONATHAN ENRIQUE BUDEZ VERGARA**

DIDIER ALBERTO MUÑOZ PINZÓN

Palabras Claves: Slim Hole, Perforación, Reología, Hidráulica.

Con el desarrollo del proyecto se busca implementar la herramienta software COMPASS-WELLPLAN de Halliburton para los cálculos de reología e hidráulica de perforación de pozos estratigráficos tipo Slim Hole, usando los datos de los pozos perforados por la Universidad Industrial de Santander (UIS) para la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) en la Cuenca Cauca Patía, evaluar los resultados y buscar optimización para futuras perforaciones.

En este trabajo se realizó un análisis de las características reológicas del lodo y su efecto sobre los problemas operacionales presentados. Además se plantearon tres esquemas de simulación que permitieron verificar la influencia de los parámetros más importantes de la perforación Slim Hole como excentricidad y geometría en los cálculos de hidráulica.

Como resultado se encontró que las propiedades reológicas del lodo eran adecuadas para el tipo del pozo a excepción del uso de Carbonato de Calcio (CaCO_3) como material pesante lo que causó la constante pega de la herramienta recuperadora de núcleo (Core Barrel), asimismo se observó una influencia trascendental de la geometría del pozo sobre los cálculos de las pérdidas de presión, mientras que la excentricidad no jugó un papel importante.

Finalmente se presenta a través de gráficas la optimización de la hidráulica que podría ser utilizada para la perforación de nuevos proyectos sobre estas cuencas y un conjunto de recomendaciones que podrían mejorar el desempeño en estos.

* Proyecto de grado

** Facultad: Ingenierías Físicoquímicas Escuela: Ingeniería de Petróleos Director: M.Sc. Manuel Cabarcas Codirector: M.Sc. Emiliano Ariza

ABSTRACT

TITLE: RHEOLOGY AND HYDRAULICS OF STRATIGRAPHIC SLIM HOLE WELL, A DRILLING APPLICATION OF CAUCA-PATÍA BASIN*

AUTHORS: JONATHAN ENRIQUE BUDEZ VERGARA**

DIDIER ALBERTO MUÑOZ PINZÓN

Keywords: Slim Hole, Drilling, Rheology, Hydraulics

The development of this Project aim to use the software COMPASS-WELLPLAN (Halliburton software) for rheology and hydraulic calculations of stratigraphic Slim Hole well, using the field data of the wells drilled by Industrial University of Santander (UIS) to National Hydrocarbons Agency (ANH) in the Cauca-Patía basin, also assessing the results to find future drilling optimizations which could be made by the university.

In this work an analysis of the drilling fluid rheology characteristics and its effects upon the operational problems occurred at field was performed. Furthermore three scenarios of simulation were executed to verify the influence of important operational parameter such as eccentricity and geometry in hydraulic calculations of Slim Hole wells.

Appropriate properties were found in the drilling fluid used. However, the use of Calcium Carbonate (CaCO₃) was not correct as weight material. It causes the continuous stick of the tool used by recovering the cores (Core barrel). In addition a huge influence of the well geometry in hydraulic calculations was observed. On the other hand the eccentricity did not play an important role in the calculations.

Finally hydraulic optimization is presented using charts which could be used to improve future drilling projects. Also, several recommendations are presented to enhance the performance of these future projects.

* Thesis

** Faculty: Physical Chemistry Engineering School: Petroleum Engineering Director: M.Sc. Manuel Cabarcas Co director: M.Sc. Emiliano Ariza

INTRODUCCIÓN

La perforación de pozos tipo Slim Hole ha contribuido a la exploración y desarrollo de nuevas cuencas a nivel mundial debido a los bajos costos operativos en comparación con la perforación convencional¹. Las características principales de este tipo de pozo son: diámetros reducidos y estrechos espacios anulares que generalmente usan altas velocidades de rotación.

Debido a los pequeños espacios anulares se hace imprescindible un adecuado control de las propiedades reológicas del fluido de perforación. Estas controlarán parámetros importantes como la limpieza del hueco, estabilidad del pozo y rata de penetración (ROP por sus siglas en ingles). Asimismo los pozos estratigráficos son de importancia para la obtención de muestras representativas.

En los cálculos de hidráulica para este tipo de pozos además de los parámetros convencionales debe tener en cuenta factores como excentricidad y rotación debido a la geometría, la cual influye directamente sobre las pérdidas de presión en el sistema, que

¹ Pedersen J.N., 1959. Relating Slim-Hole Drilling Performance to South Louisiana Drilling Problems. SPE 1247-G.

pueden llegar a ser hasta del 90% solo en el espacio anular, mientras que en pozos convencionales este mismo valor está distribuido entre la sarta y la broca².

El objetivo de este trabajos es presentar un análisis reológico e hidráulico de los pozos Slim Hole perforados por la UIS para la ANH y observar la influencia de los parámetros característicos de estos sobre los resultados para futuras aplicaciones, mediante el uso de la herramienta software COMPASS-WELLPLAN de Landmark Halliburton Versión 5000 y de la cual la escuela de Ingeniería de Petróleos de la UIS posee licencia.

² Aas B., Hansen S., Merlo A., Rommetveit R. & Sterri N., 1999. A New Hydraulics Model for Slimhole Drilling Applications SPE/IADC 57579.

1. MARCO TEORICO

1.1 CARACTERÍSTICAS SLIM HOLE

Para la comprensión y justificación del desarrollo de este proyecto se hace indispensable una descripción de las particularidades que se afrontan a la hora de perforar pozos tipo Slim-Hole con respecto a los pozos perforados convencionalmente; por ello a continuación se presenta una breve descripción de dichas particularidades.

1.1.1 REOLOGÍA

Recientes avances en la tecnología Slim Hole incluyen el desarrollo de fluidos de perforación con características especiales debido al importante efecto del espacio anular reducido sobre las pérdidas de presión. Mientras en pozos convencionales un 90% de las pérdidas de presión ocurren entre la tubería de perforación y las boquillas de la broca, en los pozos tipo Slim Hole hasta el 90% de las pérdidas de presión se producen en el anular, esto implica que la densidad del fluido de perforación, material pesante (sólidos) que se utiliza, la viscosidad y las tasas de flujo deban ser consideradas cuidadosamente cuando se perforan este tipo de pozos³.

³ Pedersen J.N., 1959. Relating Slim-Hole Drilling Performance to South Louisiana Drilling Problems. SPE 1247-G.

En general fluidos con bajo contenido de sólidos son utilizados para evitar el recubrimiento del interior de la sarta, y los fluidos deben tener una baja viscosidad para evitar una densidad equivalente de circulación (ECD por sus siglas en inglés) excesivamente alta. Varios tipos de fluidos sintéticos se han desarrollado en la industria pero lamentablemente las mejoras no compensan el precio de los mismos, ya que aumentan significativamente el costo de la operación lo que está en total desacuerdo con el objetivo de los pozos Slim Hole. Por ello se hace preferible la utilización de fluidos base agua teniendo como principales beneficios⁴:

- La economía que representa utilizar fluidos base agua.
- La fácil detección de una patada de pozo debido a la inmiscibilidad que presenta el agua y los hidrocarburos.
- Consideraciones ambientales como disposición de fluidos.

1.1.2 HIDRÁULICA

Controlar la hidráulica del pozo ha sido siempre un inconveniente para la aceptación de la perforación Slim Hole. Muy temprano durante el desarrollo de la práctica los efectos sobre la hidráulica se hicieron notorios tanto en observaciones de campo como en estudios de laboratorio.

⁴ Delwiche R.A. & Stratabit D.B., 1992 Slimhole Drilling Hydraulics. SPE 24596.

Las principales diferencias son determinadas por tres características especiales:

- *El mínimo espacio anular*, factor que afecta las velocidades de flujo y por lo tanto el régimen de flujo.
- *La rotación*, esta característica está presente siempre pero en este caso es de gran impacto debido a que influencia la trayectoria neta del fluido.
- *Excentricidad*, al igual que la rotación siempre está presente, solo que al disminuir el espacio anular se vuelven importantes sus efectos.

En la Tabla 1 se muestra los valores de pérdidas de presión en el anular para un caso de la literatura donde estas son de un 40% de la presión total, lo que demuestra la diferencia con un pozo convencional, donde rara vez las pérdidas exceden el 15%⁵.

⁵ Bai Y. Gao Z., Su Y., Wang H. & Zhang F., 2000 Experimental Study of Slimhole Annular Pressure Loss and Its Field Applications SPE/IADC 59265.

Tabla 1 Razón de las pérdidas de presión en el anular y tubería

Razón de pérdidas de presión en el anular y tubería para pozo de 6'' de hueco y 3,5'' de tubería					
Profundidad de pozo (FT)	Caudal (GPM)	Velocidad de rotación (RPM)	ΔP_{tub} (PSI)	ΔP_{anular} (PSI)	$\Delta P_{anular}/\Delta P_{tub}$ (%)
993	16,8	170	62,3	15,8	15,36
		240	62,3	21,33	34,24
1350	16,8	170	76,93	19,71	25,62
		240	76,93	27,59	35,87
1724	16,8	170	92,26	25,15	27,26
		240	92,26	36,47	39,53

Fuente: Bai Y., Gao Z., Su Y., Wang H. & Zhang F., 2000 Experimental Study of Slimhole

Annular Pressure Loss and Its Field Applications SPE/IADC 59265

1.1.2.1 EFECTOS DEL ESPACIO ANULAR REDUCIDO

Como lo señala su nombre (Slim Hole) este tipo de pozos poseen espacios anulares muy cerrados, condición que dificulta el flujo del lodo de perforación por el mismo, generando así problemas de limpieza de hueco, pega de tubería, dificultad para mantener el régimen laminar en el hueco, derrumbe en el hueco en flujo turbulento, entre otros efectos negativos.

1.1.2.2 EFECTOS DE LA ROTACIÓN

Debido a que la rotación genera un incremento en la distancia neta recorrida por el lodo, parece lógico que también cause un aumento neto de las pérdidas por fricción. En un intento por determinar cuantitativamente su influencia se definen los siguientes parámetros de flujo:

- *Número de Reynolds* (R_e) : el cual se encarga de cuantificar el efecto de la velocidad axial sobre el régimen de flujo.

$$R_e = \frac{77.42 v_s d_h}{\nu} \quad (1)$$

- *Número de Taylor* (T_a) : pretende medir el efecto generado por la velocidad tangencial a la tubería en el régimen de flujo.

$$T_a = \frac{0.0462 \Omega^2 R^4}{\nu^2} \quad (2)$$

Dónde:

d_h Diámetro del hueco o revestimiento, [in]

ν Viscosidad cinemática, [Stokes]

Ω Velocidad angular [rpm]

v_s Velocidad del fluido [ft/s]

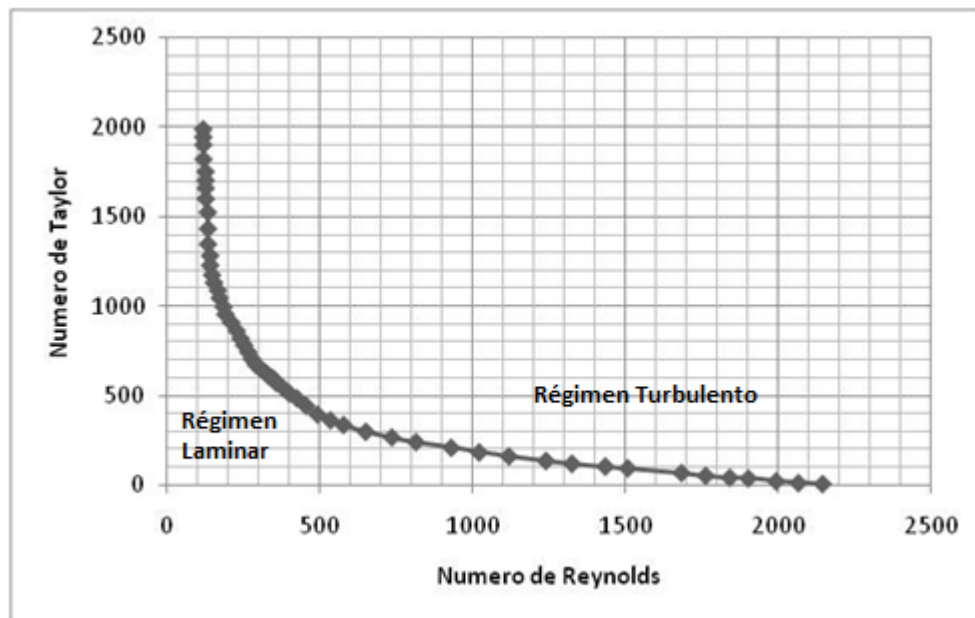
R Radio del eje de rotación a la partícula [in]

La Figura 1 representa una relación para la determinación del régimen de flujo, para altos valores de Reynolds y bajos valores de Taylor el flujo es laminar y para bajos valores de

ambos números adimensionales también es laminar, mientras que para altos valores en ambos números el flujo es netamente turbulento.

Desafortunadamente no existe un modelo estándar que combine efectos no-newtonianos, de rotación y turbulencia. Algunos autores en un intento por suplir este requerimiento han generado modelos que plantean cumplir con estas condiciones, desafortunadamente son modelos con un alto grado de complejidad numérica⁶.

Figura 1 Determinación del régimen de flujo en anulares Slim Hole



Fuente: Bai Y. Gao Z., Su Y., Wang H. & Zhang F., 2000 Experimental Study of Slimhole Annular Pressure Loss and Its Field Applications SPE/IADC 59

⁶ Bai Y. Gao Z., Su Y., Wang H. & Zhang F., 2000 Experimental Study of Slimhole Annular Pressure Loss and Its Field Applications SPE/IADC 59265.

1.1.2.3 EFECTOS DE LA EXCENRICIDAD

La excentricidad se define como el grado de desviación entre el eje de rotación y el eje de simetría (figura 2). Este factor es de gran impacto en geometrías Slim Hole ya que es responsable en algunos casos de una alteración de hasta un 40% de las pérdidas de presión calculadas, hecho que podría provocar en algunos casos un control inadecuado del pozo.

Para tener en cuenta este parámetro sobre las pérdidas de presión se desarrolló un modelo empírico que permite la cuantificación del mismo. El modelo se basa en la relación de las pérdidas de presión con excentricidad a las pérdidas de presión sin excentricidad en función del régimen de flujo y es expresada como sigue⁷:

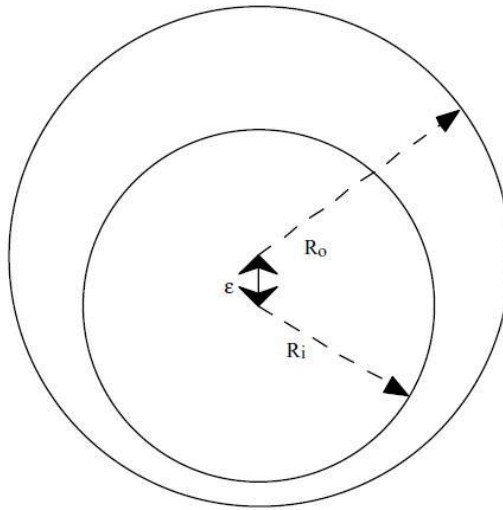
$$R_{lam} = 1 - 0,072 \frac{e}{n} \left(\frac{d_p}{d_h} \right)^{0,8454} - \frac{3}{2} e^2 \sqrt{n} \left(\frac{d_p}{d_h} \right)^{0,1852} + 0,96 e^3 \sqrt{n} \left(\frac{d_p}{d_h} \right)^{0,2527} \quad (3)$$

$$R_{turb} = 1 - 0,048 \frac{e}{n} \left(\frac{d_p}{d_h} \right)^{0,8454} - \frac{2}{3} e^2 \sqrt{n} \left(\frac{d_p}{d_h} \right)^{0,1852} + 0,285 e^3 \sqrt{n} \left(\frac{d_p}{d_h} \right)^{0,2527} \quad (4)$$

$$e = \frac{\varepsilon}{R_o - R_i} \quad (5)$$

⁷ API RP 13D, Rheology and Hydraulics of oil-well drilling fluids, 2009.

Figura 2 Excentricidad



Fuente: Aas B., Hansen S., Merlo A., Rommetveit R. & Sterri N., 1999. A New Hydraulics Model for Slimhole Drilling Applications SPE/IADC 57579

Dónde:

d_h Diámetro del hueco o revestimiento, [in]

d_p Diámetro de la tubería, [in]

e Excentricidad, [adimensional]

n Índice de flujo, [adimensional]

R_i Radio de la tubería de perforación, [in]

R_{lam} Relación de pérdidas de presión con/sin excentricidad en régimen laminar, [adimensional]

R_o Radio del hueco o revestimiento, [in]

R_{turb} Relación de pérdidas de presión con/sin excentricidad en régimen turbulento, [adimensional]

1.1.3 CORAZONAMIENTO EN POZOS TIPO SLIM HOLE

En el corazonamiento de pozos tipo Slim Hole los parámetros especiales de estos (excentricidad, espacio anular reducido y las altas velocidades de rotación de la sarta) influyen de manera significativa estas operaciones, siendo necesario un ajuste de los parámetros que están involucrados en dichos procedimientos.

Las herramientas utilizadas y el fluido de perforación son unos de los parámetros que necesitan ser adaptados a esta tecnología no convencional. Los diámetros y las configuraciones de la broca y el core barrel deben ser modificados sin afectar el éxito de la operación⁸.

1.1.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Las diferencias en el tamaño del anular y la velocidad de rotación de la tubería entre el corazonamiento en configuraciones Slim Hole y perforación convencional sugieren que el fluido de perforación usado necesite propiedades diferentes. Las propiedades del lodo deseadas en este tipo de perforación son las siguientes⁹:

⁸ Baker Hugues INTEQ Coring Handbook, 1999.

⁹ Beihoffer T.W., Dorrough D.S. & Schmidt D.D., 1990. The Development of an Inhibited Cationic Drilling Fluid for Slim Hole Coring Applications. SPE/IADC 19953.

- *Bajo contenido de sólidos:* Debido a la tendencia que tienen los sólidos a centrifugarse o seguir un movimiento helicoidal, el fluido de corazonamiento debe ser esencialmente libre de sólidos. Este requerimiento también inhibe el uso normal de materiales pesantes insolubles (Barita y hematita) para incrementar la densidad.
- *Baja viscosidad:* Debido al espacio reducido en el anular y la alta velocidad en el anular, altas viscosidades en el fluido de perforación no son necesarias para la limpieza del hueco. El uso de altas viscosidades puede resultar en una densidad equivalente de circulación excesivamente alta.
- *Inhibición:* Los pozos con pequeños diámetros hidráulicos actúan como soporte para estabilizar la tubería mientras es rotada a altas velocidades. Si el hueco es agrandado, esta estabilización se pierde y la sarta puede entrar en resonancia y colapsar. Estas fallas de agrandamiento provenientes de la desintegración de shales pueden ser evitadas haciendo el fluido de perforación lo más inhibido posible.
- *Control de pérdidas de fluido:* El lodo de perforación debe tener bajas pérdidas de filtrado evitando la acumulación de una torta (cake) gruesa en el anular. Altas pérdidas por filtrado podrían conllevar a una pega diferencial.

- *Compatible con la evaluación del núcleo:* El fluido de perforación no debe interferir con el análisis de núcleos. Los fluidos base aceite no son automáticamente descartados pero los fluidos base agua son los preferidos generalmente.

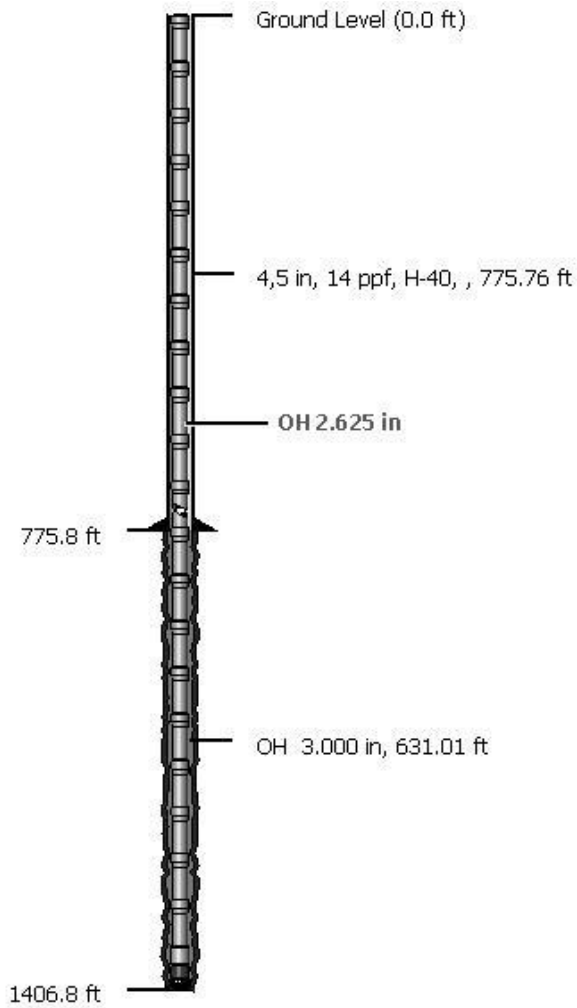
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Los resultados en este trabajo se obtuvieron a partir de las corridas de simulación hechas con el software COMPASS-WELLPLAN. Estas fueron realizadas sobre los respectivos datos de campo de los pozos ANH-CAUCA 32-ST-S, ANH-PATÍA 3-ST-S y ANH-PATÍA 29-ST-S, con el objetivo de comprobar la utilidad de los modelos reológicos e hidráulicos manejados por la herramienta para futuros proyectos Slim Hole.

El análisis consta de la evaluación de diferentes esquemas de simulación para examinar desde el punto de vista reológico e hidráulico los problemas presentados, y realizar una comparación con los parámetros más influyentes en este tipo de pozos para la mejor planeación de nuevos proyectos.

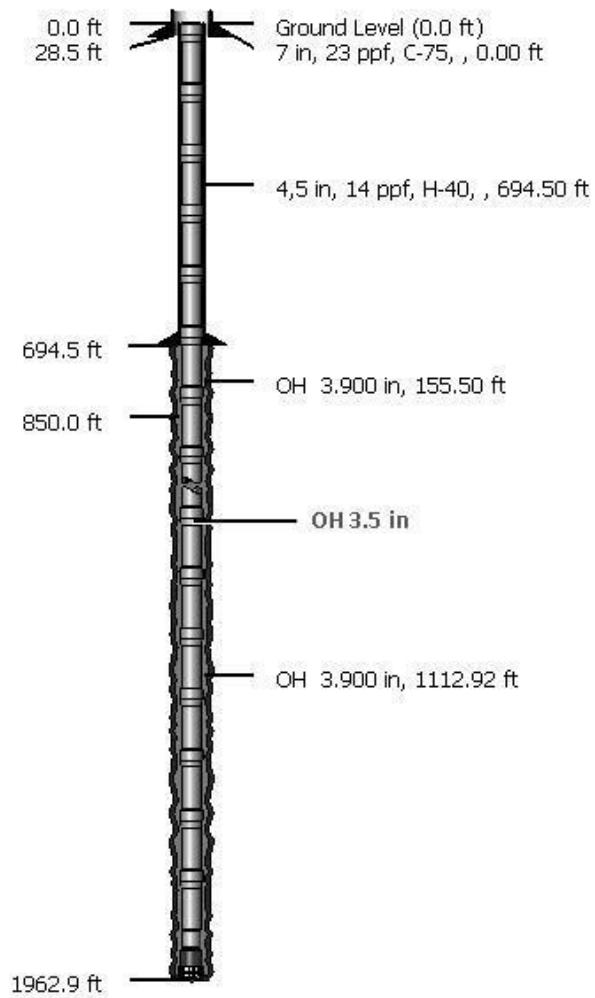
El procedimiento a seguir en el desarrollo del presente documento fue inicialmente hacer un compendio de la información de campo, para determinar el estado mecánico del pozo, las características reológicas del lodo y los parámetros operacionales influyentes en los cálculos. La figuras 3, 4 y 5 muestran el estado mecánico de los pozos ANH-CAUCA 32-ST-S, ANH-PATÍA 3-ST-S y ANH-PATÍA 29-ST-S respectivamente.

Figura 3 Estado mecánico del pozo ANH-CAUCA 32-ST-S



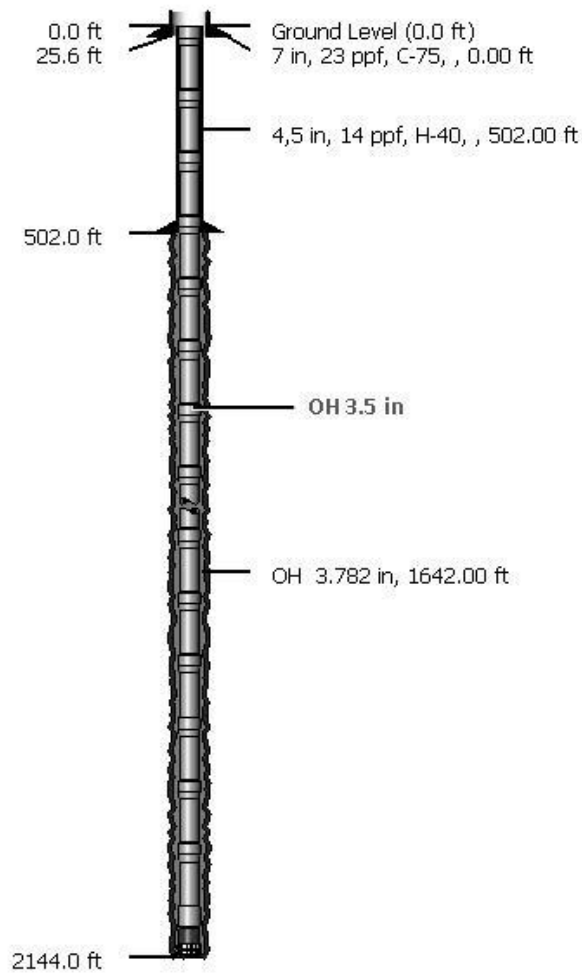
Fuente: Autores, imagen tomada del software COMPASS-WELLPLAN

Figura 4 Estado mecánico del pozo ANH-PATÍA 3-ST-S



Fuente: Autores, imagen tomada del software COMPASS-WELLPLAN

Figura 5 Estado mecánico del pozo ANH- PATÍA 29-ST-S



Fuente: Autores, imagen tomada del software COMPASS-WELLPLAN

La recopilación de la información se obtuvo con los reportes de perforación, seleccionando las especificaciones de las tuberías y revestimientos, igualmente las características técnicas de las brocas y parámetros reológicos en los intervalos más relevantes. Estos se eligieron teniendo como premisa las profundidades máximas para un determinado diámetro de broca al mismo tiempo que las profundidades de asentamiento de los revestimientos. Para la

determinación de los parámetros operacionales (tabla 2) y reológicos (tabla 3) sobre los intervalos se tomó el promedio ponderado sobre la longitud perforada y no sobre el tiempo de operación.

Tabla 2 Parámetros operacionales pozos ANH-CAUCA 32-ST-S, ANH-PATÍA 3-ST-S, y ANH-PATÍA 29-ST-S

	Pozo ANH-CAUCA 32-ST-S 1406,8 ft (TVD)	Pozo ANH-PATÍA 3-ST-S 1962,9 ft (TVD)	Pozo ANH-PATÍA 29-ST-S 2144 ft (TVD)
Caudal (GPM)	36	31	39
RPM	800	337	330
ROP (ft/hr)	8,1	5,1	8,6
Torque (lbf-ft)	2582	1853	2039
Peso sobre la broca (lbs)	500	2553	3246

Fuente: Bitácora de perforación pozos estratigráficos perforados por la UIS para la ANH en la cuenca CAUCA-PATIA.

Tabla 3 Parámetros reológicos ANH-CAUCA 32-ST-S, ANH-PATÍA 3-ST-S y ANH-PATÍA 29-ST-S

	Pozo ANH-CAUCA 32-ST-S 1406,8 ft (TVD)	Pozo ANH-PATÍA 3-ST-S 1962,9 ft (TVD)	Pozo ANH-PATÍA 29-ST-S 2144 ft (TVD)
Densidad (lpg)	8,6	9,0	8,7
Θ_{600}	7	56	44
Θ_{300}	5	37	32
Θ_{100}	3	25	24
Viscosidad plástica (cp)	3	18	12
Punto cedente (lbf/100 ft²)	2	19	20

Fuente: Bitácora de perforación pozos estratigráficos perforados por la UIS para la ANH en la cuenca CAUCA-PATIA.

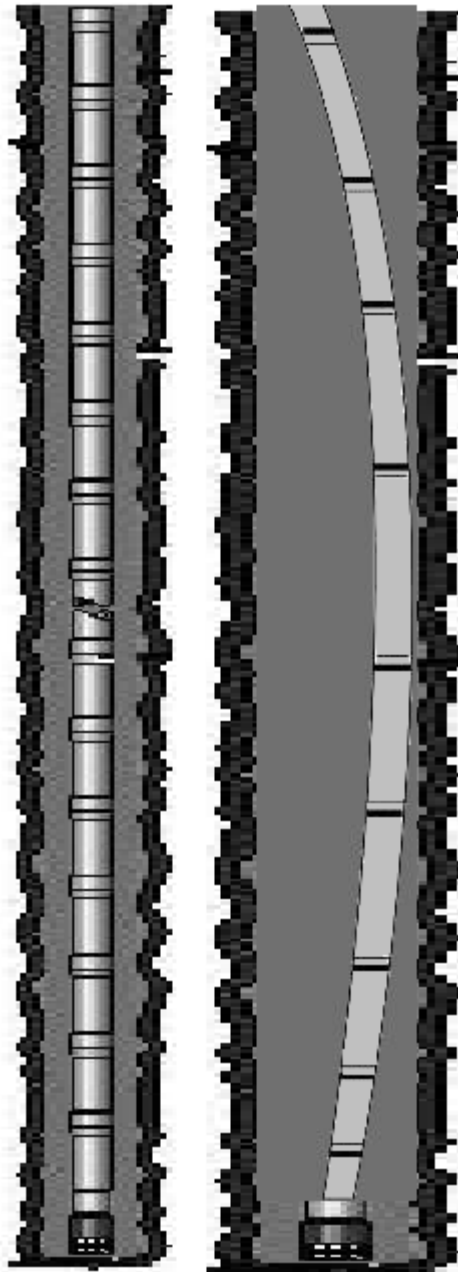
Luego de tener la información requerida por el software, se realizaron diferentes corridas de simulación bajo los siguientes esquemas:

- *Estado mecánico ideal del pozo:* el diámetro del pozo que corresponde al diámetro de la broca.

- *Excentricidad*: para aplicar este parámetro el criterio utilizado fue asumir un valor máximo de excentricidad en el punto medio de la profundidad total verdadera como lo muestra la figura 6¹⁰.
- *Estado mecánico real del pozo*: determinado a partir de los registros de los pozos ANH-CAUCA 32-ST-S, ANH-PATÍA 3-ST-S y ANH-PATÍA 29-ST-S, en los cuales se calculó un diámetro promedio para corregir las secciones erosionadas, la figura 7 muestra el registro Caliper de los pozos ANH-PATÍA 3-ST-S y ANH-PATÍA 29-ST-S para un intervalo representativo del estado mecánico real y la figura 8 el registro Caliper del pozo ANH-CAUCA 32-ST-S y un bosquejo del criterio aplicado para la geometría real.

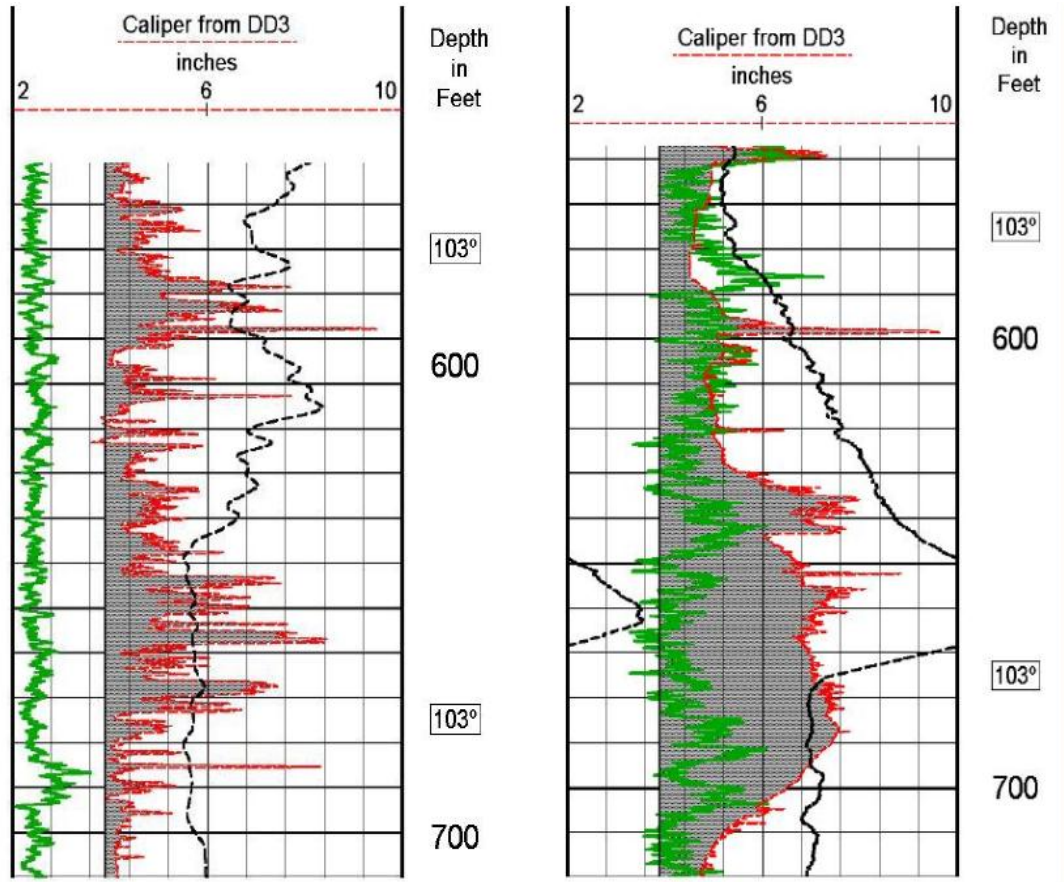
¹⁰ Cartalos U., Dupuis D., King I. & Sagot A., 1996. Field Validated Hydraulic Model Predictions Give Guidelines for Optimal Annular Flow in Slimhole Drilling. IADC/SPE 35131.

Figura 6 Esquema tubería concéntrica (izquierda) y excéntrica (derecha)



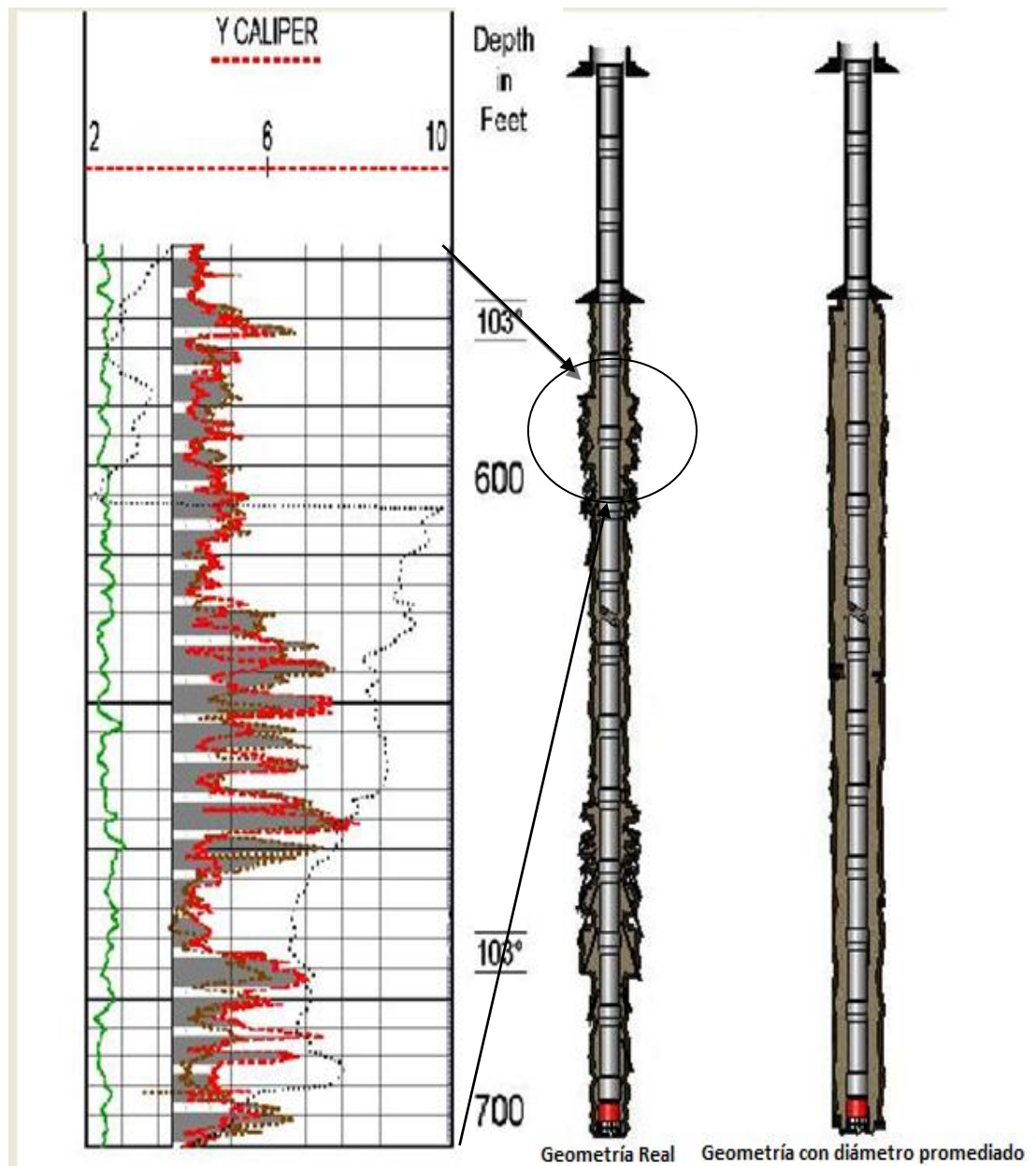
Fuente: Autores

Figura 7 Registro Caliper pozos ANH-PATÍA 3-ST-S (izquierda) y ANH-PATÍA 29-ST-S (derecha)



Fuente: Registros tomados de pozos estratigráficos perforados por la UIS para la ANH en la cuenca CAUCA-PATIA

Figura 8 Esquema del criterio aplicado en los pozos para representar la geometría real



Fuente: Registro Caliper pozo ANH-CAUCA 32-ST-S y COMPASS-WELLPLAN

3. RESULTADOS

Para los cálculos de hidráulica y optimización es indispensable la selección del modelo reológico adecuado, en este trabajo se escogió el modelo de Herschel-Bulkley, porque es este el que mejor se ajusta al comportamiento real del lodo de acuerdo a la mayoría de resultados presentados en la literatura¹¹. Asimismo, para los cálculos de pérdidas de presión con excentricidad el único modelo permitido por el software es este.

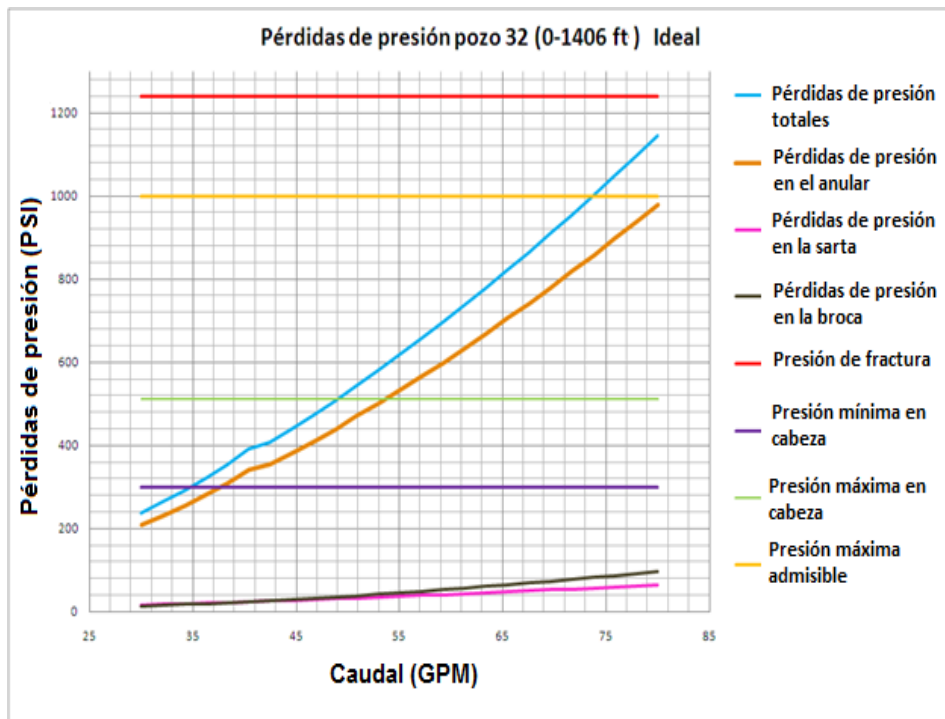
La figura 9 muestra los resultados de las pérdidas de presión para la primera corrida de simulación correspondiente al estado mecánico ideal del pozo ANH-PATÍA 29-ST-S, en esta se observa que los valores numéricos arrojados por el software son muy altos en comparación a los obtenidos en campo; es decir, superior a la máxima presión en cabeza (entendiéndose como la mayor presión de bombeo registrada en cabeza de pozo durante la perforación del intervalo). Las figuras 10 y 11 presentan los resultados para el mismo esquema de simulación en los pozos ANH-PATÍA 3-ST-S y ANH-CAUCA 32-ST-S. A partir de las cuales se observa un comportamiento similar para el pozo 3, pero un comportamiento muy diferente para el pozo 32, para el cual las pérdidas de presión calculadas son muy cercanas a las reales; es decir se encontraba entre la máxima presión en

¹¹ Ferreira C. & Serrano M., 2004 Hidráulica Avanzada de Perforación. Seflu Cempo, Isla de Margarita, Venezuela.

cabeza y la mínima presión en cabeza teniendo en cuenta que el caudal de operación era menor que 40 GPM para todos los pozos.

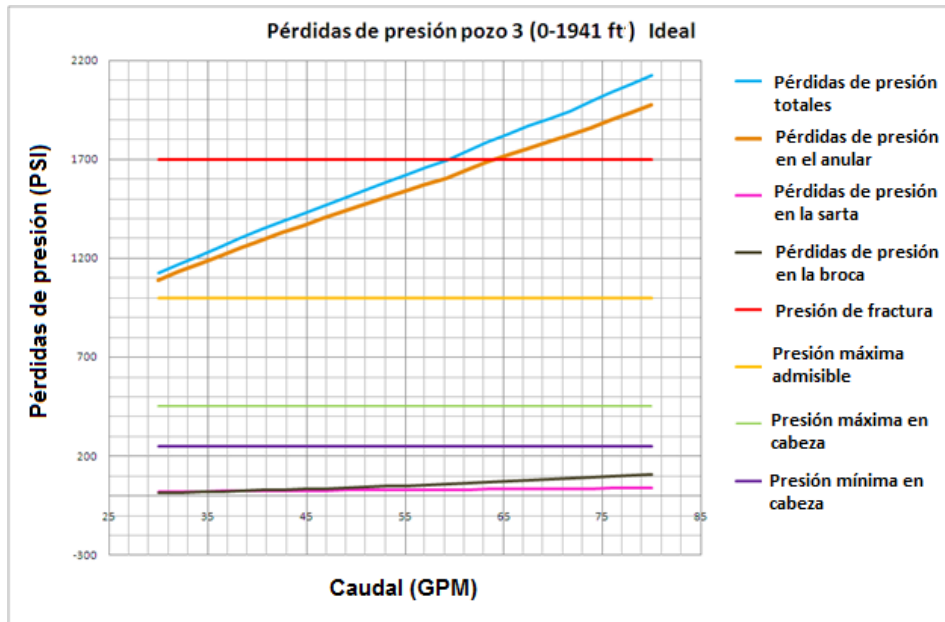
NOTA: Se aclara que la máxima presión permisible es la presión que podrían suministrar las bombas de lodo medida en cabeza, asimismo la máxima y mínima presión en cabeza la mayor y menor presión respectivas de bombeo registrada durante la perforación del intervalo.

Figura 9 Pérdidas de presión para geometría ideal del pozo ANH-CAUCA 32-ST-S



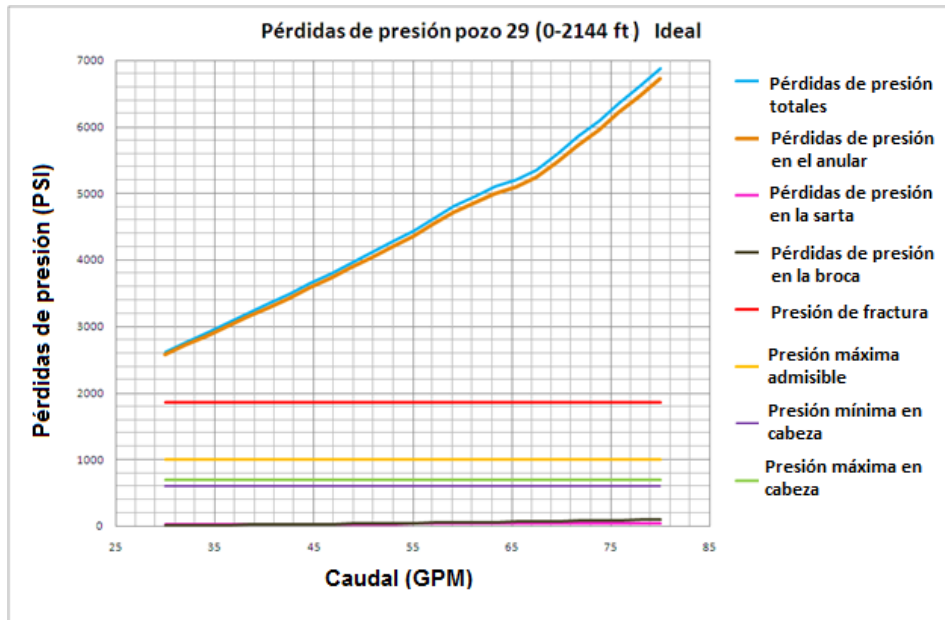
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 10 Pérdidas de presión para geometría ideal del pozo ANH-PATÍA 3-ST-S



Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 11 Pérdidas de presión para geometría ideal del pozo ANH-PATÍA 29-ST-S

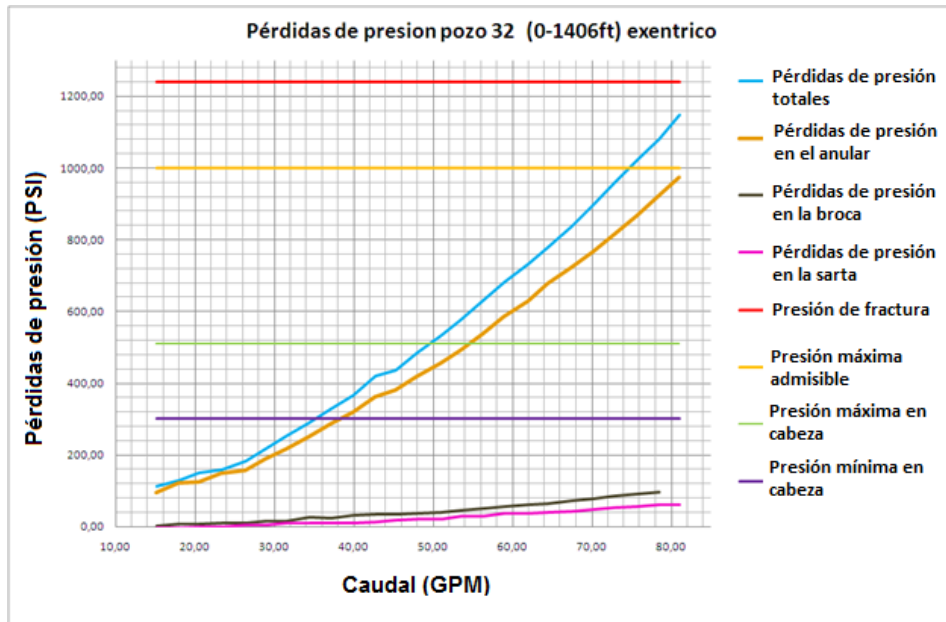


Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Siguiendo con la metodología planteada se realizó la corrida adicionando el factor excentricidad al caso base mencionado en el párrafo anterior, los resultados se muestran en las figuras 12, 13 y 14. Se observa un descenso en los valores de pérdidas de presión, lo cual concuerda con la literatura, aunque este no es tan significativo como mencionan algunos autores¹².

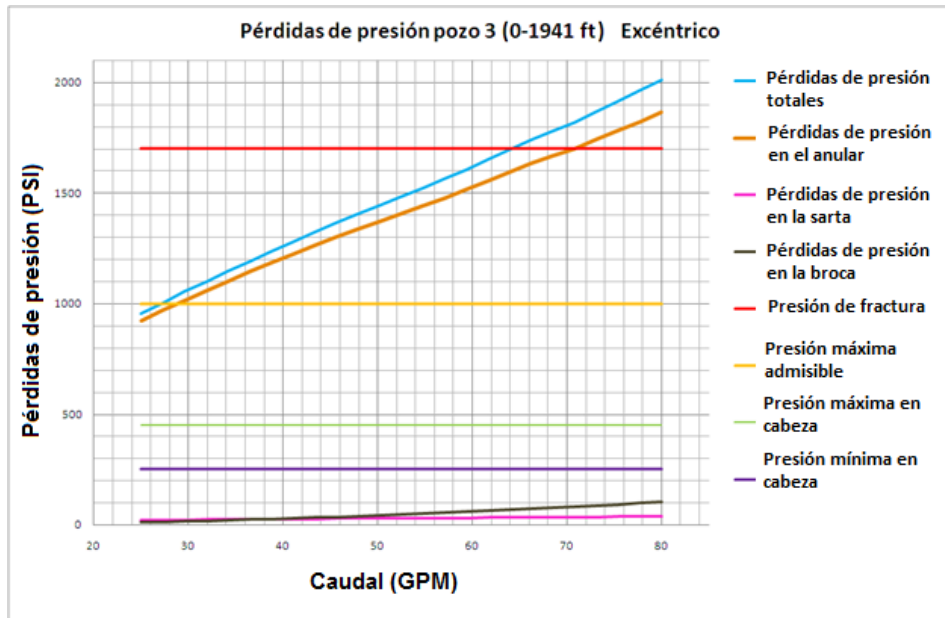
¹² Cartalos U., Dupuis D., King I. & Sagot A., 1996. Field Validated Hydraulic Model Predictions Give Guidelines for Optimal Annular Flow in Slimhole Drilling. IADC/SPE 35131.

Figura 12 Pérdidas de presión para anular excéntrico ANH-CAUCA 32-ST-S



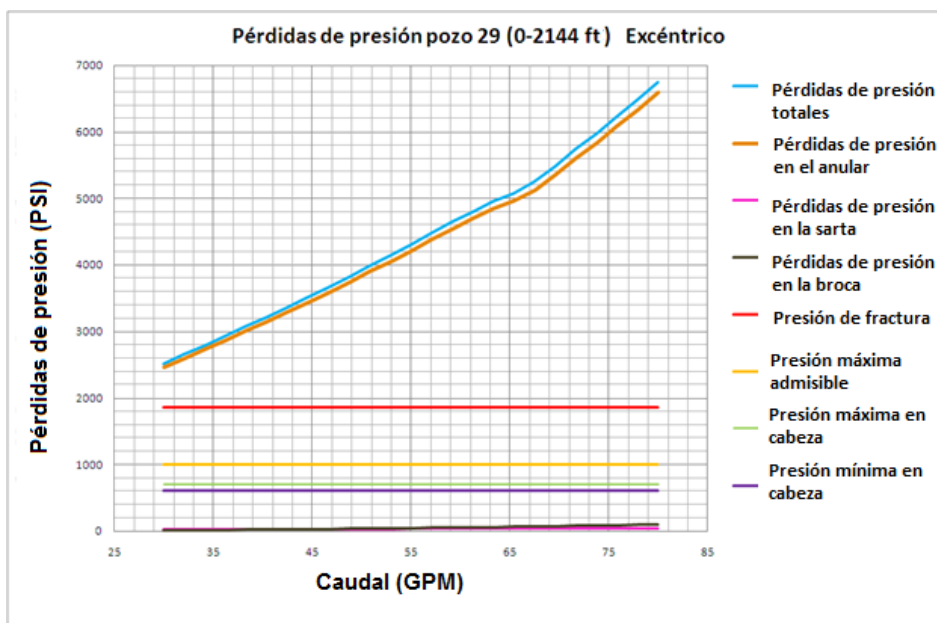
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 13 Pérdidas de presión para anular excéntrico ANH-PATÍA 3-ST-S



Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 14 Pérdidas de presión para anular excéntrico ANH-PATÍA 29-ST-S



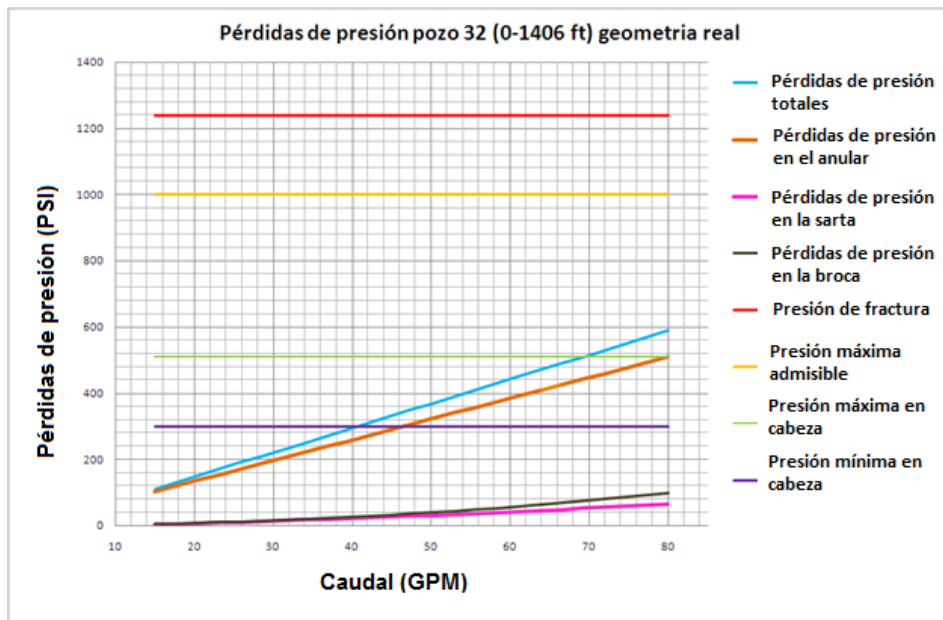
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Dado que los resultados obtenidos para las pérdidas de presión incluyendo el factor de excentricidad continuaban siendo muy altos, se decidió revisar la geometría real de los pozos a través del registro calípter, puesto que este parámetro tiene gran influencia sobre los cálculos¹³. Para caracterizar la geometría se determinó numéricamente un diámetro promedio empleando el teorema del valor medio para integrales, el cual permitió calcular un estimado de volumen de exceso del lodo en el anular representando así la influencia de la geometría sobre los resultados de las pérdidas de presión en el software.

¹³ Cartalos U. & Haciislamoglu M., 1994. Practical Pressure Loss Predictions in Realistic Annular Geometries. SPE 28304.

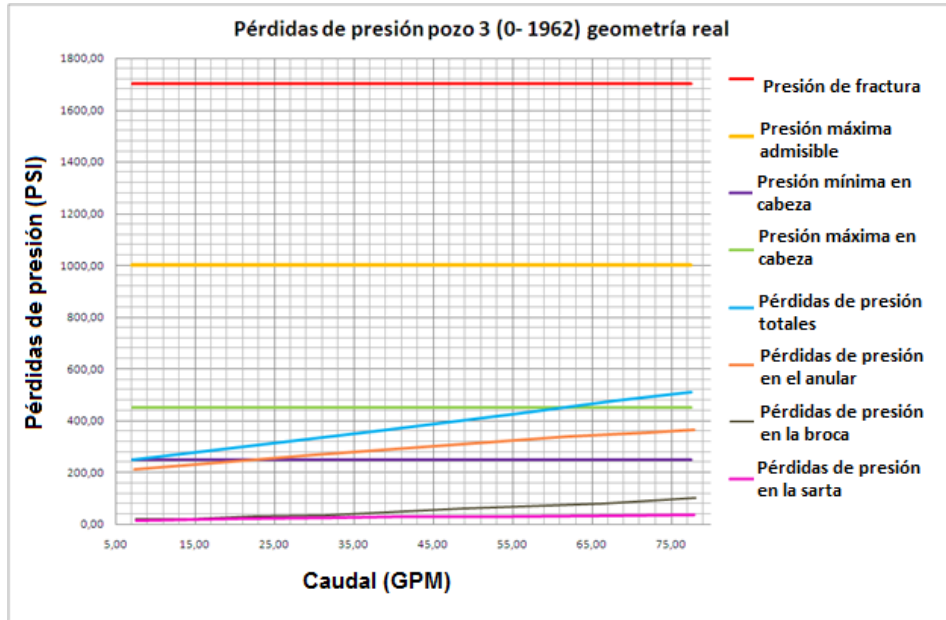
El efecto de la inclusión del factor geométrico se hace notorio sobre la hidráulica como se puede ver en las figuras 15, 16 y 17, donde se observa una fuerte disminución en las pérdidas de presión, principalmente en la zona del anular.

Figura 15 Pérdidas de presión para geometría real ANH-CAUCA 32-ST-S



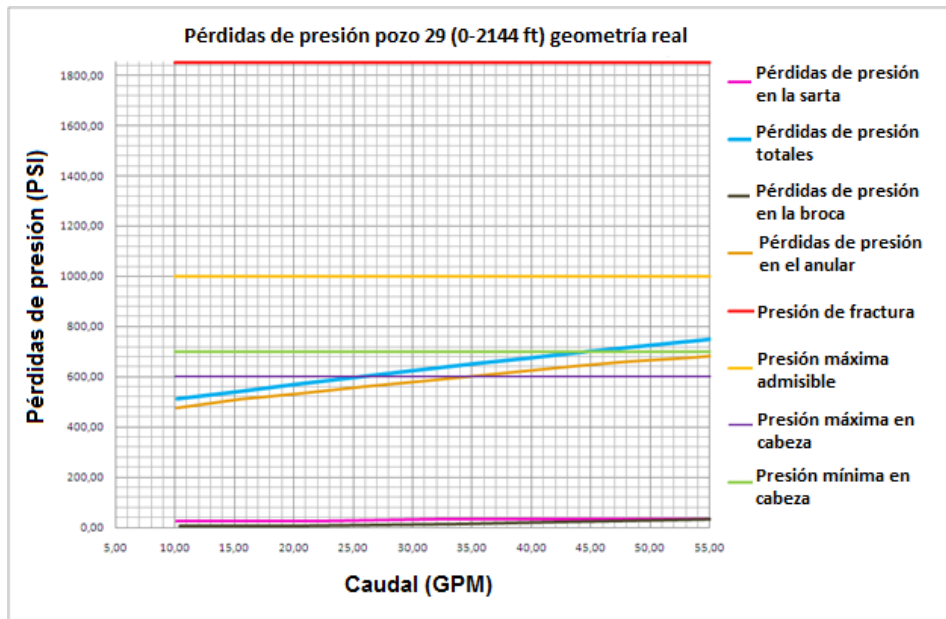
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 16 Pérdidas de presión para geometría real ANH-PATÍA 3-ST-S



Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

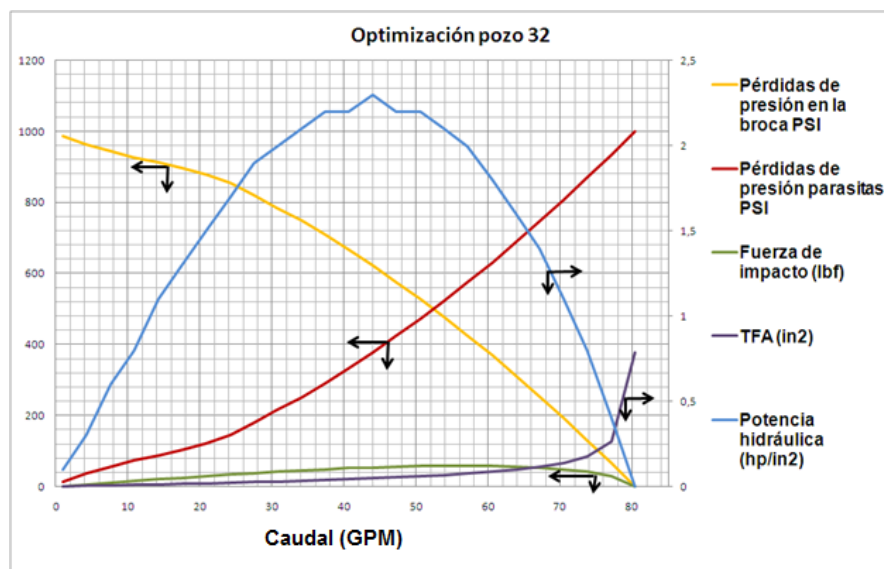
Figura 17 Pérdidas de presión para geometría real ANH-PATÍA 29-ST-S



Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

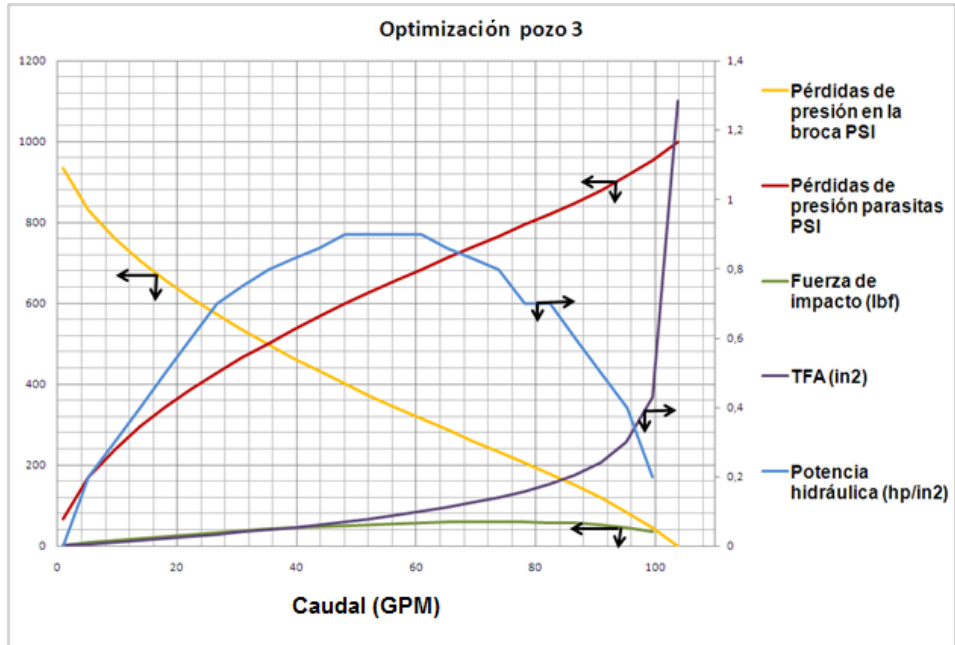
Debido a que aproximadamente hasta el 90 % de las pérdidas de presión se encuentran en el anular es necesaria la optimización de la hidráulica, con el objetivo de maximizar recursos y aumentar la tasa de penetración en futuros proyectos. Las figuras 18, 19 y 20 presentan los resultados de la optimización de la hidráulica para cada pozo con los respectivos valores óptimos del área total de flujo (TFA por sus siglas en inglés) y pérdidas de presión. Los nuevos cálculos con los parámetros optimizados se indican en las figuras 21, 22 y 23 para los pozos 32, 3 y 29 respectivamente.

Figura 18 Optimización pozo ANH-CAUCA 32-ST-S



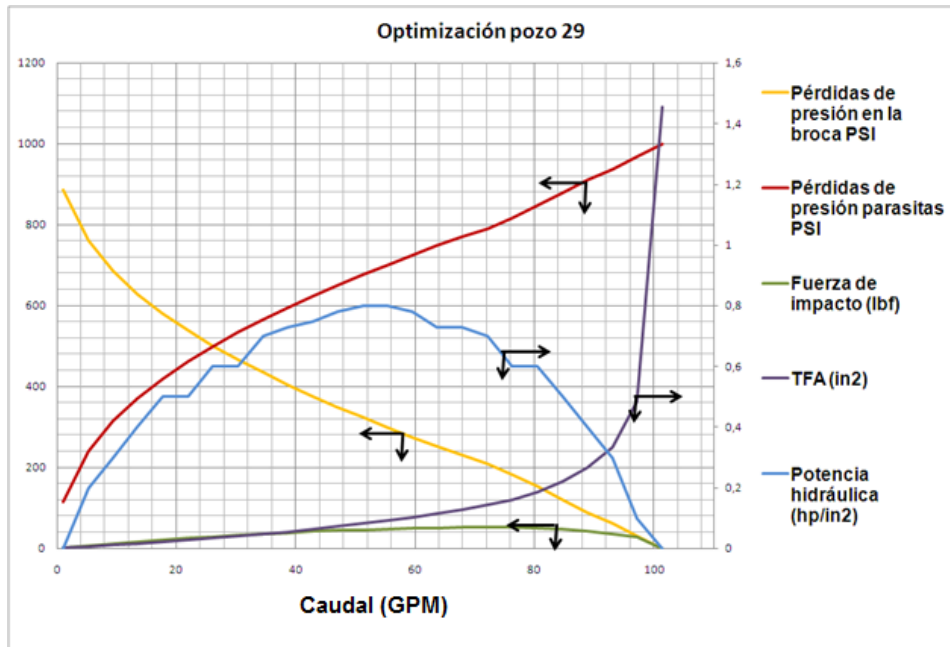
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 19 Optimización pozo ANH-PATÍA 3-ST-S



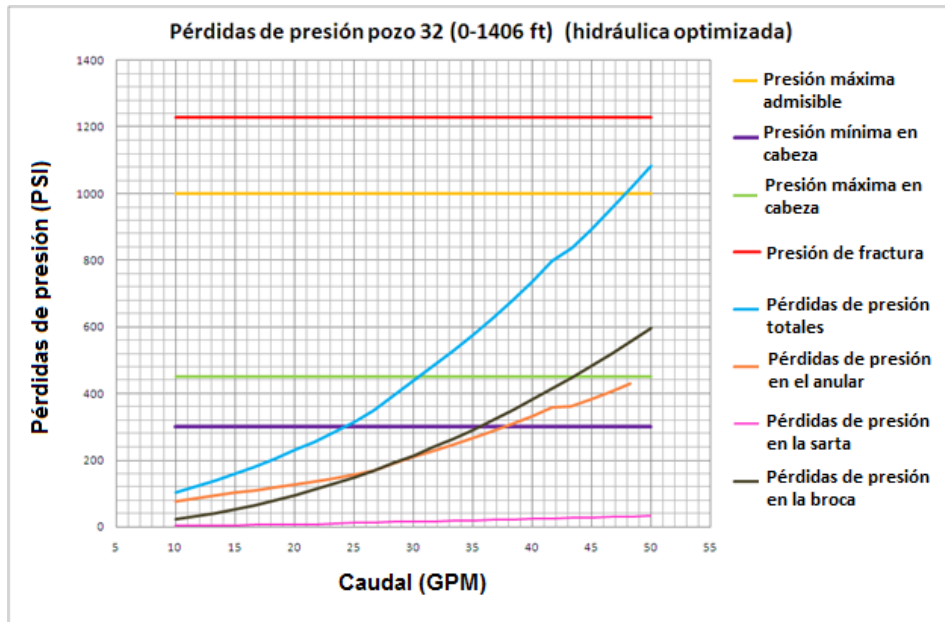
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 20 Optimización pozo ANH-PATÍA 29-ST-S



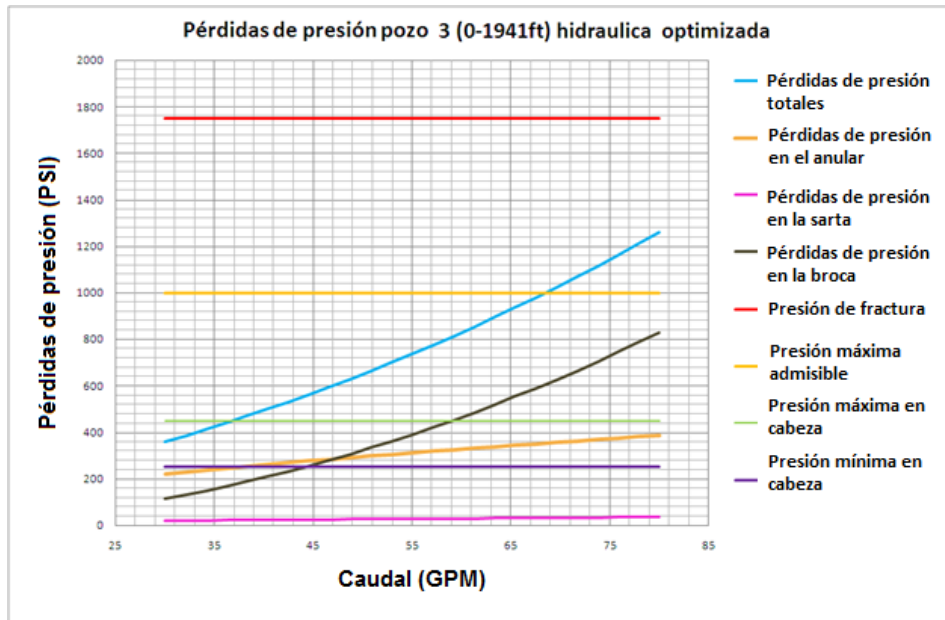
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 21 Pérdidas de presión con hidráulica optimizada pozo ANH-CAUCA 32-ST-S



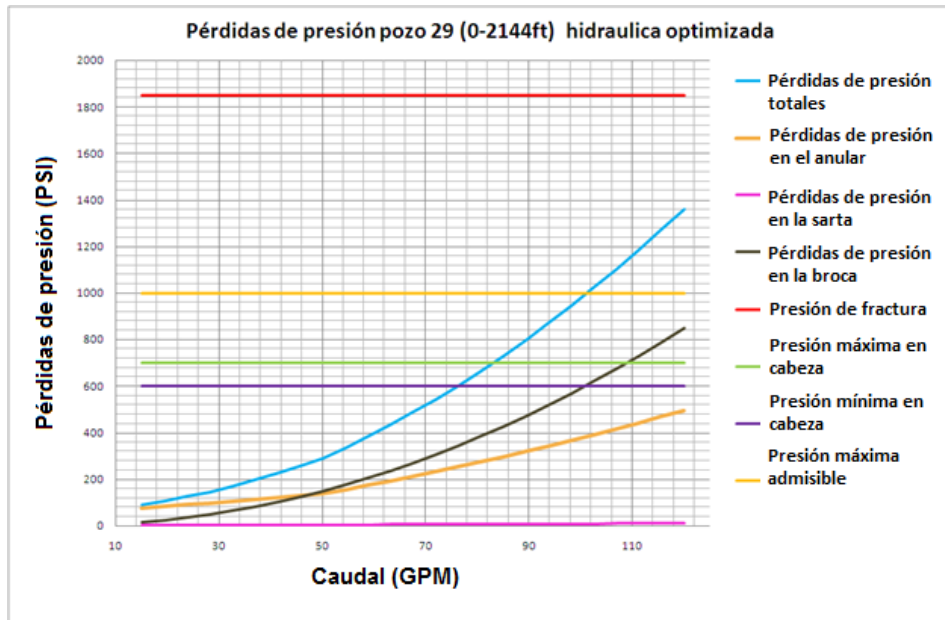
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 22 Pérdidas de presión con hidráulica optimizada pozo ANH-PATÍA 3-ST-S



Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 23 Pérdidas de presión con hidráulica optimizada pozo ANH-PATÍA 29-ST-S



Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

4. ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los informes de perforación de los pozos los problemas operacionales más significativos que se presentaron fueron las pérdidas totales o parciales de circulación del lodo y atascamiento de la herramienta recuperadora del núcleo (core barrel). Para determinar la causa de estos problemas se hizo un análisis desde el punto de vista reológico e hidráulico en cuanto a parámetros operacionales.

Según las corridas de simulación y los datos de campo las propiedades iniciales del lodo utilizado tenían las características para proporcionar una limpieza eficiente del pozo. Sin embargo, los reportes operacionales indicaron un excesivo contenido de arena en el lodo, pudiendo ser esta la razón del atascamiento continuo del core barrel, es decir, el control de sólidos en superficie no fue lo suficientemente eficiente para garantizar un mantenimiento en las propiedades del lodo que respondan a una limpieza adecuada.

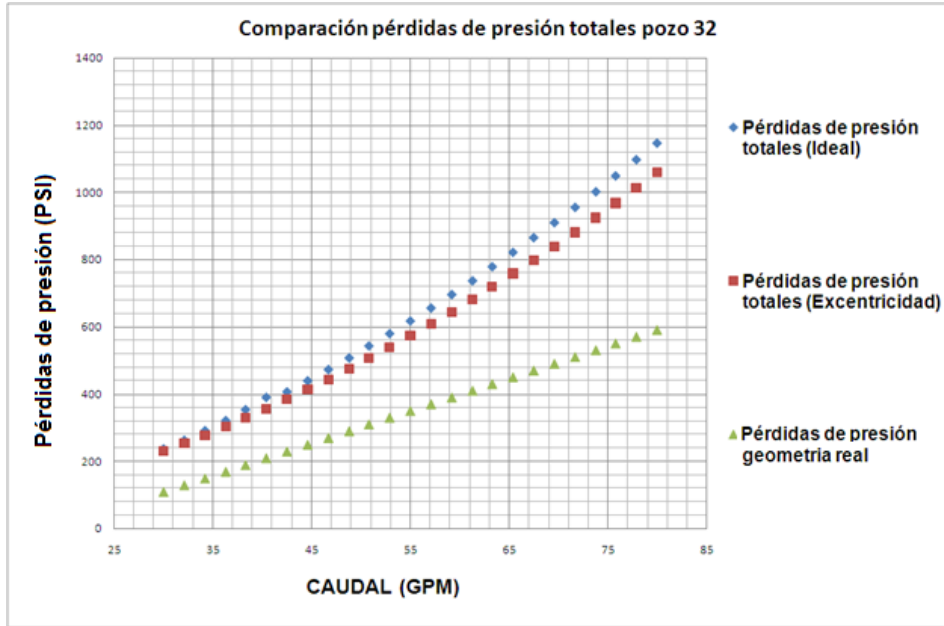
Para establecer las causas de las pérdidas de circulación del lodo se efectuó una revisión de los parámetros operacionales como la presión de bombeo, hidrostática, y presión de fractura. Se evidenció que en ningún momento se induce fractura a la formación, por lo que se hizo una revisión de las características litológicas de las formaciones corazonadas, donde se pudo observar que a las profundidades donde se presentaron pérdidas de circulación corresponden a zonas naturalmente fracturadas.

Los resultados arrojados por el software bajo los tres esquemas de simulación presentados anteriormente revelan una tendencia en las pérdidas de presión en el anular a ser superiores al 80% de las pérdidas de presión totales. Estos valores concuerdan con los trabajos presentados en la literatura por Delwiche R.A. & Stratabit D.B. para relaciones de diámetros tubería/pozo mayores a 85 %.

Haciendo la comparación de los resultados bajo los tres escenarios de simulación planteados en este trabajo, se observó que el factor más influyente en los cálculos de pérdidas de presión es el estado mecánico del pozo, es decir, la verdadera configuración geométrica. Esto se puede observar en las figuras 24, 25 y 26 donde se compara los resultados de las pérdidas de presión totales en las diferentes corridas de simulación, donde a su vez se nota que son estos valores los más cercanos a los datos de campo.

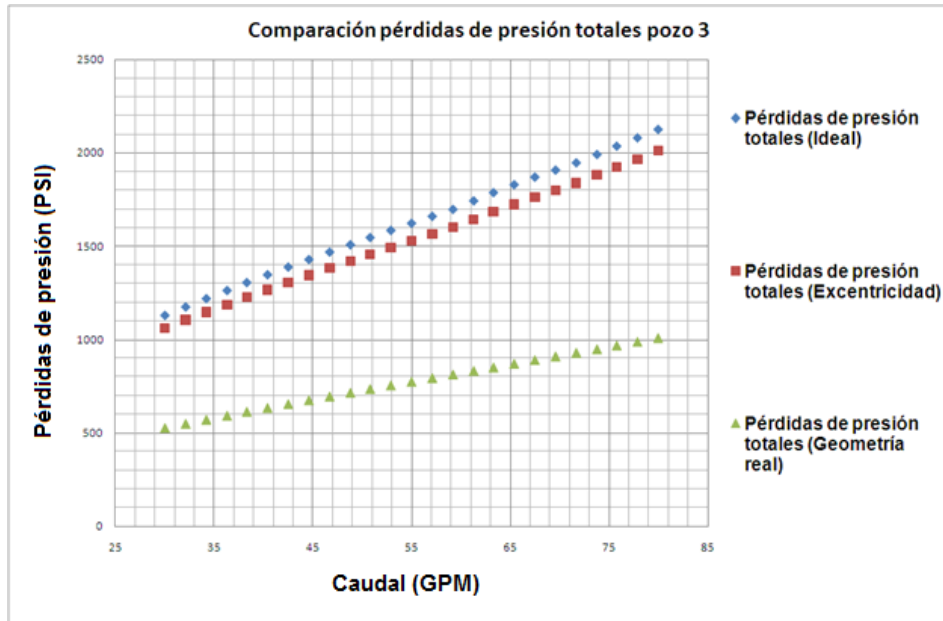
Figura 24 Comparación pérdidas de presión totales esquemas ideal y excéntrico pozo

ANH-CAUCA 32-ST-S



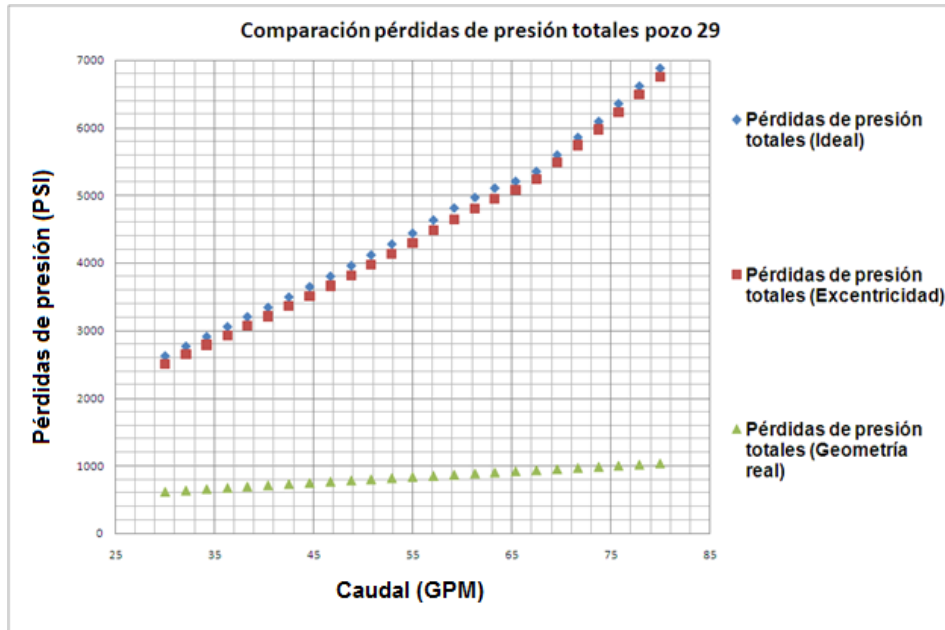
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 25 Comparación pérdidas de presión totales bajo los tres esquemas de simulación pozo ANH-PATÍA 3-ST-S



Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Figura 26 Comparación pérdidas de presión totales bajo los tres esquemas de simulación
pozo ANH-PATÍA 29-ST-S



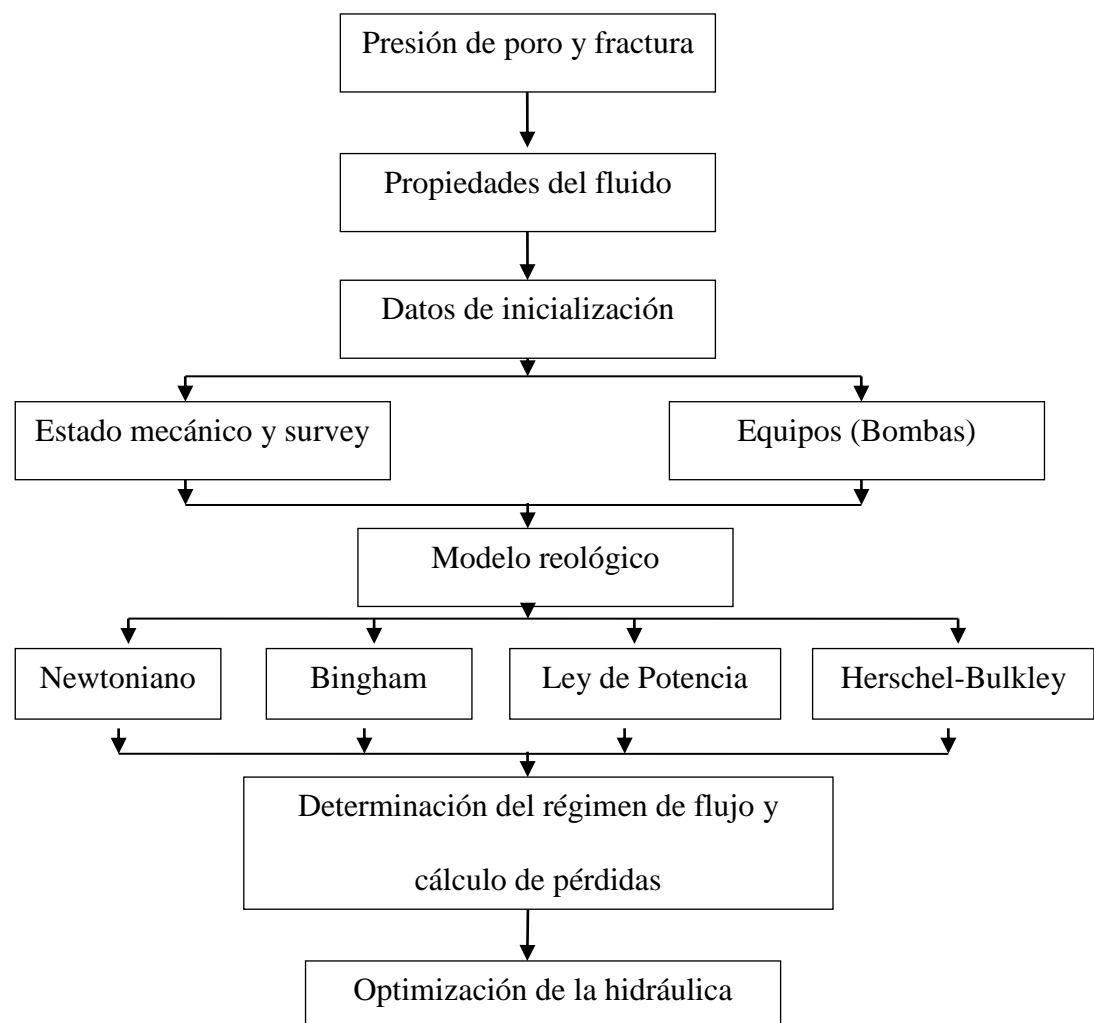
Fuente: Autores, corridas con el software COMPASS-WELLPLAN

Para el pozo ANH-CAUCA 32-ST-S los cálculos de pérdidas de presión son muy aproximados a los presentados en campo, debido a que cerca de un 50 % de la longitud total perforada fue revestida, haciendo que la geometría real del pozo se aproxime a la ideal.

Para la optimización de la hidráulica se observó que las áreas de flujo optimas oscilaban de 0,08 a 0,15 in², lo que corresponde a un número de boquillas entre 1 y 3 para diámetros que van desde 7/32 a 10/32 in. Estas pequeñas áreas de flujo (optimas) corresponden al reducido volumen de lodo utilizado para este tipo de geometrías. Mientras que las utilizadas en campo fueron 6 boquillas de aproximadamente 7/32 in y un área de flujo de 0,225 in².

En la figura 27 se muestra la metodología aplicada en este trabajo para el análisis y cálculos de reología e hidráulica de pozos estratigráficos tipo Slim Hole. Esta tiene como finalidad servir de base para definir de una manera adecuada las propiedades del lodo, disminuir las pérdidas, seleccionar el caudal óptimo entre otros parámetros importantes en la perforación de futuros proyectos Slim Hole.

Figura 27 Diagrama de flujo metodología aplicada



Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

- La geometría del pozo demostró ser el factor más importante en los cálculos de pérdidas de presión, puesto que solo bajo este esquema se alcanzaron valores cercanos a los reportados en campo.
- La influencia de la excentricidad en los cálculos de pérdidas de presión realizados por software no fue tan acentuada, ya que presentaron una reducción máxima del 10% de pérdidas de presión totales, mientras que en la literatura se indica que pueden llegar a ser hasta de un 40%.
- Según las corridas de simulación más del 80 % de las pérdidas de presión se presentan en el espacio anular, por lo cual se debe tener especial cuidado de no exceder la presión de fractura de la formación.
- El mantenimiento de las propiedades del lodo durante las operaciones de corazonamiento en pozos tipo Slim Hole se hace indispensable, debido a la necesidad de propiedades específicas como el bajo contenido de sólidos necesaria para evitar el atascamiento del core barrel.
- Los resultados del software COMPASS-WELLPLAN fueron coherentes gracias a la inclusión del factor geométrico, sin embargo, es necesario un modelo que incluya los efectos de rotación (no manejado por el software) y excentricidad con el modelo de Herschel-Bulkley para que la planeación sea más exacta cuantitativamente.

6. RECOMENDACIONES

- Después de realizar el análisis de las propiedades reológicas del lodo se concluyó que el diseño inicial del lodo no cumplió con las necesidades de este tipo de geometrías y operaciones por la adición de CaCo_3 . Además se recomienda mejorar el sistema de remoción de sólidos en superficie; ya que estos tienen un fuerte impacto en el comportamiento reológico y en las operaciones como la recuperación del core barrel. Como se mencionó anteriormente, un mal sistema de remoción de sólidos pudo haber sido la causa de los múltiples atascamientos durante la recuperación de esta herramienta.
- Como se evidencio en los cálculos de optimización, el área total de flujo en la broca utilizada para la perforación de estos pozos fue muy grande para la tasa de fluido que se manejó, lo cual se constató en las pobres tasas de penetración obtenidas (ROP). Por lo tanto Se recomienda la utilización de boquillas de menor tamaño en la broca ya que estas podrían aumentar la tasa de penetración.
- Según los análisis hidráulicos realizados en este trabajo se recomienda la utilización del sistema de revestimiento utilizado en el pozo ANH-CAUCA 32 ST-S el cual consiste en revestir el pozo a medida que se va avanzando en profundidad; esto se hace con la corrida de un casing de diámetro ligeramente mayor que el del pozo lo que causa que ingrese a presión y además evita la utilización de cemento. La corrida de casing gradualmente elimina el problema de la inestabilidad generada por las altas velocidades de rotación utilizadas, y cualquier otro problema asociado con la erosión del wellbore.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Aas B., Hansen S., Merlo A., Rommetveit R. & Sterri N., 1999. A New Hydraulics Model for Slimhole Drilling Applications SPE/IADC 57579.
2. API RP 13D, Rheology and Hydraulics of oil-well drilling fluids, 2009.
3. Ayeni K.B., Enilari M.G. & Osisanya S.O., 2009 Development and Evaluation of Various Drilling Fluids for Slim-Hole Wells Journal of Canadian Petroleum Technology.
4. Bai Y. Gao Z., Su Y., Wang H. & Zhang F., 2000 Experimental Study of Slimhole Annular Pressure Loss and Its Field Applications SPE/IADC 59265.
5. Baker Hugues INTEQ Coring Handbook, 1999.
6. Beihoffer T.W., Dorrough D.S. & Schmidt D.D., 1990. The Development of an Inhibited Cationic Drilling Fluid for Slim Hole Coring Applications. SPE/IADC 19953.
7. Bitácora de perforación pozos estratigráficos perforados por la UIS para la ANH en la cuenca CAUCA-PATIA.
8. Cartalos U. & Haciislamoglu M., 1994. Practical Pressure Loss Predictions in Realistic Annular Geometries. SPE 28304.
9. Cartalos U., Dupuis D., King I. & Sagot A., 1996. Field Validated Hydraulic Model Predictions Give Guidelines for Optimal Annular Flow in Slimhole Drilling. IADC/SPE 35131.
10. Delwiche R.A. & Stratabit D.B., 1992 Slimhole Drilling Hydraulics. SPE 24596.

- 11.** Eaton, B.A., 1969. Fracture Gradient Prediction and Its Application in Oilfield Operations. JPT.
- 12.** Ferreira C. & Serrano M., 2004 Hidráulica Avanzada de Perforación. Seflu Cempo, Isla de Margarita, Venezuela.
- 13.** Marshall J. & Weatherl M.H., 2005. Carter Creek Slimhole Well Design Enhances Development Drilling Economics. SPE 96239.
- 14.** Mega de la ANH 2020. Disponible: www.anh.gov.co.
- 15.** Pedersen J.N., 1959. Relating Slim-Hole Drilling Performance to South Louisiana Drilling Problems. SPE 1247-G.