

**VALIDACION DE LOS REGIMENES DE ESFUERZOS SEGÚN RESULTADOS
DE ESTABILIDAD DE POZO EN EL CAMPO APIAY**

**FABIAN EDUARDO RODRIGUEZ CAÑAS
ANDRES FELIPE SILVA ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2013

**VALIDACION DE LOS REGIMENES DE ESFUERZOS SEGÚN RESULTADOS
DE ESTABILIDAD DE POZO EN EL CAMPO APIAY**

**FABIAN EDUARDO RODRIGUEZ CAÑAS
ANDRES FELIPE SILVA ORTIZ**

Trabajo de Grado para optar por el título de Geólogo

Director:

**FRANCISCO ALBERTO VELANDIA
PATIÑO
Geólogo M.Sc.**

Codirector:

**JUAN GUSTAVO VARGAS PARDO
Geólogo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE GEOLOGIA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA – FABIAN

Para mis papas, Josué Gonzalo y María Teresa, por tenerme presente a cada momento durante estos 23 años.

A mi hermano, Daniel Felipe, por ser uno de mis grandes amigos.

A la nona Teresa y a mi mama Yadira, a mis tíos y tías, a mis primos y primas, por los buenos recuerdos.

A mi novia Paula, por acompañarme en gran parte de mi vida universitaria, apoyándome en todo momento.

DEDICATORIA – FELIPE

Agradezco a mis padres, Silvia y Jaime, por el apoyo que me han brindado toda mi vida.

A mis hermanas Paula, Marcela y Juliana por sus consejos y bromas de hermanas.

A mi abuelita Amanda y a mis tíos por su constante apoyo y ejemplos a seguir.

AGRADECIMIENTOS

A la compañía Halliburton por brindarnos la oportunidad de desarrollar el presente proyecto de investigación en conjunto con la Universidad Industrial de Santander.

Al “profe” Juan Gustavo Vargas, codirector de este trabajo, por sus valiosas lecciones profesionales y el tiempo dedicado a impulsar esta obra.

A Javier Mendoza, Erick Illidge y Yorguin Peña por su compañía, aportes y asesoría durante estos meses, así como por el buen ambiente en las reuniones de estabilidad de pozo.

Al profesor Francisco Velandia por el tiempo dedicado a la supervisar este proyecto, así como por su amabilidad.

A Paula Giovanna Delgado por su colaboración en los trámites universitarios relacionados al proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	25
OBJETIVOS	27
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	28
1. FUNDAMENTACION TEORICA	29
1.1 GEOMECANICA	29
1.1.1 Estabilidad de Pozo	29
1.1.1.1 Presión de Poro	33
1.1.1.2 Propiedades Mecánicas de la Roca	36
1.1.1.2.1 UCS	37
1.1.1.2.2 Cohesión	38
1.1.1.2.3 Módulo de Young	38
1.1.1.2.4 Relación de Poisson	40
1.1.1.2.5 Resistencia a la Tensión	40
1.1.1.2.6 Angulo de Fricción Interna	41
1.1.1.3 Esfuerzos	42
1.1.1.3.1 Esfuerzo Vertical	45
1.1.1.3.2 Esfuerzo Horizontal Mínimo	45
1.1.1.3.3 Esfuerzo Horizontal Máximo	47
1.1.2 Modelo Geomecánico	48
1.1.2.1 Presiones de Colapso y Fractura	50
1.2 REGISTROS DE POZO	52
1.2.1 Registros Eléctricos	52
1.2.1.1 Potencial Espontaneo (SP)	53
1.2.1.2 Resistivo	54
1.2.2 Registros Radioactivos	55
1.2.2.1 Gamma Ray (GR)	55

1.2.2.2 Espectrometría (NGS)	57
1.2.3 Registros de Porosidad	57
1.2.3.1 Densidad	57
1.2.3.2 Neutrón	58
1.2.3.3 Sónico	59
1.2.4 Otros Registros	60
1.2.4.1 Caliper	60
1.2.4.2 Imagen	61
1.2.4.3 Dipmeter	62
2. CAMPO APIAY	64
2.1 LOCALIZACIÓN	65
2.2 ANTECEDENTES	66
2.3 GEOLOGIA	67
2.3.1 Geomorfología	67
2.3.2 Estratigrafía	68
2.3.3 Estilo Estructural	72
2.3.4 Geoquímica	74
3. REGIMENES DE ESFUERZOS	75
3.1 REGIMEN NORMAL	78
3.1.1 Configuración Tectónica	79
3.1.2 Fallamiento Normal	80
3.2 REGIMEN INVERSO	80
3.2.1 Configuración Tectónica	81
3.2.2 Fallamiento Inverso	81
3.3 REGIMEN TRANSCURRENTE	82
3.3.1 Configuración Tectónica	82
3.3.2 Fallamiento de Rumbo	83
4. METODOLOGIA	84
4.1 IDENTIFICACION Y CLASIFICACION DE DATOS	85
4.1.1 Registros de Pozo	86

4.1.2 Propiedades Mecánicas de la Roca	86
4.1.2.1 Angulo de Fricción Interna	86
4.1.2.2 Unconfined Compressive Strength	87
4.1.2.3 Cohesión	87
4.1.2.4 Resistencia a la Tensión	88
4.1.2.5 Relación de Poisson	88
4.1.2.6 Módulo de Young	88
4.1.3 Modelo de Estabilidad	89
4.1.3.1 Presión de Poro	89
4.1.3.2 Presión de Colapso	90
4.1.3.3 Presión de Fractura	91
4.1.3.4 Peso de Lodo	91
4.1.3.5 Esfuerzo Vertical	92
4.1.3.6 Esfuerzo Horizontal Mínimo	92
4.1.3.7 Esfuerzo Horizontal Máximo	93
4.1.4 Surveys	93
4.1.4.1 Azimut	94
4.1.4.2 Inclinación	94
4.1.5 Eventos	94
4.1.5.1 Cavings	94
4.1.5.2 Influjos	95
4.1.5.3 Pérdidas de Fluido	95
4.1.5.4 Puntos e Intervalos Apretados	96
4.1.5.5 Reaming - Backreaming	96
4.1.5.6 Pegas de Tubería	97
4.1.5.7 Empaquetamientos	97
4.2 ANALISIS	98
4.2.1 Correlación de Datos	98
4.2.2 Regímenes Individuales	99
4.2.3 Régimen General	100

5. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA	101
5.1 ESTRATIGRAFIA	101
5.1.1 Formación F1	102
5.1.2 Formación F2	109
5.1.3 Formación F3	113
5.1.3.1 Unidad F3a	114
5.1.3.2 Unidad F3b	118
5.1.3.3 Unidad F3c	123
5.1.3.4 Unidad F3d	127
5.1.3.5 Unidad F3e	131
5.1.3.6 Unidad F3f	136
5.1.3.7 Unidad F3g	140
5.1.3.8 Unidad F3h	143
5.1.4 Formación F4	146
5.1.4.1 Unidad F4a	146
5.1.4.2 Unidad F4b	150
5.1.5 Formación F5	152
5.1.5.1 Unidad F5a	153
5.1.5.2 Unidad F5b	156
5.1.6 Formación F6	159
5.2 REGIMENES INDIVIDUALES	164
5.2.1 Apiay A	166
5.2.2 Apiay B	171
5.2.3 Apiay C	175
5.2.4 Apiay D	179
5.2.5 Apiay E	184
5.2.6 Apiay F	187
5.3 REGIMEN GENERAL	192
5.3.1 Implicaciones	193
5.3.2 Discusión de Resultados	194

CONCLUSIONES

198

BIBLIOGRAFIA

199

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fallas por tensión y <i>breakouts</i> en un registro de imagen.	31
Figura 2. Diagrama de esfuerzos para un pozo en dirección de un vector arbitrario	32
Figura 3. Esquema de los esfuerzos en profundidad interactuando con el contenido de los poros de la roca.	33
Figura 4. Juego de muestras sometidas a UCS.	37
Figura 5. Sistema de Círculos de Mohr. La pendiente de la curva de esfuerzo/deformación sirve para determinar el Módulo de Young.	39
Figura 6. Test brasileiro o <i>Brazilian Test</i> .	41
Figura 7. Modelos de fracturamiento (ideal y real, respectivamente).	44
Figura 8. Cubo de esfuerzos triaxial y la información necesaria para la determinación de los mismos.	47
Figura 9. Efecto del movimiento de la broca a distintas velocidades sobre la presión en el pozo. Las presiones de colapso (en rojo) y fractura (en verde) funcionan como límites para la estabilidad.	51
Figura 10. Herramientas para la realización de los tres tipos principales de registros.	53
Figura 11. Respuesta típica de un registro de GR.	56
Figura 12. Registro de imagen.	62
Figura 13. Ubicación de la subcuenca de Apiay-Ariari.	64
Figura 14. Ubicación del campo Apiay.	65
Figura 15. Columna estratigráfica generalizada de la subcuenca Apiay-Ariari.	71
Figura 16. <i>Breakouts</i> de pozo. El esfuerzo horizontal máximo es perpendicular a la aparición de estos.	75
Figura 17. Fases iniciales del Ciclo de Wilson, esfuerzos distensivos.	79
Figura 18. Falla normal y régimen de esfuerzos correspondiente.	80

Figura 19. Fases finales del Ciclo de Wilson, esfuerzos compresivos.	81
Figura 20. Falla inversa y régimen de esfuerzos correspondiente.	82
Figura 21. Falla de rumbo y régimen de esfuerzos correspondiente.	83
Figura 22. Vista general de <i>Predict</i> , software usado para la correlación de datos.	99
Figura 23. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de la formación F1 en el pozo A. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	105
Figura 24. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de la formación F1 en el pozo E. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	106
Figura 25. Ventana de estabilidad para la formación F1 en el pozo B, según el modelo E1.	107
Figura 26. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de la formación F2 y el miembro F3a en el pozo F. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	110
Figura 27. Ventana de estabilidad para la formación F2 y el miembro F3a en el pozo C, según el modelo E1.	112
Figura 28. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de la formación F2 y el miembro F3a en el pozo D. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	114
Figura 29. Ventana de estabilidad para la formación F2 y el miembro F3a en el pozo A, según el modelo E1.	118
Figura 30. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo E. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	118
Figura 31. Ventana de estabilidad para los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo B, según el modelo E1.	120

Figura 32. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo F. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	123
Figura 33. Ventana de estabilidad para los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo C, según el modelo E1.	125
Figura 34. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo D. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	128
Figura 35. Ventana de estabilidad para los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo A, según el modelo E1.	129
Figura 36. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3e y F3f en el pozo E. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	132
Figura 37. Ventana de estabilidad para los miembros F3e y F3f en el pozo B, según el modelo E1.	134
Figura 38. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3e y F3f en el pozo F. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	136
Figura 39. Ventana de estabilidad para los miembros F3e y F3f en el pozo C, según el modelo E1.	138
Figura 40. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo D. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	141
Figura 41. Ventana de estabilidad para los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo A, según el modelo E1.	144
Figura 42. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3g y F3h y las formaciones F4a, F5 y F6 en el pozo E. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	147
Figura 43. Ventana de estabilidad para los miembros F3h y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo B, según el modelo E1.	150

Figura 44. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3g y F3h y las formaciones F4a, F5 y F6 en el pozo F. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	154
Figura 45. Ventana de estabilidad para los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo C, según el modelo E1.	157
Figura 46. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo D. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.	160
Figura 47. Ventana de estabilidad para los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo E, según el modelo E1.	162
Figura 48. Esquema tridimensional del pozo A, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).	167
Figura 49. Sección superior del pozo A. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).	168
Figura 50. Sección inferior del pozo A. Se aprecian los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.	170
Figura 51. Esquema tridimensional del pozo B, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).	171
Figura 52. Sección superior del pozo B. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).	173
Figura 53. Sección inferior del pozo B. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.	175
Figura 54. Esquema tridimensional del pozo C, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).	176
Figura 55. Sección superior del pozo C. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).	177

Figura 56. Sección inferior del pozo C. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.	179
Figura 57. Esquema tridimensional del pozo D, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).	180
Figura 58. Sección superior del pozo D. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).	182
Figura 59. Sección inferior del pozo D. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.	183
Figura 60. Esquema tridimensional del pozo E, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).	185
Figura 61. Sección superior del pozo E. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).	186
Figura 62. Sección inferior del pozo E. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.	187
Figura 63. Esquema tridimensional del pozo E, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).	188
Figura 64. Sección superior del pozo F. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).	190
Figura 65. Sección inferior del pozo F. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.	191
Figura 66. Orientación inferida del esfuerzo horizontal máximo para el área de Apiay. Se toma como referencia el tope de la formación Carbonera.	196

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Nomenclatura del campo Apiay.	68
Tabla 2. Tipos de Kerógeno.	74
Tabla 3. Topes medidos de las formaciones del campo Apiay en los pozos trabajados.	102
Tabla 4. Espesores calculados de las formaciones del campo Apiay en los pozos trabajados.	103
Tabla 5. Comportamiento de los valores de las propiedades mecánicas de las rocas y las presiones que estas soportan en los pozos analizados del campo Apiay. Tales comportamientos aplican a nivel de formación.	164

RESUMEN

TITULO: VALIDACION DE LOS REGIMENES DE ESFUERZOS SEGUN RESULTADOS DE ESTABILIDAD DE POZO EN EL CAMPO APIAY.*

AUTORES: Fabián Eduardo Rodríguez Cañas, Andrés Felipe Silva Ortiz**.

PALABRAS CLAVE: Regímenes de Esfuerzos, Campo Apiay, Estabilidad de Pozo, Geomecánica.

DESCRIPCION

La existencia de dos modelos de regímenes de esfuerzos distintos para el campo Apiay (cada uno con su respectiva ventana de estabilidad) llevó al planteamiento de la validación de los mismos según resultados de estabilidad de pozo.

Este proyecto se sustenta en el marco de la geomecánica, basándose en la calibración de modelos a partir de eventos de perforación relacionados a estabilidad de pozo. El objetivo principal del trabajo se alcanzó a partir de la revisión de seis (6) pozos del citado campo petrolífero de Apiay. Cada modelo de regímenes de esfuerzos (E1 y E2) contó con una ventana de estabilidad propia (conformada por la presión de poro, la presión de colapso y el peso del lodo), usada para la evaluación de eventos y la validación de configuraciones de esfuerzos y el consiguiente régimen de los mismos.

El procedimiento realizado permitió la validación de dos regímenes de esfuerzos en la zona: transcurrente y normal, descartando el régimen inverso. Se validaron datos tanto del modelo E1 como del modelo E2, cuyas variables comunes, aparte de las correspondientes a la ventana de estabilidad, fueron los tres esfuerzos principales (vertical, horizontal máximo y horizontal mínimo) y dos propiedades mecánicas de la roca (cohesión y ángulo de fricción interna).

* Proyecto de Investigación.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño, Profesor Asociado de Geología

ABSTRACT

TITLE: VALIDATION OF STRESS REGIMES ACCORDING TO WELLBORE STABILITY RESULTS IN THE APIAY FIELD.*

AUTHORS: Fabián Eduardo Rodríguez Cañas, Andrés Felipe Silva Ortiz**

KEYWORDS: Stress Regimes, Apiay Field, Wellbore Stability, Geomechanics.

DESCRIPTION

The existence of two different stress regimes models for the Apiay field (each with its respective stability window) took the approach of the validation of the same according to results of wellbore stability.

This project is sustained on the framework of geomechanics, basing on the calibration of models from perforation events related to wellbore stability. The main objective of the work was reached from the revision of six (6) wells of the said oil field of Apiay. Every stress regimes model (E1 and E2) had its own stability window (formed by pore pressure, collapse pressure and mud weight), used for the evaluation of events and the validation of configurations of stresses and the consequent regime of the same.

The performed procedure allowed the validation of two stress regimes in the zone: strike-slip and normal, discarding the inverse regime. Data were validated both model E1 and model E2, whose common variables, apart from the corresponding to the stability window, were the three principal stresses (vertical, maximum horizontal and minimum horizontal) and two mechanical properties of the rock (cohesion and friction angle).

* Research Project.

** Faculty of Physicochemical Engineering, School of Geology. Director: Francisco Alberto Velandia Patiño, Associated Professor of Geology.

INTRODUCCION

El campo petrolífero de Apiay se caracteriza por los numerosos retos operacionales relacionados a geomecánica y estabilidad de pozo que presenta actualmente. Existe incertidumbre con respecto al régimen de esfuerzos que actúa en la zona y por lo tanto, resulta necesario establecer cuál de ellos se debe utilizar en pro de la predicción del correcto comportamiento geomecánico del pozo.

Las fallas operacionales y de estabilidad de pozo cuestan anualmente a las compañías petroleras millones de dólares, por lo tanto es de vital importancia establecer parámetros y correcciones que conlleven a alcanzar y superar los retos operacionales que surjan durante la etapa productiva de un pozo petrolero.

Para alcanzar estos objetivos se utilizan técnicas relacionadas a la geomecánica, culminando en un modelo de estabilidad de pozo cuya finalidad es mantener condiciones óptimas de operatividad, disminuyendo diversos eventos contraproducentes que se registran a medida que se avanza en el proceso de perforación del pozo y extracción de hidrocarburos.

La revisión bibliográfica propuesta para la identificación y clasificación de datos de estabilidad de pozo se realizó en base a datos suministrados por la compañía Halliburton para establecer las bases del proyecto en sí mismo. Una vez analizados estos datos, se procedió a reconocer sus características para realizar comparaciones entre ellos y así determinar generalidades presentes en el campo estudiado.

Con esto se buscó establecer un patrón de regímenes de esfuerzos local y, de ser posible, uno general para realizar un breve análisis de estabilidad de pozo que

hace parte de los objetivos planteados para el trabajo y que define un estándar de manejo de los pilares que condicionan las variables implicadas en este proceso.

La realización del proyecto se llevó a cabo en la ciudad de Bogotá D.C. en paralelo al cumplimiento de labores del cargo de ESG-Intern en la compañía Halliburton. El proceso fue supervisado desde varios niveles, con un proceso inductivo que desembocó en la capacitación para la realización del proyecto, la obtención y procesamiento de la información y finalmente la interpretación y definición de resultados.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Validar qué regímenes de esfuerzos describen mejor el comportamiento de estabilidad de pozo en el campo Apiay.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica para identificar y clasificar una serie de datos de estabilidad de pozo del campo Apiay.
- Analizar los datos suministrados en busca de patrones, tendencias o similitudes que permitan realizar analogías y comparaciones entre pozos.
- Establecer el régimen o regímenes de esfuerzos presentes en el campo Apiay.
- Determinar de qué manera se ve afectada la estabilidad de pozo de acuerdo al régimen o regímenes de esfuerzos presentes en cada pozo en particular.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Previo a la perforación de un pozo petrolífero para la extracción de hidrocarburos, y en pro de un funcionamiento adecuado del mismo durante su vida útil, se debe generar un modelo geomecánico cuyo objetivo principal sea la búsqueda de condiciones óptimas de estabilidad y la reducción de pérdidas económicas y prácticas en el pozo.

La definición de un régimen de esfuerzos es uno de los pasos en el proceso de construcción de este modelo cuyo fin es la evaluación del comportamiento estable de las paredes de roca del pozo. Cada pozo con su respectivo régimen o regímenes forma parte de un conjunto más grande en forma de campo petrolífero, que a su vez puede encontrarse caracterizado por su propio régimen de esfuerzos general.

La existencia de dos modelos de estabilidad de pozo para el campo Apiay con configuraciones de esfuerzos distintas hace necesaria la validación de regímenes en busca del modelo cuya aproximación a la realidad sea la más acertada, planteando ciertas incógnitas como lo son:

- ¿Qué tipo de regímenes de esfuerzos se presentan en los pozos del campo Apiay?
- ¿Existen patrones o tendencias comunes entre estos regímenes y los datos de estabilidad que permiten determinarlos?
- ¿Existe un régimen de esfuerzos predominante para el campo Apiay?
- ¿Cómo afectaría este régimen de esfuerzos único, de existir, la estabilidad de los pozos del campo Apiay?

1. FUNDAMENTACION TEORICA

1.1 GEOMECANICA

La geomecánica es la disciplina que permite, mediante la aplicación de conocimientos de mecánica rocas y suelos, intervenir en pro de la explotación óptima de los yacimientos petrolíferos durante todo su periodo de vida, que inicia con el proceso de perforación y dura hasta las últimas etapas de producción (*IMP, 2013*).

La geomecánica también estudia las características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas. Los conceptos y teorías de mecánica de rocas y suelos relacionan el comportamiento de las unidades geológicas bajo los cambios en los esfuerzos producto de las operaciones petroleras de perforación, completamiento y producción de pozos. Aunque las bases de la geomecánica fueron propuestas a principios del Siglo XX, las aplicaciones petroleras empiezan a tener mayor divulgación al comienzo de la década de los setenta (70) del mencionado siglo, y por lo tanto se trata de una disciplina novedosa en la ingeniería de petróleo. La geomecánica utiliza resultados experimentales de campo y laboratorio conjuntamente con soluciones analíticas para resolver problemas particulares (*Vásquez, 2001*).

1.1.1 Estabilidad de Pozo

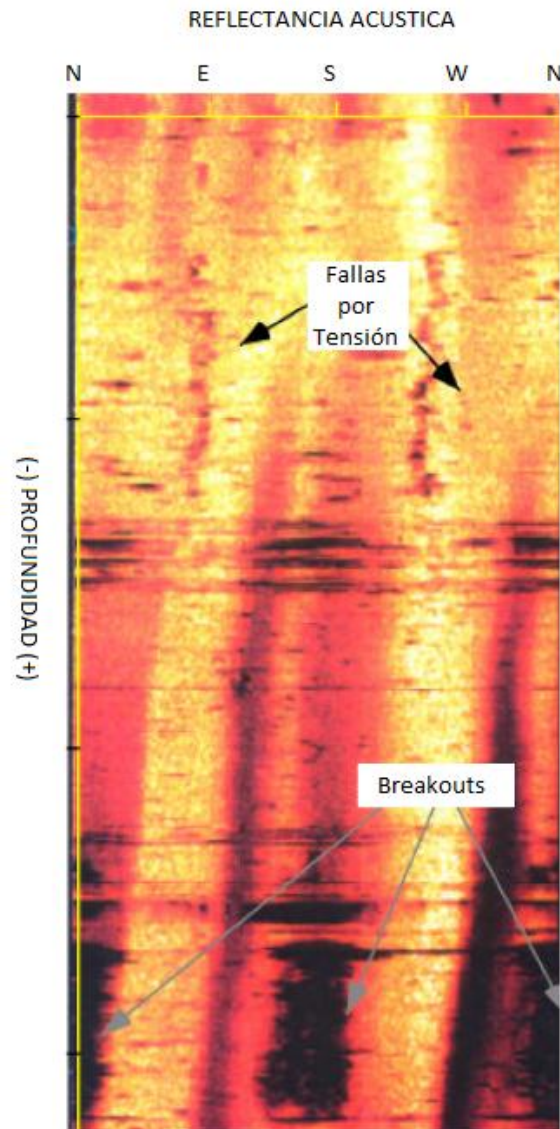
La estabilidad es un estado del pozo petrolífero que se caracteriza por la optimización de la eficiencia en el proceso de perforación, la obtención de información de calidad para la evaluación de la formación, la mejora en el desempeño de los materiales de revestimiento y el aseguramiento de la productividad del pozo a largo término (*Halliburton, 2013*).

Son numerosos los criterios de estabilidad de pozo a tener en cuenta para mantener en pleno funcionamiento una operación de este tipo: La evaluación de criterios de falla, la determinación de las propiedades mecánicas de la roca, de la magnitud y la dirección de los esfuerzos, la determinación de criterios de estabilidad para el hueco, la ventana operativa de fluido de control, el diseño de trayectorias para el pozo, el posible colapso de las tuberías, la prevención y el control del llamado arenamiento, entre otros (*IMP, 2013*).

Debido a la influencia de presiones, la estabilidad de pozo puede ser afectada por las fallas por tensión o compresión en la pared del hueco (*Rabia, 2001*), como se aprecia en la *Figura 1*:

- El pozo falla por tensión cuando la presión ejercida por el lodo de perforación induce esfuerzos en la pared del pozo que exceden la fuerza tensional de la roca. La falla toma la forma de grietas, comenzando desde la pared del pozo y extendiéndose radialmente entre la formación. El lodo de perforación puede entonces penetrar y propagar estas grietas, llevando a una caída en el nivel de lodo en el hueco. Al perderse la presión ejercida por el lodo, se genera un desbalance que induce problemas de inestabilidad.
- El pozo falla por compresión cuando la presión del lodo de perforación es insuficiente para mantener los esfuerzos de corte en la pared del hueco por debajo de la fuerza de corte de la formación. Cuando el hueco falla por compresión, fragmentos de roca caen en el hueco y su diámetro se incrementa. Tanto el incremento en el diámetro del hueco como el volumen de escombros cayendo en el hueco dificultan o imposibilitan el movimiento del equipo de perforación dentro del pozo. Se requiere de limpieza en el mismo para mejorar el transporte de cortes y derrumbes.

Figura 1. Fallas por tensión y *breakouts* en un registro de imagen.

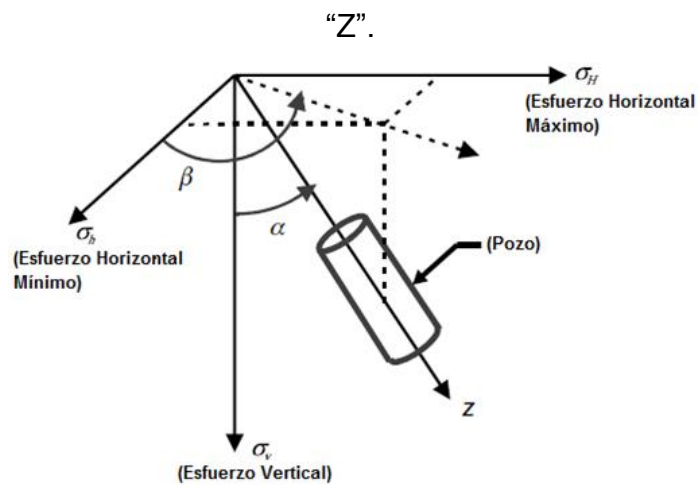


Fuente: Tomado y modificado de Castillo & Moos (2001).

Por otra parte, la elección de una trayectoria óptima de perforación a través del reservorio trae beneficios como la disminución del daño a la formación o la filtración de lodo, así como un aumento en el desempeño del pozo sin tener que requerir a parámetros de perforación más agresivos (*Zhou et al., 1996*).

Existe una compleja relación entre la trayectoria del pozo, el peso del lodo, la resistencia de la roca, las fracturas naturales, las magnitudes y orientaciones de los esfuerzos principales *in-situ* y la presión de poro. Los pozos, mientras más desviados se encuentren y mayor sea su alcance, ofrecen mayores beneficios económicos por los bajos costos del desarrollo del campo petrolífero con tasas de producción más rápidas y altos factores de recobro. El mecanismo de estabilidad dominante depende de un amplio rango de factores como lo son el tipo de shale, el ambiente de esfuerzos *in-situ* (como se aprecia en la *Figura 2*), el gradiente termal y el tipo de fluido de perforación. Estos factores se encuentran distribuidos en un amplio rango y el grado en el cual estos influyen en la estabilidad de pozo puede variar drásticamente (*Tan et al., 1999*).

Figura 2. Diagrama de esfuerzos para un pozo en dirección de un vector arbitrario "Z".



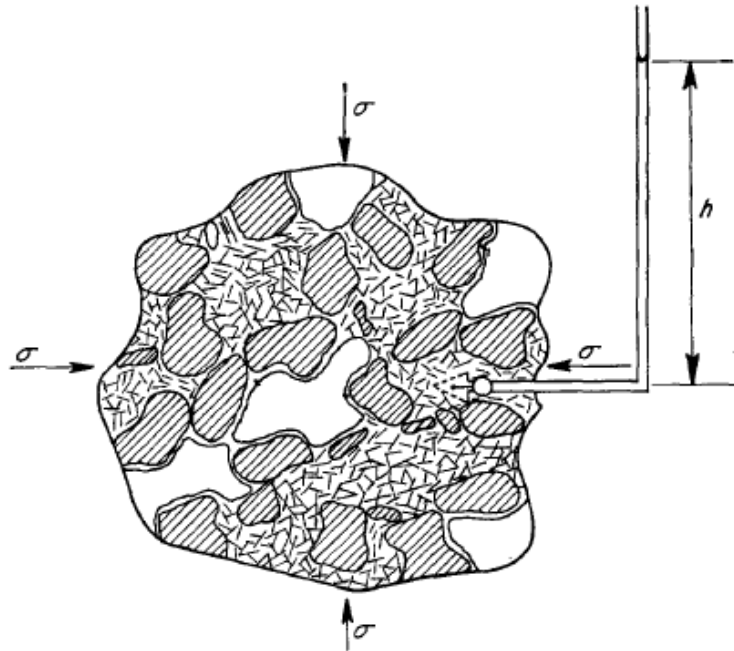
Fuente: Tomado y traducido de Chen et al. (2002).

El correcto manejo de los pesos críticos de lodo ayuda a contrarrestar la inestabilidad del pozo al proporcionan suficiente soporte a las paredes del mismo, redistribuyendo los esfuerzos. Estos pesos críticos de lodo dependen directamente del régimen de esfuerzos *in-situ*, de las presiones de poro implicadas y de la dirección e inclinación del pozo, además de las propiedades de la formación perforada (*Zhou et al., 1996*).

Las implicaciones de la inestabilidad de un pozo en el tiempo de perforación y equipo dañado o perdido ha llevado a las compañías operadoras y de servicios (como lo es Halliburton) a aplicar los principios de la mecánica de las rocas para definir límites en el peso del lodo para evitar la falla por tensión o compresión (*Rabia, 2001*). Los pilares de la geomecánica en pro de la estabilidad de pozo son tres (3) y serán tratados a continuación:

1.1.1.1 Presión de Poro

Figura 3. Esquema de los esfuerzos en profundidad interactuando con el contenido de los poros de la roca.



Fuente: Tomado y modificado de Mitchell (1962).

Los materiales geológicos están compuestos por un sistema de varias fases de partículas minerales que crean una estructura porosa donde residen fluidos tales como el agua, los hidrocarburos y el gas. Las partículas representan una fase

sólida conocida como esqueleto mineral y debido a esto, la deformación del material geológico está controlada por la interacción entre partículas individuales, la deformación de partículas y el movimiento relativo entre las mismas. El fluido intersticial puede fluir a través de los poros interactuando con el esqueleto mineral, alterando la magnitud de las fuerzas en el contacto entre partículas e influenciando la resistencia y compresibilidad del material geológico (*Vásquez, 2001*).

El gradiente de presión de poro depende de la porosidad de la roca, la densidad del fluido que alberga la porosidad y la evolución geológica de las formaciones (ver *Figura 3*), como por ejemplo la composición química y la distancia de transporte de los sedimentos (*Fernández & Alvarelllos, 2011*). La presión de poro se define como la presión que actúa sobre los fluidos que se encuentran en los espacios porales de la roca. Este es el significado científico de lo que es denominado generalmente como presión de formación. Dependiendo de su magnitud, la presión de poro puede clasificarse como normal, anormal o subnormal (*Rabia, 2001*):

- La presión de poro normal es igual a la presión hidrostática de una columna de fluido de formación que se extiende desde la superficie hasta la formación subsuperficial considerada bajo condiciones normales. La presión de poro no es una constante. La magnitud de la presión de poro varía con la concentración de sales disueltas, el tipo de fluido, los gases presentes y el gradiente de temperatura. Por ejemplo, a medida que la concentración de sales disueltas aumenta, la magnitud de la presión de poro se incrementa.

- La presión de poro anormal se define como cualquier presión mayor a la presión hidrostática del agua de formación que ocupa los poros de las rocas. La presión de poro anormal es llamada a veces sobrepresión o geopresión y puede ser pensada como la suma de una componente

hidrostática normal y una cantidad extra de presión. Este tipo de presión de poro puede ocurrir a cualquier profundidad. La causa de la sobrepresión es atribuida a una combinación de cambios geológicos, geoquímicos, geotermales y mecánicos.

- La presión de poro subnormal se define como cualquier presión menor a la presión hidrostática de fluido correspondiente a una profundidad dada. Estas presiones de poro se encuentran de forma menos frecuente que las presiones de poro anormales y se desarrollan a menudo mucho después de que la formación se deposita. Las presiones subnormales pueden tener causas naturales relacionadas a la historia estratigráfica, tectónica y geoquímica de un área o pueden ser causadas artificialmente por la producción en los pozos.

La presión hidrostática se define como el producto de la densidad promedio del agua en los sedimentos suprayacentes, la profundidad vertical verdadera y una constante adimensional para la conversión de unidades de aceleración de la gravedad (Acevedo, 2012). Esta constante adimensional es la gravedad adaptada a las mediciones en pies (ft):

$$P = \rho h \text{ (1.42)}$$

La presión de poro, como propiedad de las rocas sedimentarias, cuesta a la industria de los hidrocarburos millones de dólares en riesgos potenciales para la seguridad y el medio ambiente. Existen soluciones tecnológicas integradas para los dominios de la ingeniería y las geociencias cuando estas requieren de la predicción, el análisis y la interpretación de la presión de poro. Los beneficios del correcto manejo de este pilar de la geomecánica incluyen la mejora en el desempeño a través de la reducción de atascamientos, patadas de pozo, pérdidas de circulación y tiempo no productivo (Halliburton, 2013).

1.1.1.2 Propiedades Mecánicas de la Roca

Debido a que las fluctuaciones de temperatura por circulación del lodo durante la perforación alteran todos los esfuerzos de la misma manera, no se modifica la anisotropía de los mismos alrededor del pozo. Aun así, las propiedades de la roca pueden ser alteradas como resultado de los cambios en la temperatura, lo cual podría incrementar o reducir la posibilidad de falla mecánica, dependiendo de su efecto en las propiedades de la roca (*Zhou et al., 1996*).

Las propiedades mecánicas de la roca son útiles en la predicción de la respuesta de la roca a la perforación y si es combinada con el estado de esfuerzos *in-situ* puede predecir los pesos de lodo necesarios para mantener un pozo estable. Los ensayos de laboratorio ayudan a caracterizar mejor las propiedades mecánicas de la roca. Sin embargo, debido a la dificultad y elevado costo de obtener muestras de rocas en las formaciones no productoras, en la mayoría de los casos se utilizan una serie de relaciones empíricas que permiten tener una estimación de primer orden de las diferentes propiedades mecánicas de interés para el modelo geomecánico. En el mejor de los casos, cuando existen ensayos de laboratorio, estos valores puntuales se pueden utilizar para calibrar las relaciones empíricas. Desde el punto de vista del modelo geomecánico, los parámetros de la roca que se necesitan caracterizar son la resistencia a la compresión simple, la resistencia a la tensión, el coeficiente de fricción interna y las constantes elásticas (módulo de elasticidad o de Young y la relación de Poisson). De éstos, el UCS es quizás el parámetro más crítico por la relevancia que tiene en el cálculo de la presión de colapso en los modelos de estabilidad de pozo (*Fernández & Alvarelllos, 2011*).

Cada roca es un material único en su naturaleza, no existe un modelo para definir todas sus propiedades debido al alto grado de variabilidad de estas. Muchas veces una misma roca no es homogénea en sus propiedades ni siquiera en el volumen que ocupa.

1.1.1.2.1 UCS

El esfuerzo compresivo sin confinar o uniaxial (UCS, *Unconfined Compressive Strength*) se determina mediante una prueba conocida como prueba uniaxial de compresión (UCT, *Unconfined Compression Test*) que mide la resistencia al corte de los suelos cohesivos (o rocas). La prueba consiste en la aplicación de una carga axial controlando ya sea la deformación o el esfuerzo (*State of California – Business, Transportation and Housing Agency, 2000*):

Figura 4. Juego de muestras sometidas a UCS.



Fuente: Tomado de Torres & González (2003).

- Se trata de una prueba rápida para la obtención de parámetros de resistencia.
- No es aplicable a suelos sin cohesión o de grano grueso.
- La deformación debe ser controlada, si las muestras de roca son sometidas a compresión muy rápidamente, la presión de poro experimentaría cambios que debe disipar para que la prueba sea válida.

El ensayo para medir el UCS (mostrado en la *Figura 4*) debe cumplir con las siguientes condiciones (*González, 2002*):

- La razón largo/ancho de la muestra debe ser 2.5:1 o 3.0:1 dependiendo del caso.
- Los extremos deben ser paralelos y pulidos, sin grietas.
- El ancho de la muestra debe ser mayor a diez (10) veces el tamaño medio del grano.

1.1.1.2.2 Cohesión

La fuerza resistiva por unidad de área es denominada cohesión. La cohesión es una componente de la resistencia al corte de las rocas (o cualquier otro material consolidado) que es independiente de la fricción entre partículas (*Blasio, 2011*). La cohesión une las partículas minerales que forman la roca. Es uno de los factores de los que depende la resistencia de la roca y jamás es un valor único, al igual que las demás propiedades tratadas (*González, 2002*).

Las rocas normalmente presentan valores de cohesión muy altos (del orden de los cientos a los miles de Psi), lo que es miles de veces mayor a los valores de cohesión de los suelos. En esfuerzos normales finitos, las rocas muestran comportamiento tanto cohesivo como friccional (*Blasio, 2011*).

1.1.1.2.3 Módulo de Young

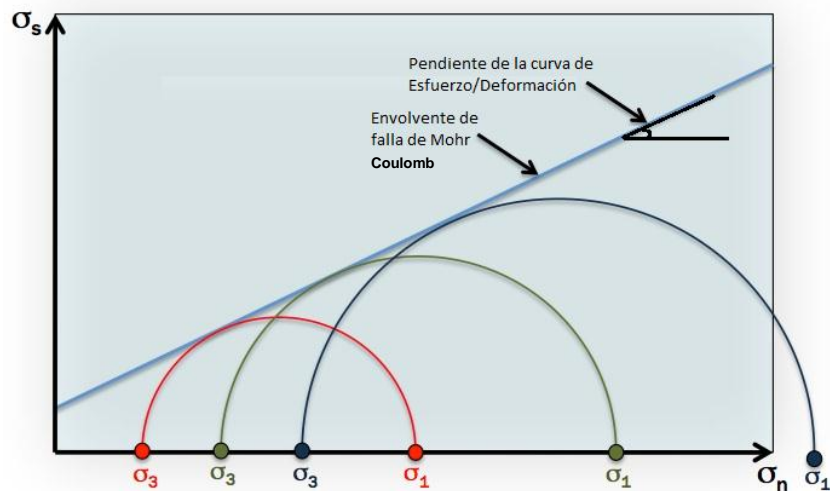
También conocido como el módulo de tensión o módulo elástico, es una medida de la rigidez de un material elástico y es una cantidad usada para caracterizar materiales. Se define como la relación de esfuerzo a lo largo de un eje sobre la deformación a lo largo del eje en el intervalo de esfuerzo sobre el cual la ley de

Hooke se cumple (*Blasio, 2011*). En otras palabras, se trata del producto entre el esfuerzo y la deformación:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Este parámetro caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Este comportamiento fue observado y estudiado por el científico inglés Thomas Young (*IUPAC, 1993*).

Figura 5. Sistema de Círculos de Mohr. La pendiente de la curva de esfuerzo/deformación sirve para determinar el Módulo de Young.



Fuente: Traducido y modificado de González (2002).

El módulo de Young puede ser experimentalmente determinado de la pendiente de una curva de esfuerzo-deformación creada a partir de pruebas de compresión generadas en una muestra del material (*Figura 5*). En materiales anisótropos, el Módulo de Young puede tener diferentes valores dependiendo de la dirección de la fuerza aplicada con respecto a la estructura del material (*Blasio, 2011*).

1.1.1.2.4 Relación de Poisson

La relación de Poisson es una medida de la compresibilidad de un material perpendicular al esfuerzo aplicado, que es lo mismo que la relación de deformación latitudinal con respecto a la longitudinal. Esta constante elástica fue nombrada por Simeone Poisson (1781-1840), un matemático francés (*Blasio, 2011*).

En otras palabras, proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento (*Ortiz, 1998*). En un ensayo de tracción, el coeficiente de Poisson corresponde a la razón entre la elongación longitudinal y a la deformación transversal (*Blasio, 2011*).

1.1.1.2.5 Resistencia a la Tensión

Las rocas se distinguen de todos los demás materiales comunes de ingeniería, a excepción del concreto, por su baja resistencia a la tensión. Los especímenes de roca sometidos a pruebas de tensión uniaxial fallan al someterse a esfuerzos muy bajos en comparación a los valores obtenidos en las pruebas a la compresión simple (UCS). Debido a que las uniones y otras fracturas ofrecen poca o nula resistencia a la tensión, se puede asumir que ocurrirá lo mismo en un macizo rocoso. La implicación de esta propiedad en diseños de perforación en roca es que ninguna zona de perforación debería ser expuesta a esfuerzos de tensión debido a que ocurriría una redistribución de esfuerzos locales y la distensión puede dar como resultado inestabilidad en la roca, provocando desprendimiento espontáneo o progresivo de roca de las paredes del pozo (*Páez, 2007*).

Figura 6. Test brasileiro o *Brazilian Test*.



Fuente: Tomado de Hemphill (2008).

Para medir la resistencia a la tensión de una roca se realiza el llamado *Brazilian Test* o test brasileiro (*Figura 6*), que consiste en una prueba de UCS con la muestra de costado, lo cual genera una componente tensional sobre la misma que acaba por romperla (*Hemphill, 2008*).

1.1.1.2.6 Angulo de Fricción Interna

Conocido como AFI, se trata de la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física. Depende de varios factores (la densidad de la roca, además del tamaño, distribución y la forma de los granos) y su magnitud es igual al ángulo de resistencia al rozamiento, dependiente del estado de la tensión en el cuerpo rocoso. Aparece representado mediante círculo de Mohr como el ángulo de la línea tangente a los círculos y su valor decrece gradualmente con el aumento del valor de la tensión (*IUPAC, 1993*).

En rocas, el ángulo de fricción interna muestra la resistencia a los esfuerzos de corte. Su valor exacto es determinado experimentalmente o mediante la siguiente ecuación:

$$\mu_e = \tan \alpha$$

Se trata del coeficiente estático de fricción, que es igual a la tangente del ángulo de reposo de los granos al interior de la roca.

Debido a que hay diferentes tipos de roca, cada una con un comportamiento geomecánico diferente, existen diferentes ángulos de fricción interna. Se ha observado que muchos materiales rocosos tienden a fracturarse por esfuerzo de corte en ángulos de alrededor de sesenta grados (60°) durante una compresión uniaxial, entonces una buena estimación para el ángulo de fricción interna de muchas rocas es de alrededor de treinta grados (30°). Sin embargo se debe tener en cuenta que el valor puede variar ampliamente, siendo de menos de diez grados (10°) para algunas rocas muy blandas y más de cincuenta grados (50°) para algunas rocas muy duras (*Fernández & Alvarelllos, 2011*).

1.1.1.3 Esfuerzos

Los materiales geológicos están compuestos de partículas sólidas y poros llenos de fluidos que pueden desplazarse. Debido a esto, cuando un elemento de material geológico está sometido a un esfuerzo externo, el mismo, se reparte en un esfuerzo intergranular y una presión de poro de manera que:

$$\sigma = \sigma' + (Bi.Pp)$$

Esfuerzo total es igual a esfuerzo efectivo más el producto entre el coeficiente de Biot y la presión de poro. El Coeficiente de Biot mide la cantidad de esfuerzo que

toma el fluido. El esfuerzo efectivo también es conocido como esfuerzo intergranular y controla el comportamiento mecánico de los materiales geológicos. Todos los efectos medibles de un cambio de esfuerzo (compresión, distorsión, resistencia) son debidos exclusivamente a esfuerzos efectivos. En materiales sin poros como los metales, no existe presión de poros y por lo tanto el esfuerzo efectivo es igual al esfuerzo total (*Vásquez, 2001*).

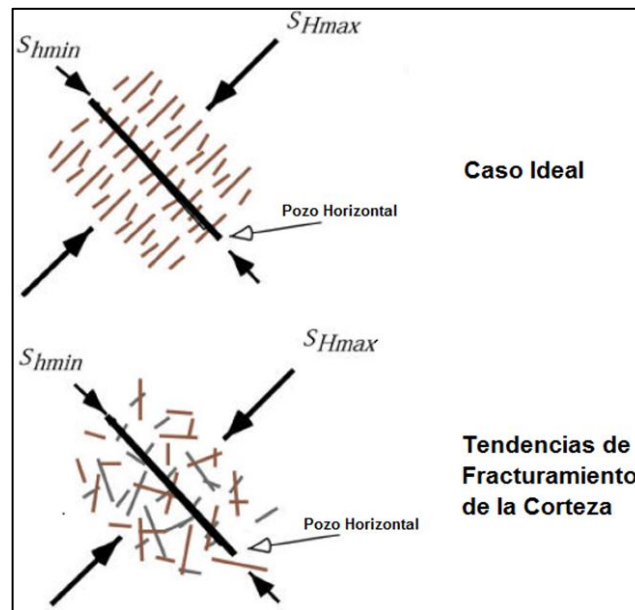
Un campo de esfuerzos bien delimitado es esencial para determinar la ventana de lodos apropiada para controlar la dirección de la falla (en caso de haberla, sea esta compresiva o distensiva) y, al mismo tiempo, prevenir el colapso de la formación o pérdidas de fluido a través de fracturas de origen natural. Las fracturas inducidas por la perforación están limitadas a la pared del pozo y no afectan la estabilidad mecánica del hueco (*Zhou et al., 1996*).

Existen dos tipos de falla en la roca debida a esfuerzos (*Chen et al., 1996*):

- Falla por tensión: Identificadas por la aparición de fracturas hidráulicas, ocurren cuando la presión del lodo es excesivamente alta (aunque no siempre). Las presiones de poro se hacen mayores que la presión del lodo como resultado de la deformación, creando unos límites de presiones de lodo (conocidos como la ventana de presiones) en la cual la falla por tensión no debería ocurrir.
- Falla por cizalla: Identificadas mediante la aparición de *breakouts*, suelen ocurrir cuando la presión del lodo no es lo suficientemente alta para mantener el hueco estable. Cuando la presión de poro es excesivamente alta, ocurren este tipo de fallas. Al igual que con la falla por tensión, existen unos límites de presión de lodo que definen una ventana en la cual la falla por cizalla no debería ocurrir.

Las regiones sometidas a esfuerzos tectónicos considerables brindan un entorno más estable para pozos inclinados que para pozos verticales aunque en apariencia pueda parecer lo contrario (*Tan et al., 1999*).

Figura 7. Modelos de fracturamiento (ideal y real, respectivamente).



Fuente: Tomado de Castillo & Moos (2001).

Debido a la gran cantidad de parámetros que afectan el equilibrio de los cuerpos de roca y que se encuentran en acción continua sobre los mismos, no es posible plantear un modelo único que represente fielmente la ocurrencia de fracturas en un volumen rocoso determinado (*Figura 7*). Los modelos son útiles como una aproximación a la realidad y a la determinación de la orientación de los esfuerzos (*Castillo & Moos, 2001*).

Existen herramientas que involucran los regímenes de esfuerzos *in-situ* para analizar la estabilidad de pozo eficientemente, el modelo complejo se incluye solo cuando es requerido (*Chen et al., 1996*). Estas facilidades permiten la valoración fácil y efectiva de la capacidad de perforación del pozo, el perfil óptimo del mismo,

los efectos de la anisotropía en la resistencia del material y de la presión de poro inducida en la estabilidad (*Zhou et al., 1996*).

1.1.1.3.1 Esfuerzo Vertical

El esfuerzo vertical o de sobrecarga es la concentración de todas las presiones generadas por la carga vertical que suprayace al punto donde es medido el esfuerzo. La estimación más básica posible se hace mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_v = G.H$$

El esfuerzo vertical es igual al producto entre la profundidad y la gravedad. A mayor profundidad, mayor esfuerzo vertical, independientemente de las propiedades de la roca. Esta estimación de esfuerzo *in-situ* actúa bien en promedio, pero hay fuertes diferencias, sobre todo a bajas profundidades. Igualmente, desde el punto de vista de la teoría elástica, el cálculo solo tiende a cumplirse a altas profundidades. La estimación del esfuerzo vertical es especialmente crítica en ambientes de muy alta presión y en regiones donde hay evidencias de que el esfuerzo mínimo puede estar muy próximo al esfuerzo vertical. La magnitud del esfuerzo vertical para una profundidad dada puede ser estimada integrando la distribución de densidades en profundidad (*Fernández & Alvarelllos, 2011*), como se muestra en la *Figura 8*.

1.1.1.3.2 Esfuerzo Horizontal Mínimo

Las formaciones pueden ser fracturadas para estimular la producción de hidrocarburos por incremento de la permeabilidad de la formación. Ocasionalmente, las formaciones son fracturadas no intencionalmente por el uso de un peso de lodo mayor a la presión de fractura de la pared del pozo. Pruebas

de laboratorio han mostrado que las fracturas hidráulicas se propagan perpendicularmente al esfuerzo horizontal mínimo (S_{hmin}). Este hecho, combinado con datos de presión obtenidos por operaciones de fracturamiento hidráulico puede ser usado para determinar la magnitud del esfuerzo horizontal mínimo (Rabia, 2001).

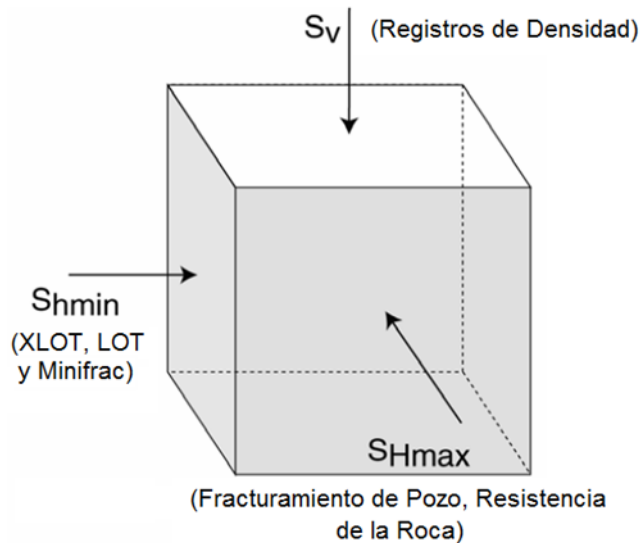
La prueba para determinar el esfuerzo horizontal mínimo se divide en dos partes (Hemphill, 2008):

- El proceso comienza cuando se incrementa gradualmente la presión inyectando fluido en el hueco y monitoreando la relación entre el volumen bombeado y el incremento de presión (conocido como FIT, *Formation Integrity Test*). Cuando la relación se hace no lineal, se asume que la fractura se ha abierto (se alcanza la presión de ruptura de la formación o FBP (*Formation Breakdown Pressure*) y hasta este punto se le conoce como prueba de *Leak-off* (LOT, *Leak-off Test*)), enumerada en la *Figura 8*. La presión en este punto es igual al esfuerzo perpendicular a la cara de la fractura, lo que experimentalmente se ha identificado como el esfuerzo horizontal mínimo.
- Una vez que se ha iniciado y extendido la fractura, la presión del fluido en el hoyo se reduce para permitir que la fractura se cierre. Si se decide realizar este proceso como una prueba *Leak-off* extendida (XLOT, *Extended Leak-off Test*), primero se mide la presión de propagación de la fractura (FPP, *Fracture Propagation Pressure*) que es constante con el tiempo y finalmente se obtiene la presión de cierre de la fractura (FCP, *Fracture Closure Pressure*) que es menor que la FPP. Si se realiza la prueba extendida, el esfuerzo horizontal mínimo se define como la presión medida al momento del cierre de la fractura.

1.1.1.3.3 Esfuerzo Horizontal Máximo

La magnitud del esfuerzo horizontal máximo es la componente del tensor de esfuerzos más difícil de determinar. Dado que la magnitud de este esfuerzo no se puede medir directamente, hay que inferir su magnitud a partir de modelos matemáticos (Fernández & Alvarellos, 2011).

Figura 8. Cubo de esfuerzos triaxial y la información necesaria para la determinación de los mismos.



Fuente: Tomado y traducido de Ahmad (2005).

El hueco se fractura cuando el esfuerzo circunferencial en la pared del mismo es igual a la fuerza de tensión de la roca. El esfuerzo circunferencial es en realidad un esfuerzo inducido como resultado de la perforación del pozo. Si hay esfuerzos desiguales alrededor del hueco, este se torna ovalado y tal característica puede ser medida por un registro *caliper*. Los llamados “*breakouts*” del hueco se propagan paralelamente al esfuerzo horizontal mínimo. Si el *caliper* está calibrado para medir el azimut del hoyo con respecto al norte, se puede determinar la orientación del esfuerzo principal mínimo (Rabia, 2001).

Cuando un pozo se perfora en un medio elástico, homogéneo e isótropo, los esfuerzos alrededor del pozo se reorganizan de tal manera que la máxima concentración de esfuerzos se localiza en la dirección del esfuerzo mínimo y la menor concentración de esfuerzos ocurre en la dirección del esfuerzo máximo. En el caso de un pozo vertical, alineado con uno de los ejes principales de esfuerzos, el esfuerzo mínimo tangencial se localiza en la orientación del esfuerzo horizontal máximo, mientras que el esfuerzo máximo tangencial ocurre en la dirección del esfuerzo horizontal mínimo. Cuando el esfuerzo tangencial excede la resistencia a la compresión de la roca (UCS) la parte del pozo en compresión se deforma por cizalla y se generan “*breakouts*” a noventa (90) grados de la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Si el esfuerzo tangencial pasa al dominio de tensión y excede la resistencia a la tensión de la roca, se generan fracturas de tensión inducidas. Estas fracturas inducidas se orientan paralelas a la dirección del esfuerzo horizontal máximo. Por ende, los derrumbes generados por contraste de esfuerzos en las paredes de un pozo proporcionan información sobre la orientación de los esfuerzos (*Fernández & Alvarelllos, 2011*).

En este sentido los registros de imagen proveen una información excepcional sobre los esfuerzos, no solo sobre la orientación, puesto que los derrumbes se pueden observar, sino también sobre la magnitud de los mismos ya que la anchura de los derrumbes está directamente relacionada con la magnitud de los esfuerzos (*Zoback et al., 2003*), como se cita en la *Figura 8*.

1.1.2 Modelo Geomecánico

Con el fin de confeccionar un modelo que incluya la mayor parte de las variables implicadas en la estabilidad de un pozo petrolífero, se han desarrollado una serie de herramientas de análisis de estabilidad con diversos enfoques para predecir el comportamiento de las rocas perforadas (especialmente los shales) (*Chen et al., 1996*).

El análisis de estabilidad de pozo más simple de todos es el correspondiente a un mecanismo de falla por esfuerzos inducidos, generalmente para casos estáticos. Se puede inducir inestabilidad en el pozo (sobre todo en capas de shale) mediante la aplicación de esfuerzos *in-situ*, creando interacciones fisicoquímicas entre el fluido de perforación y la capa de roca o con una combinación de ambos. Esta herramienta puede ser usada para determinar pesos críticos del lodo y el grado de fractura asociado con la perforación de un pozo en una dirección escogida y el ángulo de desviación. Teniendo en cuenta los elementos críticos del mecanismo o mecanismos dominantes para el pozo, así como la precisión de los datos disponibles, se debe elegir una herramienta analítica apropiada para analizar la estabilidad de pozo. Este análisis debe ser tan complejo como complejo sea el pozo estudiado (*Tan et al., 1999*).

En la actualidad, con la exploración de reservorios de gran profundidad y el incremento en la explotación en *offshore* en cuencas de todo el mundo, los costos de producción están en su punto máximo. El costo de perforación de un solo pozo en *offshore* puede alcanzar los diez (10) millones de dólares americanos, por lo que el éxito comercial es algo esquivo. La perforación direccional es casi un sinónimo de inestabilidad, y esta conlleva no solo un costo adicional sino también grandes demoras en el proceso de perforación y podría llevar al abandono del pozo si no es manejada correctamente. Se estima que la pérdida anual debida directa o indirectamente a la inestabilidad de pozo asciende a quinientos (500) millones de dólares americanos (*Chen et al., 1996*).

Un modelo geomecánico integro contiene generalmente y casi siempre en el siguiente orden las siguientes variables:

- Presión de poro
- Peso del lodo

- Presión de colapso
- Esfuerzo horizontal mínimo
- Presión de fractura

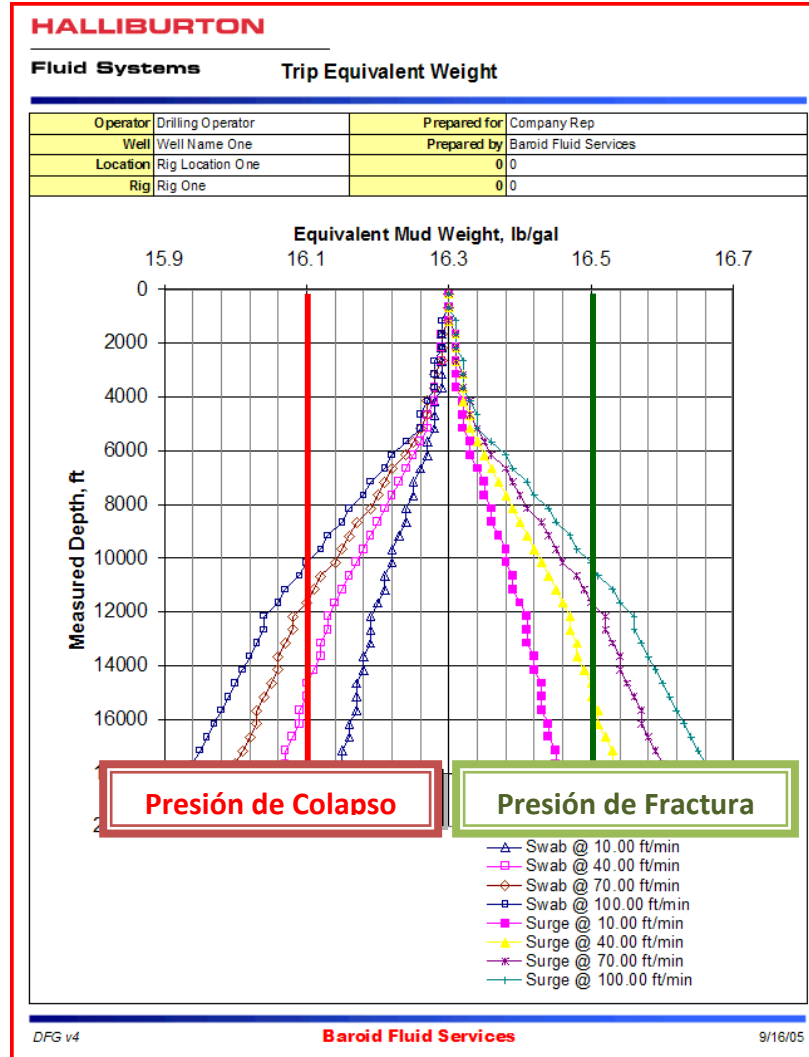
Existen dos variables más que pueden incluirse en el modelo para determinar el régimen de esfuerzos sobre el cual se está trabajando, que son el esfuerzo vertical y el esfuerzo horizontal máximo. Por otra parte, las presiones de colapso y fractura dependen directamente de las propiedades mecánicas de la roca y de la presión de poro, por lo cual serán tratadas a continuación.

1.1.2.1 Presiones de Colapso y Fractura

La tecnología de fluidos de perforación es parte integral del completamiento exitoso de las operaciones de perforación. Desde una perspectiva práctica, la principal función de los fluidos de perforación es proporcionar la carga hidrostática necesaria para balancear la presión de la formación y soportar parte de la carga aplicada a las paredes del pozo por esfuerzos inducidos. Cuando la presión ejercida por los fluidos de perforación supera la presión de la formación (usualmente por una mala práctica de perforación), los fluidos penetrarán en la roca y reducen la efectividad del lodo en las paredes del pozo. Si la presión del pozo es excesivamente alta, el fracturamiento hidráulico de la formación puede causar pérdidas de fluido de perforación. La densidad del fluido de perforación debe ser optimizada para prevenir el colapso del hueco. La densidad del fluido de perforación se elige en función del ángulo de desviación y la dirección del pozo así como de las propiedades mecánicas de la roca perforada (*Chen et al., 2002*).

Existen dos presiones o gradientes que gobiernan la estabilidad de un pozo determinado a una profundidad dada, que se muestran en la *Figura 9* y son (*Chirinos, 2012*):

Figura 9. Efecto del movimiento de la broca a distintas velocidades sobre la presión en el pozo. Las presiones de colapso (en rojo) y fractura (en verde) funcionan como límites para la estabilidad.



Fuente: Tomado y traducido de Vargas (2009).

- La presión de colapso es la máxima presión externa que puede resistir la pared del pozo. Esta presiones externa es generalmente una combinación de la presión de poro, la presión hidrostática y una o varias presiones impuestas. Todas actúan en conjunto hasta el colapso.

- La presión de fractura es aquella que resiste la formación antes de abrirse o fracturarse en un punto dado del hoyo, es decir, la capacidad que tienen las formaciones expuestas en un pozo para soportar la presión del fluido de perforación más cualquier presión añadida desde la superficie bien sea de forma intencional o no. Para que ocurra la fractura es necesario que la presión ejercida sobre la formación sea mayor que la suma de la presión de poro y la componente horizontal de la presión de sobrecarga. La presión de fractura es fácilmente calculable mediante el LOT.

1.2 REGISTROS DE POZO

Un registro es un reconocimiento detallado de las formaciones geológicas que comprenden un pozo a partir de herramientas diversas. El registro puede estar basado en inspecciones visuales de muestras traídas a superficie (registros geológicos) o en mediciones físicas realizadas por instrumentos bajados al pozo (registros geofísicos, *Figura 10*). Los registros de pozo pueden ser hechos durante cualquier etapa de la vida del pozo, sea esta de perforación, completamiento, producción o abandono del mismo. Los registros de pozo se toman en pozos perforados para extracción de petróleo, gas y aguas subterráneas, para exploración mineral y geotermal, y también como parte de estudios ambientales y geotécnicos (*Schlumberger, 1989*).

Los registros de pozo se pueden dividir en:

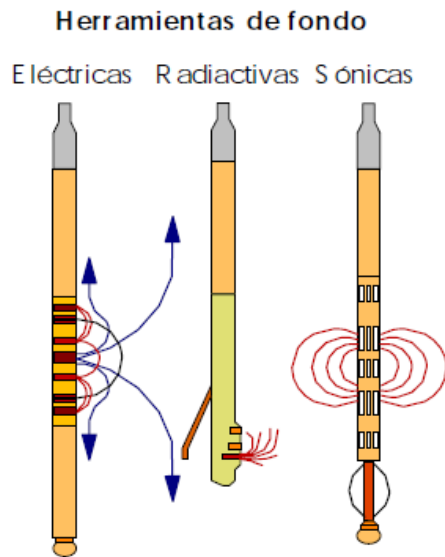
1.2.1 Registros Eléctricos

Este primer grupo de registros se caracteriza por basarse en el uso de pulsos de electricidad y en la medición de la interacción de esta misma con cierto contenido de la roca, usualmente el agua.

1.2.1.1 Potencial Espontaneo (SP)

La curva de potencial espontaneo (SP, *Spontaneous Potential*) corresponde a un registro de fenómenos naturales físicos presentes en rocas *in-situ*. La curva SP registra el potencial eléctrico (voltaje) producido por la interacción de agua connata de formación con el fluido de perforación conductivo y algunas rocas selectivas de iones (como lo es el shale) (*Schlumberger, 1989*).

Figura 10. Herramientas para la realización de los tres tipos principales de registros.



Fuente: Tomado de Schlumberger (1989).

Estos son usualmente registrados en conjunto con otro registro que puede ser un registro resistivo o un registro de porosidad. De hecho, casi todos los registros incluyen ahora una curva de SP y/o un registro *gamma ray* (*Illidge, 2008*).

Aunque estos registros son relativamente simples en concepto, la curva SP y el registro GR son bastante útiles e informativos. Entre sus principales usos están los siguientes (*Schlumberger, 1989*):

- Diferenciar reservorios de roca potencialmente porosos (como lo son la mayoría de las areniscas y de las calizas) de otros menos permeables (como arcillas o shales).
- Definir el límite entre capas y de este modo correlacionarlas.
- Dar una indicación cualitativa de capas arcillosas (para ayudar a identificar litologías).
- Permitir la determinación de la resistividad del agua de formación.

1.2.1.2 Resistivo

La resistividad de la formación es un parámetro clave para determinar la saturación de hidrocarburos. La electricidad puede pasar a través de una formación debido al agua conductiva en su contenido. Con muy pocas excepciones, como el sulfuro metálico y el grafito, la roca seca es un buen aislante eléctrico (rocas perfectamente secas rara vez se encuentran). Por lo tanto, las formaciones subterráneas tienen resistividades medibles y finitas debido al agua dentro de sus poros o al agua intersticial absorbida por la mayoría de arcillas. Este tipo de registros permite actualizar de manera continua las características eléctricas de las formaciones, con respecto a su profundidad a medida que se realiza la perforación. La resistividad de una formación depende de (Acevedo, 2012):

- La resistividad del agua de formación.
- La cantidad de agua presente.
- La geometría estructural de los poros.

El registro consiste de un dispositivo con electrodos que miden las diferencias de voltaje que se crean cuando una corriente emitida fluye hacia la formación alrededor del pozo (puede ser de varios tamaños y arreglos). Para que haya una circulación de corriente entre electrodos y formación, la sonda debe ser corrida en

lodos que contengan lodo o agua conductores de electricidad. Las rocas compactas e impermeables (tales como la anhidrita, sal, formaciones calcáreas densas y ciertas clases de carbón) son totalmente resistivas debido al bajo contenido de agua intersticial. Entre tanto, las rocas porosas permeables, tales como las arenas, presentan resistividades con variaciones de magnitud muy amplia, dependiendo del fluido que contengan. Las arenas pueden ser muy conductivas si el fluido es agua salada, o muy resistivas si la formación contiene grandes cantidades de petróleo o gas (Illidge, 2008).

1.2.2 Registros Radioactivos

Así como los registros eléctricos se basan en la electricidad, los registros radiactivos se basan en ondas transmitidas y reflejadas, según sea el caso. Su manejo debe ser cuidadoso por su naturaleza radiactiva y su delicadeza, su representante más conocido es el *gamma ray*, seguido por las variaciones del mismo.

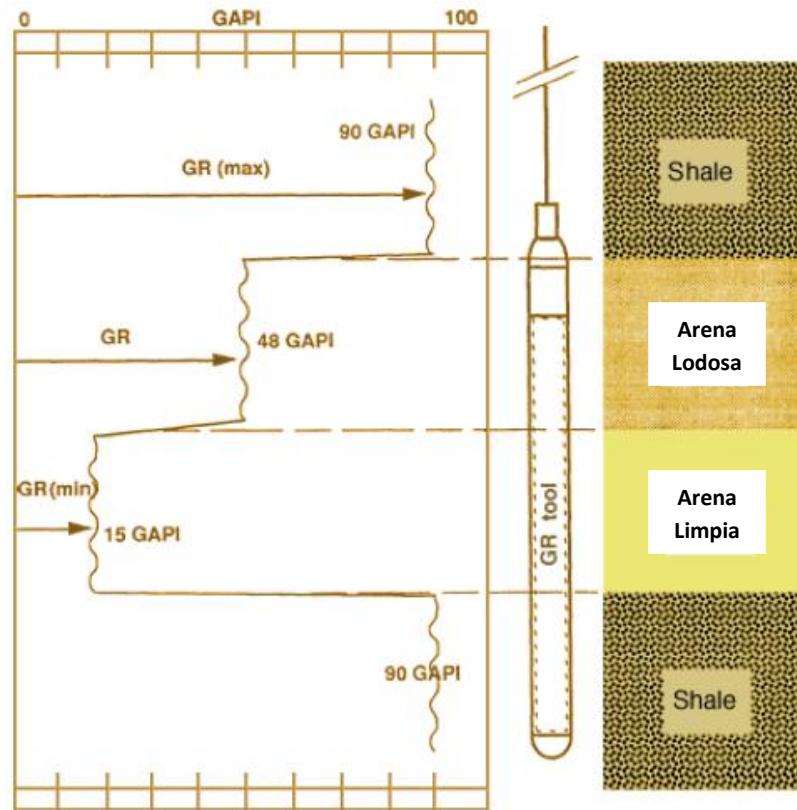
1.2.2.1 Gamma Ray (GR)

El registro de *gamma ray* (GR) corresponde a otro registro de fenómenos naturales físicos presentes en rocas *in-situ*. El registro GR indica la radiactividad natural de las formaciones. En formaciones sedimentarias refleja el contenido de shale, debido a que los elementos radioactivos como potasio, torio y uranio tienden a concentrarse en arcillas (Figura 11). Las formaciones limpias usualmente tienen un muy bajo grado de radioactividad, a menos que fuentes radioactivas tales como cenizas volcánicas o las aguas contengan sales radioactivas o roca granítica disuelta (Schlumberger, 1989).

El registro *gamma ray* es frecuentemente usado para complementar el registro SP y como un sustituto para la curva SP en pozos perforados con lodos de alta

salinidad. En cada caso, es útil para la localización de capas de shales y capas no arcillosas, y más importante para realizar correlaciones (*Illidge, 2008*). Aunque estos registros son relativamente simples en concepto, la curva SP y el registro GR son bastante útiles e informativos. Entre sus principales usos están los siguientes (*Acevedo, 2012*):

Figura 11. Respuesta típica de un registro de GR.



Fuente: Tomado y traducido de Schlumberger (1989).

- Definir el límite entre capas y de este modo correlacionarlas.
- Da una indicación cualitativa de capas arcillosas.
- Ayudar a identificar litologías.
- Detectar y evaluar depósitos de minerales radioactivos.

1.2.2.2 Espectrometría (NGS)

Hay dos tipos de registros *gamma ray*. El primero, el registro *gamma ray* estándar, que mide únicamente la radioactividad total. El otro, el NGS (*Natural Gamma-ray Spectrometry*), que mide el total de radioactividad y las concentraciones de potasio, torio y uranio que contribuyen a generar la radioactividad. Sus dos funciones principales son (*Schlumberger, 1989*):

- Detectar y tasar depósitos de minerales radioactivos de todo tipo.
- Definir las concentraciones de potasio, torio y uranio.

1.2.3 Registros de Porosidad

Existen tres (3) tipos de registros cuya función es la determinación de la porosidad, sea de manera individual o trabajando en conjunto. Estos registros miden la densidad de los electrones en la formación, sea a través de ondas, fuentes radiactivas o radiación inducida. En rocas de baja densidad la porosidad es alta (cuando la densidad se incrementa, la porosidad disminuye), el tiempo de tránsito de los sonidos también varía de acuerdo a lo consolidado de la roca. En conjunto se puede llegar a determinar el tipo de litología, la aparición de gas y los límites entre capas individuales.

1.2.3.1 Densidad

Este registro mide la densidad aparente de la formación y la relaciona con la porosidad. Una fuente radioactiva emite radiación gamma hacia la roca, la cual interactúa con los electrones de la formación (efecto Compton), haciendo que los rayos se dispersen. La formación cede energía a los átomos dejándolos en estado excitado y los rayos reflejados detectados son tomados como una medida de la densidad de la formación (*Acevedo, 2012*).

Se utiliza principalmente como perfil de porosidad y como facilitador para el cálculo de la presión de sobrecarga de una formación. La medición de la densidad de la formación tiene también aplicación en la identificación de minerales y gas, la determinación de la densidad de los hidrocarburos y la evaluación de litologías complejas (como las arenas arcillosas). Errores en la interpretación en las presiones estimadas mediante este método se deben a la influencia de shales calcáreos, limolíticos o arenosos (*Schlumberger, 1989*).

1.2.3.2 Neutrón

Los registros neutrónicos se utilizan principalmente para evaluar formaciones porosas y determinar su porosidad. Responden principalmente a la cantidad de hidrogeno en la formación (en formaciones limpias cuyos poros estén saturados con agua o aceite, este registro reflejara el volumen de poros saturados de fluido) (*Schlumberger, 1989*).

Las zonas de gas con frecuencia pueden identificarse al comparar el registro de neutrones con otro registro de porosidad o con un análisis de muestras. Una combinación del registro de neutrones con uno o más registros de porosidad proporciona valores de porosidad e identificación de litología aún más exactos, incluso una evaluación del contenido de arcilla (*Illidge, 2008*).

Los neutrones son partículas eléctricamente neutras; cada una tiene una masa casi idéntica a la masa de un átomo de hidrogeno. Una fuente radioactiva en la sonda emite constantemente neutrones de alta energía, que chocan con los núcleos de los materiales de la formación en lo que podría considerarse como colisiones elásticas. Con cada colisión, el neutrón pierde algo de su energía (la cantidad de energía perdida por colisión depende de la masa relativa del núcleo con el que choca el neutrón). La mayor pérdida de energía ocurre cuando el neutrón golpea un núcleo con una masa prácticamente igual, es decir un núcleo

de hidrogeno, por lo tanto, la desaceleración de neutrones depende en gran parte de la cantidad de hidrogeno de la formación (Acevedo, 2012).

1.2.3.3 Sónico

Una herramienta sónica consiste en un transmisor que emite impulsos y un receptor que los capta y registra. El registro sónico es simplemente un registro en función del tiempo (de tránsito, inverso de la velocidad de la onda sonora) que requiere una onda sonora para atravesar una formación. El tiempo de tránsito para una formación determinada depende de su litología y su porosidad. Cuando se conoce la litología, esta dependencia de la porosidad hace que el registro sónico sea muy útil como registro de porosidad. Los tiempos de transito sónicos integrados también son útiles al interpretar registros sísmicos (Illidge, 2008).

La propagación del sonido en un pozo es un fenómeno complejo que está regido por las propiedades mecánicas de ambientes acústicos diferentes. El sonido emitido del transmisor choca contra las paredes del hueco, estableciendo ondas de compresión y de cizallamiento dentro de la formación, ondas de superficie a lo largo de la pared del hueco y ondas dirigidas dentro de la columna de fluido. En el caso de registros de pozos, la pared y rugosidad del hueco, las capas de la formación, y las fracturas pueden representar discontinuidades acústicas significativas. Por lo tanto, los fenómenos de refracción, reflexión y conversión de ondas dan lugar a la presencia de muchas ondas acústicas en el hueco cuando se está corriendo un registro sónico. Teniendo en cuenta estas consideraciones, no es sorprendente que muchas llegadas de energía acústica sean captadas por los receptores de una herramienta de registro sónico (Schlumberger, 1989).

Con la ayuda del registro sónico se pueden obtener los siguientes parámetros:

- Presión de Poro.

- Sísmica de tiempo contra profundidad.
- Detección de gas.
- Detección de fallas/fracturas.
- Propiedades mecánicas de las rocas.

El registro sónico presenta ciertas desventajas, como lo son su incapacidad de medir velocidades menores que la velocidad del fluido de perforación, generalmente se corre solo en zona productora, es afectado por el estado del pozo, daños a la formación y solo mide pequeñas distancias a frecuencias ultrasónicas no comparables con la sísmica (Acevedo, 2012).

1.2.4 Otros Registros

Existen otras herramientas de medición mediante registros que no encajan en una categoría tan general como la de los eléctricos, los radiactivos o los de densidad. Estos registros sirven para determinar las dimensiones del hueco, sus características físicas externas y su inclinación y dirección.

1.2.4.1 Caliper

El registro *Caliper* es una herramienta para medir el diámetro y la geometría del pozo. Esta herramienta tiene entre dos (2) y ocho (8) brazos extensibles. Los brazos pueden desplegarse de adentro hacia afuera cuando la herramienta es retirada del hueco, y el movimiento es convertido en una señal eléctrica a través de un potenciómetro. El diámetro del hueco es mostrado junto con el tamaño de la broca como referencia (diámetros de hueco mayores y menores al tamaño de la broca se pueden presentar). En huecos ovalados, los brazos del *Caliper* se encajaran en el eje mayor de la sección ovalada, dando valores mayores de los que se esperaban para diámetros de pozo. En este caso las herramientas con mayor cantidad de brazos son las que se requieren (Schlumberger, 1989).

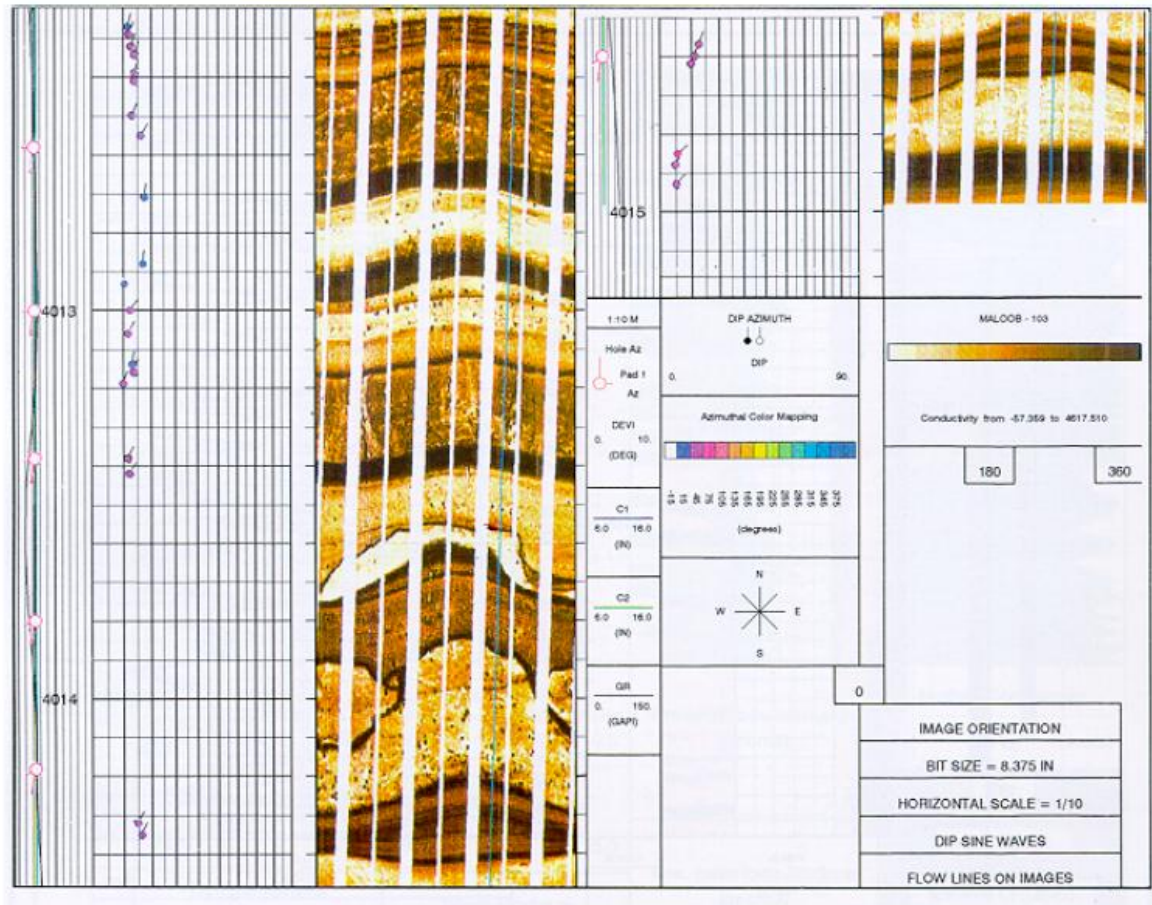
En las herramientas de múltiples brazos, hasta 30 brazos son agrupados alrededor de la herramienta permitiendo obtener una geometría del pozo muy detallada. Algunas de las otras herramientas mencionadas previamente tienen *calipers* unidos a los dispositivos de medición de registros por defecto. Por ello, la información obtenida por *calipers* puede ser obtenida a partir de estas herramientas (Illidge, 2008).

1.2.4.2 Imagen

Los registros de imagen son una reinterpretación de registros resistivos y sínicos previamente efectuados. Mediante el procesamiento de los datos obtenidos puede crearse una imagen en dos dimensiones de la pared del pozo que refleja características físicas de carácter geométrico que a su vez sirven como evidencia de la influencia de numerosas variables sobre las paredes del pozo (Figura 12). Entre estas variables encontramos los esfuerzos horizontales, el diámetro o diámetros del hueco, la orientación de fracturas y *breakouts* y los límites entre algunas capas litológicas (Schlumberger, 1989).

Los registros de imagen son algo escasos debido a lo complicado de su obtención, aunque resultan valiosos como evidencia de respaldo al momento de caracterizar un yacimiento (Acevedo, 2012). La mayoría de los registros de imagen están reservados para su uso en la determinación de los azimut de esfuerzos en los campos petrolíferos.

Figura 12. Registro de imagen.



Fuente: Tomado de Schlumberger (1989).

1.2.4.3 Dipmeter

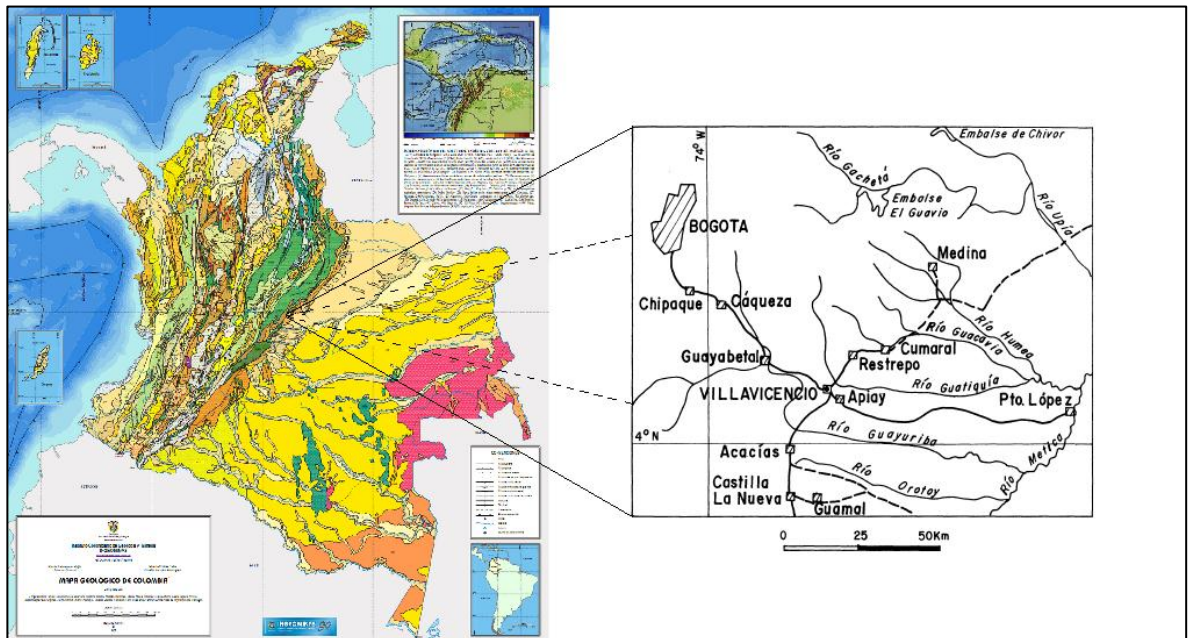
El *dipmeter* es un dispositivo que hace las funciones de “brújula” para la trayectoria de un pozo. Se trata de un artefacto que se calibra con el polo norte magnético y que mide el azimut del pozo con fines de perforación direccional. Además, el *dipmeter* tiene en cuenta los revestimientos y su inclinación con respecto a la horizontal, así como datos de medición de esfuerzos (obtenidos por otros métodos) y pesos de lodo (previamente definidos) (Schlumberger, 1989).

En la práctica, el *dipmeter* es un accesorio que al igual que el *caliper*, resulta más en un complemento del registro eléctrico, radiactivo o de porosidad a realizar, que en un registro único como tal. Por ello, las sartas de instrumentos de registro suelen incluirlo por defecto como una base para modelamiento y predicción de comportamiento de pozo (*Illidge, 2008*).

2. CAMPO APIAY

El campo Apiay (Figura 14) es un grupo de cuarenta y cinco (45) pozos petrolíferos (treinta y dos (32) de los cuales permanecen activos) que hace parte del homónimo Bloque Apiay, conformado en su totalidad por cuatro campos petrolíferos distintos: Guatiquía y Gaván al norte, Apiay en el centro y Suria al sur.

Figura 13. Ubicación de la subcuenca de Apiay-Ariari.



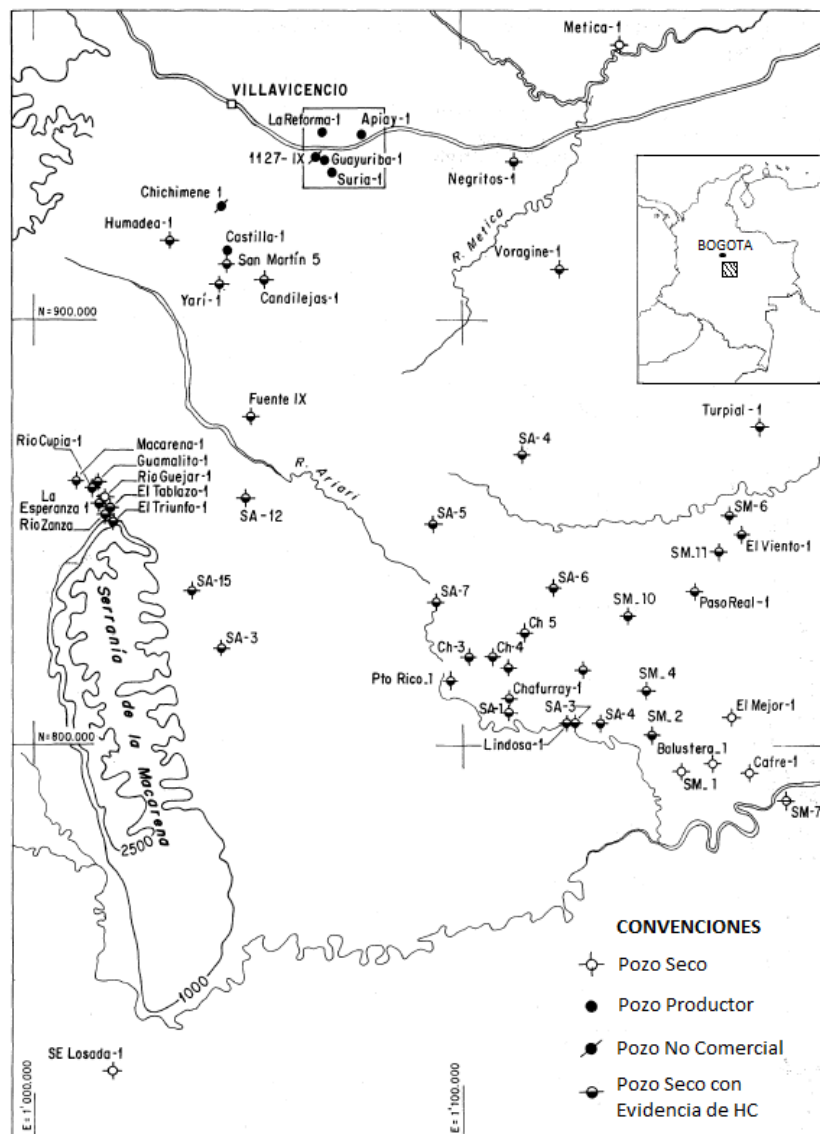
Fuente: Modificado de Pérez et al. (1985) en base al Mapa Geológico de Colombia (Ingeominas, 2006).

En los años ochenta (80) del siglo XX se propuso la perforación del primer pozo de este campo, el Apiay-1, cuya realización se llevó a cabo en diciembre de 1981 (Castro & Puerto, 1985). Su producción inicial fue de mil setecientos barriles diarios de petróleo (1700 BOPD, *Barrels of Oil Per Day*) provenientes de la unidad K2. El promedio de producción de hidrocarburo diario y la producción acumulada histórica del campo Apiay en el mes de Enero del año 2010 fueron de seis mil

trescientos setenta y seis barriles diarios de petróleo (6376 BOPD) y de setenta y siete millones de barriles de petróleo (77 Mbls, *Millions of barrels*), respectivamente (Salamanca, 2010).

2.1 LOCALIZACIÓN

Figura 14. Ubicación del campo Apiay.



Fuente: Traducido y modificado de Pérez (1985).

El Bloque Apiay tiene un área de doscientos cuarenta kilómetros cuadrados (240 km²) y está ubicado a aproximadamente cuarenta kilómetros (40 km) al Oriente de la ciudad de Villavicencio, al norte de la subcuenca de Apiay-Ariari (*Figura 13*). El área de la subcuenca es de cerca de treinta mil kilómetros cuadrados (30000 km²), lo que la convierte en una de las provincias petrolíferas más ricas y representativas de este sector del país, al suroccidente de la cuenca de los Llanos Orientales, en el departamento del Meta. (*Pérez & Bolívar, 1985*).

2.2 ANTECEDENTES

Los estudios geológicos realizados a la zona se han hecho en base a herramientas como la fotogeología, la magnetometría y la gravimetría, mediante el aporte de datos para la evaluación estructural. Sin embargo, es la sísmica la que ha revelado la mayor cantidad de información en forma de características del subsuelo, que posteriormente son correlacionadas entre sí y con la columna estratigráfica determinada por las perforaciones de pozos (*Pérez, 1985*).

Entre los autores más destacados de artículos científicos y trabajos geológicos sobre el campo Apiay se encuentran Pérez y Bolívar (1985), Castro y Puerto (1985) y Pérez (1985), quienes sentaron las bases de la geología en la subcuenca de Apiay-Ariari y mas específicamente en el campo Apiay; Reyes et al. (1992), Gutiérrez et al. (1996), Last et al. (1997), Malagón (1997) y Trindade (1997), quienes se enfocaron en la evolución y el desarrollo geomecánico de los pozos del campo; y Calderón (2006), Rodríguez (2008), Salamanca (2010), Araujo et al. (2010) y Fernández et al. (2010), quienes aportaron al modelamiento de la zona mediante diversos medios tecnológicos (software y herramientas de pozo), así como a mantener al día los avances en la caracterización geológica del sector.

2.3 GEOLOGIA

2.3.1 Geomorfología

Se trata de una región plana, entre los ciento cincuenta y cuatrocientos metros sobre el nivel del mar (150 y 400 msnm) (*Pérez & Bolívar, 1985*), cuyas unidades litológicas se encuentran en el subsuelo, bajo amplias y extensas terrazas cuaternarias (*Ingeominas, 2006*).

Según la Resolución No. 1612 del 9 de agosto de 2011 (*Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Pagina 14*), en el campo Apiay “la planicie aluvial es la unidad geomorfológica predominante, la pendiente del terreno es baja y está constituida principalmente por sedimentos del Cuaternario, hay otras unidades de origen aluvial asociadas con la dinámica de los cuerpos de agua de la zona, los cuales presentan patrones de drenaje trenzados y meándricos, característicos de un ambiente deposicional”. Así mismo, “los procesos geodinámicos están asociados con los sitios de escarpes estructurales y con las áreas puntuales de montaña... donde se ha presentado desprendimiento de bloques de areniscas de gran tamaño que alcanzan el orden de metros, pero presentan poco grado de transporte. En general los ríos presentan patrones de drenaje trenzado y su cauce divaga en el espacio y en el tiempo, conformando depósitos de grava en su camino”.

A nivel regional se diferencian dos tipos de paisaje, el primero caracterizado por una topografía plana a ondulada, determinada por la presencia de depósitos recientes. El segundo corresponde a unidades de piedemonte sobre sedimentos del Paleógeno y del Cretácico, donde predominan los procesos modeladores de carácter tectónico y degradacional. En el modelado del relieve han influido procesos endógenos (plegamientos como resultado de un régimen compresional de esfuerzos producto de la Orogenia Andina en el Mioceno (*Flórez, 2003*)) que

originaron el levantamiento de colinas (caracterizadas por terrazas disectadas debidas al transporte de sedimento), y procesos exógenos que produjeron la erosión intensa de rocas y terrazas, formando un paisaje caracterizado por colinas bajas, llanura aluvial anegable en época de lluvias y valles que separan las colinas (Fajardo, 2010).

2.3.2 Estratigrafía

Tabla 1. Nomenclatura del campo Apiay.

EDAD		UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS		UNIDADES OPERACIONALES	
Paleógeno	Eoceno Superior	Formación Carbonera		Shale E3	
				Unidad T1	Ciclo Superior T1-1
					Ciclo Medio T1-2
					Ciclo Basal T1-3
Shale E4					
Unidad T2					
Cretácico Superior	Campaniano - Maastrichtiano	Formación Guadalupe	Formación Chipaque	Unidad K1	Ciclo Superior K1-1
					Ciclo Medio K1-2
					Ciclo Basal K1-3
Formación Une		Unidad K2			
Cámbrico	Ordovícico	Paleozoico		Sedimentario (Metasedimentos)	
Precámbrico		Basamento		Metamórfico	
				Cristalino	

Fuente: Adaptado y actualizado de Castro & Puerto (1985).

El campo Apiay comprende un registro geológico que va desde el Precámbrico hasta el Neógeno (Tabla 1). Las rocas de interés suelen ser areniscas datadas del Cretácico Superior o del Eoceno Superior. (Pérez & Bolívar, 1985).

El basamento de la zona está conformado por sedimentos (calizas dolomitizadas, shales, conglomerados, arcillolitas y areniscas arcósicas), rocas ígneas (lavas almohadilladas, intrusiones diabásicas, granitos) y metamórficas (esquistos) originados en el Precámbrico. Las rocas ígneas y metamórficas del basamento afloran en su mayoría en los costados oriental y occidental de la cuenca (*Malagón, 1997*).

La secuencia perteneciente al Paleozoico está constituida por rocas sedimentarias y metasedimentarias que suprayacen discordantemente sobre el basamento cristalino del Precámbrico (*Salamanca, 2010*), perteneciente al Cratón Amazónico (*Tassinari et al., 1996*).

Se han reconocido dos secuencias para los sedimentos del Paleozoico temprano: Una inferior (constituida por intercalaciones de rocas metasedimentarias de bajo grado, flujos volcánicos y calizas dolomíticas de edad Cambro-Ordovícica) y una superior (compuesta por lutitas oscuras intercaladas con areniscas y limolitas del Ordovícico) (*Pérez & Bolívar, 1985*).

Para realizar la caracterización estratigráfica de la zona vale la pena aclarar que algunos autores (*Castro & Puerto, Pérez & Bolívar*) se refieren a las formaciones Une y Chipaque como una sola, denominada Formación Guadalupe. Para la descripción litológica realizada en este trabajo se consideró individualmente a Une y a Chipaque con el fin de ofrecer un análisis geológico más detallado, tal y como es tendencia en trabajos recientes (*Araujo et al., Calderón*).

La subdivisión de la sección Cretácea en el bloque Apiay, se ha hecho en base a cambios litológicos, características eléctricas y tipo de fluidos (*Pérez & Bolívar, 1985*). La secuencia Mesozoica corresponde a sedimentos del Cretácico Superior que suprayacen discordantemente el conjunto de rocas paleozoicas (*Salamanca, 2010*), como se aprecia en la *Figura 15*:

- La Formación Une (K2) está constituida por areniscas cuarzosas y cuarzo feldespáticas de grano medio a grueso, localmente conglomeráticas, intercaladas con delgados niveles de limolitas y arcillolitas carbonosas. Su espesor promedio es de unos setecientos sesenta pies (760 ft). Su contacto superior es transicional y su contacto inferior es discordante, bajo este existe un hiato temporal de doscientos millones de años (200 Ma).
- La Formación Chipaque (F5) está conformada por areniscas de grano fino a medio con abundantes intercalaciones arcillosas y limosas. Su espesor es de quinientos sesenta pies (560 ft) aproximadamente. Su contacto con la unidad suprayacente es discordante.

Existe un hiato deposicional en la base del Paleógeno en la subcuenca de Apiay-Ariari de más de veinte millones de años (20 Ma), por lo cual la base de la sedimentación del Paleógeno es discordante con los sedimentos del Cretácico Superior (*Figura 15*). La secuencia del Paleógeno localmente está conformada por cuatro (4) formaciones distintas (*Salamanca, 2010*):

- La Formación Mirador (T2), dividida en dos unidades más pequeñas: Una inferior (compuesta por areniscas y conglomerados cuarzosos con baja proporción de shale) y una superior (compuesta por areniscas cuarzosas de grano medio e intercalaciones de lutita y limolita que se tornan predominantes hacia el tope). El espesor de T2 alcanza los ciento cuarenta pies (140 ft) en el campo Apiay y reposa discordantemente sobre Chipaque e infrayace a las lutitas E4 de la Formación Carbonera. A nivel del Piedemonte Llanero T2 tiene un espesor pequeño que solía ser considerado como la base de la Formación Carbonera en los trabajos realizados en la zona a finales del Siglo XX, como lo son los de Pérez y Bolívar (1985), Castro y Puerto (1985) y Reyes et al. (1992).

mil setecientos veinticuatro pies (5724 ft) de espesor), siendo de base a techo: La lutita E4 (shale gris oscuro y masivo), la arenisca T1 (arenolosa dependiendo de la zona, gasífera en Apiay), la lutita E3 (shale gris oscuro intercalado con arenisca de grano fino), el conjunto C2, las Areniscas Inferiores de Carbonera, el conjunto C1, la lutita E y las Areniscas Superiores de Carbonera.

- La Formación León se presenta en una serie de lutitas verdosas en contacto discordante con la Formación Carbonera. Se trata de una secuencia de arcillas y lutitas con intercalaciones de areniscas carbonáceas mucho más delgadas.
- La Formación Guayabo está constituida por una secuencia de areniscas estratificadas de grano fino a grueso, arcillas y una serie de lutitas, con un espesor de entre mil trescientos y tres mil trescientos pies (1300 – 3300 ft).

En cuanto a ambientes de sedimentación, para el campo Apiay se han interpretado transgresiones y regresiones sucesivas, que depositaron las unidades K2, K1 y T2. Durante la deposición de las unidades K2 y K1 existieron ambientes litorales y transicionales (K2 fue depositada en ambientes de frente de playa y de playa). La Unidad T2 se depositó en ambientes transicionales. El Cretácico superior representa un ciclo regresivo en un ambiente marino costero, cuyas facies litorales están representadas en K2 y las de planicie de mareas en K1 (*Castro & Puerto, 1985*).

2.3.3 Estilo Estructural

El Bloque Apiay está comprendido entre las fallas inversas de La Libertad (al oeste) y Apiay (al este, de carácter inverso, alto ángulo (entre 45° y 55°) y cortando desde el Paleógeno hasta el basamento) (*Ingeominas, 2007*) y su

estructura corresponde a un extenso y amplio anticlinal asimétrico fallado en su flanco Sureste, conformado a su vez por domos y sistemas anticlinal/sinclinal más pequeños, afectados por fallamiento inverso y normal (*Pérez & Bolívar, 1985*). Esta configuración estructural es la que otorga en gran parte las propiedades de campo petrolífero al sector, además de la influencia más local de controles estructurales (*Castro & Puerto, 1985*) como plegamientos y fallas de poca extensión.

La dirección del eje del anticlinal es aproximadamente N30°E, con cabeceo al Noreste (NE), de 6 km de longitud y 1.6 km de ancho (*Malagón, 1997*).

La zona comprendida entre las fallas inversas antes mencionadas, muestra evidencia de un cierto desplazamiento hacia el Norte o una rotación en sentido de las manecillas del reloj, debida probablemente a la acción de una componente de rumbo en la falla de Villavicencio (*Pérez & Bolívar, 1984*). En el bloque Apiay se han detectado los siguientes tipos de fallamiento (*Pérez & Bolívar, 1985*):

- Fallas Normales e Inversas Preordovícicas (las segundas es mucha menor proporción) que afectan las rocas del basamento y tienen dirección N-NE.
- Fallas Inversas que afectan rocas cretáceo-paleógenas, de rumbo NE y buzamiento al W. A este sistema corresponde la zona de fallamiento de Apiay-Castilla.
- Fallas Normales con dirección NE y pendientes al W, que afectan rocas del neógeno y llegan hasta muy cerca a la superficie.

Estos dos últimos eventos de fallamiento favorecieron el atrapamiento de hidrocarburos en las formaciones almacenadoras. En general, los yacimientos son de tipo estructural o combinado (*Pérez & Bolívar, 1985*), este último debido a

cambios bruscos de facies en sentido lateral, que ejercen un control estratigráfico de acumulación (tal es el caso de F3G) (Castro & Puerto, 1985).

2.3.4 Geoquímica

A pesar de lo singular de las características presentes en la zona de estudio y determinadas a partir de numerosos estudios científicos del orden físico, químico y geológico, el origen de los hidrocarburos encontrados en el subsuelo de la Cuenca de los Llanos Orientales es aún un enigma por resolver. No se ha establecido todavía una correlación precisa entre el hidrocarburo (desde extrapesado, pasando por mediano, liviano, condensado y finalmente gas) y la roca fuente, pero se sabe que hay Kerógeno del Tipo I en el campo Apiay, tanto en K1 (Formación Chipaque) como en K2 (Formación Une), además de manifestaciones de Kerógeno tipo II, III y IV (ver *Tabla 2*) en E4 (sección de la Formación Carbonera) (Pérez & Bolívar, 1985).

Tabla 2. Tipos de Kerógeno.

CARACTER DE LA MANIFESTACION	SIGNIFICADO		
	Tipo	Producción	Exploración
Fase Continua	I	Comercial o no comercial	Acumulación de Hidrocarburos
Residual	II	NO HAY PRODUCCION	Migración
Disuelta	III		Hidrocarburos en el sistema
Kerógeno	IV		Generación de Hidrocarburos

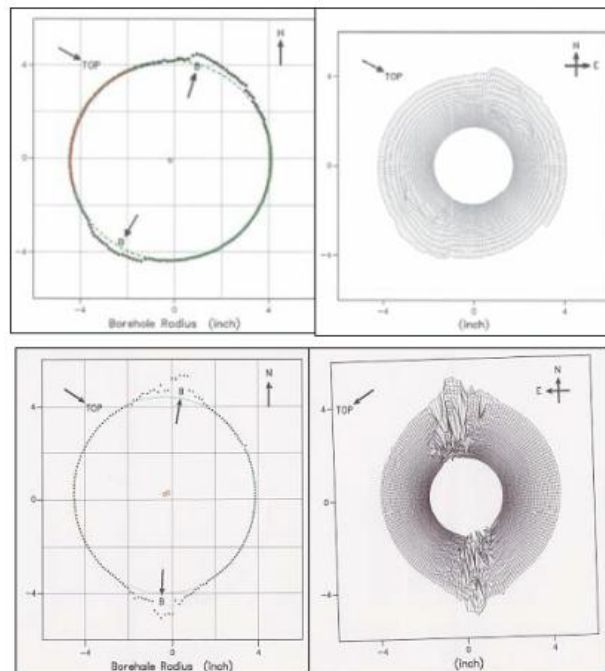
Fuente: Tomado de Pérez & Bolívar (1985) en base a Schowalter y Hess (1982).

Las rocas sello para las unidades K1 y K2 son las intercalaciones de arcillolitas y lutitas de la unidad K1, además de algunos cambios laterales de facies. Para la unidad T2, las rocas sello son las lutitas de la unidad E4 de la Formación Carbonera.

3. REGIMENES DE ESFUERZOS

Las formaciones de roca en el subsuelo se encuentran bajo la acción de esfuerzos compresivos y/o de tensión. Estos esfuerzos se denominan con el apelativo de “*in-situ*” y generalmente pueden ser descompuestos en tres componentes, una vertical y dos horizontales (una máxima y una mínima generalmente, aunque teóricamente pueden ser iguales). Las componentes se caracterizan por ser perpendiculares entre sí (García, 2006).

Figura 16. *Breakouts* de pozo. El esfuerzo horizontal máximo es perpendicular a la aparición de estos.



Fuente: Tomado de Torres & González (2003).

El esfuerzo vertical máximo no se puede medir directamente (la magnitud de este es la componente del tensor de esfuerzos más difícil de determinar (Fernández & Alvarellós, 2011)) pero se puede lograr una estimación del mismo con una integral

del registro de densidad, mediante modelos matemáticos (como el polígono de esfuerzos (Moos & Zoback, 1990)), usando correlaciones como la de deformación poro-elástica o aproximándolo a partir de los esfuerzos horizontales mínimos medidos (Nordgard et al., 2005). El esfuerzo horizontal mínimo puede estimarse usando fracturamiento o datos del test de *Leak-off* (este tipo de prueba es comúnmente utilizado durante las operaciones de perforación para estimar el máximo peso de lodo que se puede utilizar para perforar la siguiente sección (Fernández & Alvarellós, 2011)). Finalmente, la dirección de los esfuerzos se estima a partir del registro de *caliper* o por análisis de registros de imágenes (Nordgard et al., 2005).

Al tomar en cuenta el campo de esfuerzos alrededor de un hueco orientado arbitrariamente, se muestra que en un régimen de esfuerzos de tensión los pozos paralelos a la dirección del esfuerzo principal horizontal mínimo son los menos propensos a fallas de cizalla compresivas (*breakouts*, Figura 16). El ángulo de desviación más estable (desde la vertical) depende de la relación del radio de los esfuerzos horizontales principales con respecto a los esfuerzos verticales. A mayor radio, mayor el ángulo de desviación para minimizar los *breakouts*. En régimen transcurrente, los pozos horizontales son los menos propensos a los *breakouts* (Zhou et al., 1996). El estado de esfuerzos *in-situ* refleja generalmente la densidad de las formaciones, la historia de los movimientos tectónicos y los esfuerzos residuales y termales en la región. El campo de esfuerzos *in-situ* raramente cumple con las características de uno hidrostático o litostático. En el sentido físico, los esfuerzos pueden tener un efecto benéfico si tienen la magnitud suficiente para confinar la masa de roca y promover la estabilidad. Sin embargo, si las magnitudes del esfuerzo son demasiado bajas, este efecto confinante se reduce y puede causar inestabilidad. Por el contrario, si los esfuerzos son demasiado altos, puede ocurrir la fractura y falla de la masa de roca, causando inestabilidad (Bell & Babcock, 1986).

Para realizar una correlación entre las fallas, fracturas, el campo de esfuerzos y la tectónica regional se utilizan registros de pozo, interpretación de *breakouts*, interpretación de fracturas hidráulicas e interpretación de minifracturas. Extraer información cuantitativa de los esfuerzos de formación de la roca a partir de medidas de registro de pozo es fundamental para el análisis y predicción de problemas geomecánicos en la industria del petróleo. Se tienen como mínimo cuatro (4) parámetros para describir los esfuerzos *in-situ*: el esfuerzo vertical (S_V), el horizontal mínimo (S_{hmin}), el máximo horizontal (S_{Hmax}) y el azimut del esfuerzo horizontal mínimo (*Pistre et al., 2009*). El campo de esfuerzos en un punto determinado puede ser representado por tres (3) esfuerzos principales (*Jaeger and Cook, 1976*), que son identificados generalmente con la letra sigma (σ) y un número que indica su intensidad, siendo el uno (1) la intensidad mayor, el dos (2) la intermedia y el tres (3) la menor. En la notación de esfuerzos a partir de su orientación, el esfuerzo horizontal máximo (S_{Hmax}) puede asumir los números uno (1) o dos (2), al igual que el esfuerzo vertical (S_V). El esfuerzo horizontal mínimo (S_{hmin}) nunca asume el número uno (1), pero si puede asumir el dos (2) o el tres (3).

Es claro que los esfuerzos de la corteza terrestre en las profundidades de las cuencas sedimentarias tienen un efecto profundo en la estabilidad de todo pozo. Los problemas de perforación ocurren debido a numerosas inestabilidades mecánicas en la pared del hueco donde la amplificación o disminución de los esfuerzos puede afectar la resistencia de la roca, esto porque la pared del hueco debe soportar el esfuerzo previamente soportado por el material removido en el proceso de perforación. El estado de los esfuerzos en cualquier punto de la corteza terrestre es resultado de fenómenos como la presión de soterramiento (creadora de esfuerzos verticales y horizontales), los movimientos de la corteza terrestre (creadores de esfuerzos horizontales y a veces verticales), la presencia de fluidos intersticiales (cuya acción mecánica se opone a los esfuerzos litostáticos) y la naturaleza de la roca y la heterogeneidad de las capas (*Charlez &*

Despax, 1985). Se cree que existe una conexión directa entre los esfuerzos y la ocurrencia de hidrocarburos debido a que se ha reportado una relación entre el esfuerzo y las sobrepresiones en el fluido por un lado y entre estas últimas y la migración de hidrocarburos por el otro. Las relaciones detalladas entre el esfuerzo y la roca reservorio son poco conocidas, especialmente porque las regiones tectónicamente activas también son provincias petrolíferas prolíficas (*Nordgard et al., 2005*).

El conocimiento de la dirección y la magnitud de los esfuerzos *in-situ* es importante al momento de construir el modelo geomecánico. Se ha demostrado que los datos de imagen del pozo son los más valiosos para supervisar la orientación y las magnitudes de los esfuerzos *in-situ*. La aparición de los *breakouts* en el hueco y de las fracturas por tensión que se observan en estas imágenes ayuda a calcular algunos de los esfuerzos horizontales en base la resistencia de la roca (*Adlan & Samadya, 2011*). Se ha progresado mucho en la determinación de la magnitud y la orientación de los esfuerzos *in-situ* en la corteza, en particular, por el análisis de los *breakout* del hueco y las técnicas de fractura hidráulica. Con conocimiento del campo de esfuerzos *in-situ*, se puede diseñar la trayectoria inclinada más estable (*Bell & Babcock, 1986*). Es importante aclarar que, previo a cualquier tipo de perforación, las rocas del subsuelo se encuentran en un estado de equilibrio. Pero una vez inicia la perforación, se presenta una perturbación en el estado de equilibrio y un nuevo grupo de esfuerzos es generado. Este nuevo grupo de esfuerzos es conocido como “esfuerzos de cara de pozo”, los cuales actúan sobre la formación y en la interface lodo-formación (*García, 2006*). Dependiendo de las magnitudes relativas de estos tres esfuerzos se han determinado varios regímenes de esfuerzos (*Anderson, 1951*).

3.1 REGIMEN NORMAL

Este régimen se caracteriza porque las magnitudes de los esfuerzos *in-situ* presentan una configuración dominada por el esfuerzo vertical sobre el horizontal máximo y el horizontal mínimo, respectivamente. Este régimen es el más conocido y encontrado. Se presenta por lo general en cuencas pasivas (García, 2006).

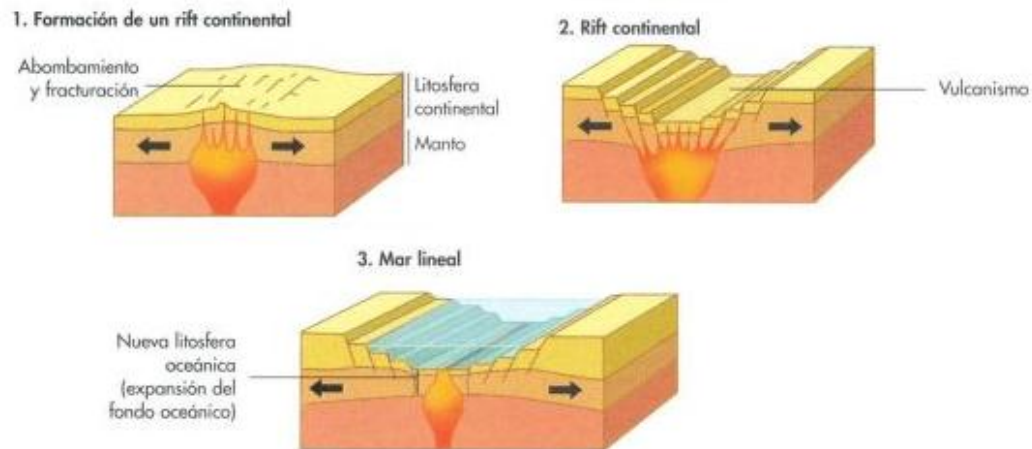
$$\sigma_V > \sigma_H > \sigma_h$$

$$S_V > S_{Hmax} > S_{hmin}$$

3.1.1 Configuración Tectónica

En el Ciclo de Wilson (Figura 17) se pueden apreciar regímenes de esfuerzo normales a lo largo de todo el proceso de evolución de la corteza terrestre. Sin embargo, es en las etapas iniciales en las cuales se puede apreciar a gran escala este tipo de regímenes, esto debido a la naturaleza extensional de las fases uno (1), dos (2) y tres (3) del ciclo.

Figura 17. Fases iniciales del Ciclo de Wilson, esfuerzos distensivos.



Fuente: Tomado de Tarbuck & Lutgens (2005).

Aunque en las zonas de *rift* o generación de corteza se puede apreciar evidencia de comportamiento normal, inverso e incluso transcurrente (cada caso es distinto),

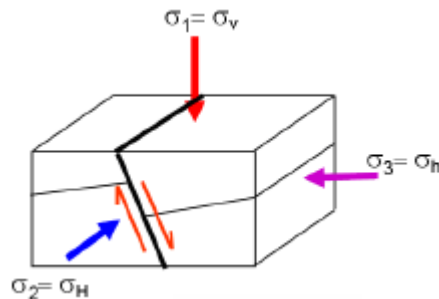
por lo general se establece que estas zonas se encuentran bajo un régimen normal de esfuerzos por la naturaleza distensiva de los fenómenos geológicos presentes en tales áreas (Tarbuck & Lutgens, 2005).

3.1.2 Fallamiento Normal

Una falla es una fractura en la roca a lo largo de la cual ha ocurrido desplazamiento. Una falla normal (Figura 18) es aquella en la cual el bloque colgante ha descendido con relación al bloque yacente. También se le llama falla gravitacional (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Las fallas normales se presentan debido a condiciones de esfuerzos distensivos que “separan” los bloques en un plano determinado. Se requiere de un esfuerzo menor para generar fallas normales si se lo compara con el necesario para generar una falla inversa.

Figura 18. Falla normal y régimen de esfuerzos correspondiente.



Fuente: Tomado de Pistre et al. (2009).

3.2 REGIMEN INVERSO

Este régimen se caracteriza por magnitudes de esfuerzos en las cuales el esfuerzo horizontal máximo está por encima del esfuerzo horizontal mínimo y del vertical, respectivamente (García, 2006).

$$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$$

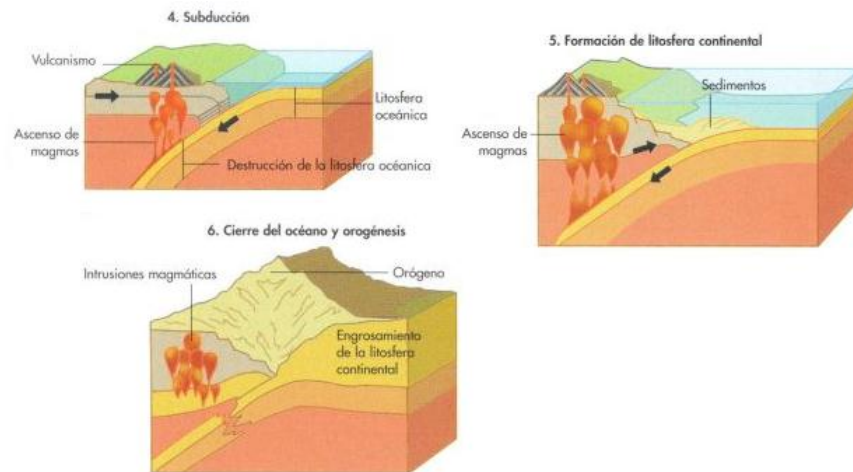
$$S_{Hmax} > S_{hmin} > S_{Hmax}$$

3.2.1 Configuración Tectónica

Una vez más, de acuerdo al Ciclo de Wilson, los regímenes de esfuerzo inversos aparecen a lo largo de la totalidad del proceso evolutivo de la corteza terrestre.

En este caso (*Figura 19*), son las etapas finales aquellas en las cuales se puede apreciar a escala continental e incluso planetaria este tipo de regímenes, por el comportamiento compresivo de las fases cuatro (4), cinco (5) y seis (6) del ciclo (*Tarbuck & Lutgens, 2005*).

Figura 19. Fases finales del Ciclo de Wilson, esfuerzos compresivos.



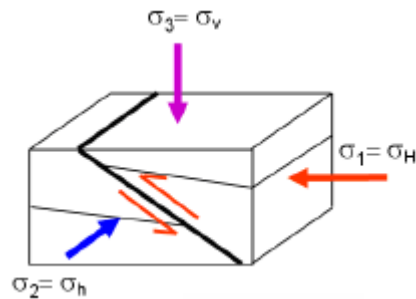
Fuente: Tomado de Tarbuck y Lutgens (2005).

3.2.2 Fallamiento Inverso

En una zona de falla, el bloque colgante es aquel que descansa por encima de un plano de falla inclinado (si el plano de falla es vertical, el termino no es aplicable). El bloque yacente es aquel que yace por debajo del mencionado plano (*Figura*

20). Una falla inversa es aquella en la cual el bloque colgante ha ascendido con relación al bloque yacente y que en ocasiones, cuando tiene un bajo ángulo de buzamiento, provoca un cabalgamiento (*Tarback & Lutgens, 2005*). Se requiere de un esfuerzo de gran magnitud para generar este tipo de fallas debido a la resistencia natural de las rocas a la compresión.

Figura 20. Falla inversa y régimen de esfuerzos correspondiente.



Fuente: Tomado de Pistre et al. (2009).

3.3 REGIMEN TRANSCURRENTE

Presenta una configuración de esfuerzos dada una vez más por el dominio del esfuerzo horizontal máximo, pero esta vez sobre el vertical y el horizontal mínimo, respectivamente. Este régimen es característico de gran parte del Piedemonte Llanero colombiano (*García, 2006*).

$$\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$$

$$S_{Hmax} > S_V > S_{hmin}$$

3.3.1 Configuración Tectónica

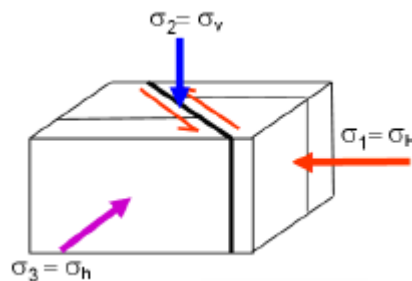
Para el régimen transcurrente y de acuerdo al Ciclo de Wilson, existe presencia de corrimientos de terreno con respecto a un rumbo en la totalidad del proceso

evolutivo de la corteza terrestre, tanto en las etapas iniciales como en las finales, pero sobre todo en condiciones de esfuerzos compresivos con una componente extra que otorga el comportamiento transcurrente o de rumbo en el desplazamiento de la roca (Nordgard et al., 2005).

3.3.2 Fallamiento de Rumbo

Un plano de falla es la superficie sobre la cual ha ocurrido el desplazamiento que caracteriza a las fallas y sirve para diferenciarlas de otros tipos de fracturas (como las diaclasas). En una falla de rumbo (Figura 21), el movimiento de los bloques a lo largo de la falla es horizontal. Dependiendo del movimiento de los bloques, la falla puede ser dextral o sinistral. El movimiento de una falla de rumbo es causado por esfuerzos de corte. A este tipo de falla también se le conoce como transcurrente, lateral, de desgarre o de llave. La falla de rumbo presenta desplazamiento en la dirección del buzamiento del plano de falla y generalmente es combinada, con una componente normal o inversa dependiendo del caso (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Figura 21. Falla de rumbo y régimen de esfuerzos correspondiente.



Fuente: Tomado de Pistre et al. (2009).

4. METODOLOGIA

Como primera instancia en la definición del procedimiento seguido para concretar el presente proyecto, se enumera a continuación la información recopilada para alcanzar el objetivo principal del mismo:

1. Propiedades mecánicas de la roca (UCS, cohesión, módulo de Young, relación de Poisson, resistencia a la tensión y ángulo de fricción interna).
2. Esfuerzos (vertical, horizontal máximo y horizontal mínimo).
3. Modelo de estabilidad (presión de colapso, presión de poro, peso de lodo y presión de fractura).
4. Eventos de perforación (puntos e intervalos apretados, *reaming* y *backreaming*, *cavings*, influjos, empaquetamientos, pegas de tubería y pérdidas de lodo).
5. *Surveys* (azimut e inclinación del pozo y cambios de trayectoria del hueco).
6. Registros de pozo (eléctricos, radiactivos y de porosidad).

La información de los numerales 1, 2 y 3 corresponde a los modelos E1 y E2 (para el caso de E2 solo se contó con dos propiedades mecánicas de la roca (la cohesión y el ángulo de fricción interna) y un modelo de estabilidad parcial (sin presión de fractura) complementado mediante el cálculo de la presión de colapso). La información del cuarto y quinto numeral fue recopilada, identificada y clasificada como información propia de cada pozo. Los registros recopilados del numeral 6 no fueron usados para el alcance del objetivo principal, pero se listan como parte del proceso de revisión y se analizan más adelante.

Los principios del método usado para la determinación de los regímenes de esfuerzos individuales que rigen en los pozos analizados del campo Apiay se basan en la validación del régimen de esfuerzos a partir de dos ventanas de

estabilidad (tomadas de estudios realizados por compañías del sector en años recientes) que, a su vez, deben reflejar los eventos observados durante la perforación de los pozos. Para llevar a cabo este proceso se utilizó el software *Drillworks® Predict 5000.8.0* de la empresa Halliburton.

Finalmente, se procedió a realizar una correlación de los eventos reportados durante las distintas fases de perforación de cada pozo: primero con el modelo E1 y posteriormente con el modelo E2. Con estos conjuntos de variables se eligió la ventana de estabilidad (y por consiguiente, la configuración de esfuerzos) que mejor se ajustase a la aparición de los distintos tipos de eventos en pozo que aplican en igualdad de condiciones en ambos casos.

4.1 IDENTIFICACION Y CLASIFICACION DE DATOS

De la totalidad de datos recopilados, identificados y clasificados, se extrajo información en distintos niveles. Las propiedades mecánicas de la roca y las curvas de la ventana del modelo de estabilidad E1 son las más completas, calibradas con medición directa. El modelo E2 contenía menos datos pero era igualmente válido para la realización de una validación de regímenes de esfuerzos, ya que las variables manejadas permitían el cálculo de la curva de presión de colapso que se usó en el procedimiento.

Los datos de los *surveys* se recopilaron directamente. Los eventos de perforación, por otra parte, se extrajeron de reportes de estabilidad de pozo, así como los pesos de lodo.

4.1.1 Registros de Pozo

Para la correcta caracterización de un pozo de extracción de hidrocarburos o gas existen unos parámetros mínimos a analizar con el fin de dar una interpretación geológica fiable de lo encontrado en profundidad. Para el caso de los registros de pozo, se debe tener como mínimo cinco (5) de estos:

- Un registro litológico (*Gamma Ray* o *Spontaneous Potential*).
- Tres registros de porosidad (Densidad, Sónico S y Sónico P).
- Un registro resistivo.

Para el presente proyecto, no se utilizaron estos registros ya que se buscó dar enfoque a la configuración de esfuerzos con los datos recopilados directamente. Sin embargo, estos registros se usan generalmente para calcular propiedades mecánicas calibradas con la ayuda de pruebas físicas para una mayor fiabilidad.

4.1.2 Propiedades Mecánicas de la Roca

Se manejó un total de seis de ellas (las mas básicas para un análisis general, se descartaron algunas como el módulo de Bulk o el factor fotoeléctrico por su complejidad o su relación directa con alguna de las propiedades trabajadas), en primer lugar para la evaluación de litologías y finalmente como evidencia para la determinación del esfuerzo horizontal máximo y, por consiguiente, del régimen de esfuerzos de cada pozo en particular.

4.1.2.1 Angulo de Fricción Interna

El AFI de una roca esta directamente ligado al porcentaje de la misma correspondiente a la porosidad (y por lo tanto, a cualquier registro que maneje esta variable). Por ello, se puede usar una ecuación empírica para su cálculo en

formaciones a profundidad a partir de registros de pozo (*Nimick, 1988*). La ecuación correspondiente es la siguiente:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{0.079 n^{-1.86}}{2 + 0.079 n^{-1.86}}$$

Donde φ equivale al ángulo de fricción interna (AFI) y n al porcentaje de porosidad presente en una roca a una profundidad determinada (el valor resultante se presenta en grados). Los valores constantes que se encuentran en la ecuación pueden variar de autor en autor y de zona en zona, pero la aproximación de cada constante se considera satisfactoria en la mayoría de los casos.

4.1.2.2 Unconfined Compressive Strength

Para el caso del UCS, la relación que permite calcularlo se basa en la velocidad de la onda P, a partir del registro sísmico:

$$UCS = 0.00069(V_p^{1.385})$$

Donde V_p es igual a la velocidad de la onda P en una roca determinada. Esta ecuación es un intento de correlación general para todo tipo de rocas (*Kelessidis, 2011*). Al igual que con el cálculo del AFI, las ecuaciones planteadas en la bibliografía varían de autor en autor y de zona en zona.

4.1.2.3 Cohesión

La cohesión de una roca está directamente relacionada al resultado de su UCS y su AFI. Por ello, la ecuación empírica planteada para calcular esta propiedad es (*Soroush, 2007*):

$$C_o = \frac{UCS(1 - \sin \varphi)}{2 \cos \varphi}$$

La cohesión corresponde al UCS por la relación entre el seno y el coseno del AFI.

4.1.2.4 Resistencia a la Tensión

La estimación más común de la resistencia a la tensión de una roca se hace a partir del resultado obtenido en su UCS, de la siguiente manera:

$$TS = \frac{UCS}{10}$$

Donde la resistencia a la tensión equivale a la décima parte del resultado de UCS. Esta ecuación es una aproximación bastante libre al valor buscado, pero es válida desde el punto de vista del análisis de litologías con diversos tamaños de grano (*Hudson, 2005*).

4.1.2.5 Relación de Poisson

Este valor que relaciona la deformación horizontal con respecto a la vertical se basa en el registro sísmico con énfasis en las ondas P y S. Se define como:

$$\gamma = \frac{V_P}{V_S}$$

Lo que se traduce en la relación entre la velocidad de la onda P y la velocidad de la onda S (*Kelessidis, 2011*). Esto aplica para rocas con porosidad, la relación de Poisson es adimensional.

4.1.2.6 Módulo de Young

El módulo de Young puede calcularse a partir de los datos de densidad, velocidad de la onda S y relación de Poisson a través de la siguiente ecuación (Karacan, 2009):

$$E = 2\rho V_S^2 + \nu(2\rho V_S^2)$$

La expresión ρV_S^2 corresponde al módulo de cizalla, sin embargo, no se uso este módulo como tal durante el desarrollo del proyecto. Las unidades manejadas para el módulo de Young en este proyecto fueron los psi.

4.1.3 Modelo de Estabilidad

El modelo de estabilidad se encuentra representado en su totalidad por presiones trabajadas en libras por galón (ppg, *pounds per gallon*).

4.1.3.1 Presión de Poro

La presión de poro puede ser calculada usando la ecuación de Eaton (1975) a partir del registro sísmico:

$$P_P = S - (S - P_N) * \left[\frac{\Delta T_N}{\Delta T_O} \right]^\alpha$$

Donde S corresponde a la presión de sobrecarga, P_N a la presión normal de formación y α a un coeficiente cuyo valor depende de la cuenca a analizar. El subíndice O denota datos observados de registros y el subíndice N denota datos obtenidos a partir de la curva de tendencia normal, asumiendo en este caso que en la parte somera del subsuelo se tiene un comportamiento de compactación

uniforme, que debe verse reflejado en el registro sónico, cuyos valores se denotan con la letra T (Pérez, Ojeda & Mateus, 2009).

Esta ecuación funciona a la perfección en capas de shale, siendo objeto de observación en el caso de capas de arenisca ya que su resultado aplicado a una columna litológica variada resulta en una curva interpretativa (como es el caso del campo Apiay).

A grandes rasgos, el comportamiento de la presión de poro conlleva ciertos eventos dependiendo de las dimensiones de la ventana de estabilidad en el pozo. Se pueden presentar pérdidas de fluido de perforación cuando la presión de poro es muy baja e influjos (en caso de que la roca tenga algún tipo de contenido) cuando la presión de poro es muy alta.

4.1.3.2 Presión de Colapso

El fenómeno del colapso elástico (ya que las formaciones presentes en el campo Apiay muestran este comportamiento) fue analizado primeramente por Bresse (1859). La ecuación del colapso elástico está en función de la relación t/OD y de las constantes del material: relación de Poisson y módulo de Young (Sánchez, 2007):

$$p_{ce} = \frac{2E}{1 - \gamma^2} \left(\frac{t}{OD} \right)^3$$

La presión de colapso elástico equivale a dos veces el módulo de Young entre la diferencia de uno y el cuadrado de la relación de Poisson, todo esto en forma de producto con el cubo del espesor del revestimiento o tubería sobre el diámetro externo de la misma.

El comportamiento de la presión de colapso influye en la aparición de eventos como lo son los empaquetamientos (cuando la presión de colapso es mayor al peso de lodo) o los *cavings* (bajo las mismas condiciones). Este tipo de eventos pueden o no presentarse bajo ciertas circunstancias, sea juntos o de manera individual.

4.1.3.3 Presión de Fractura

Para el cálculo de la presión de fractura se utiliza el método de Eaton (*Schlumberger, 2011*):

$$GF = \left[\frac{\sigma_{ov}}{D} - \frac{P_p}{D} \right] \left(\frac{\gamma}{1 - \gamma} \right) + \frac{P_p}{D}$$

El gradiente de fractura corresponde a una relación entre la presión de sobrecarga (σ_{ov}), la profundidad del pozo (D), la presión de poro (P_p) y la relación de Poisson (γ). Este gradiente debe ser dividido entre la constante adimensional 0.052 con el fin de hacer la conversión a libras por galón (ppg, *pounds per gallon*), que es una unidad de presión (dejando de ser un gradiente).

La presión de fractura determina un límite sobre el cual se pueden presentar pérdidas de fluido de perforación por la apertura de fracturas en la pared de roca del pozo, por ello el peso del lodo debe ser de menor valor a esta presión.

4.1.3.4 Peso de Lodo

El peso de lodo es la única variable de control directo en la perforación de un pozo, teóricamente debe encontrarse en un punto medio de la ventana de estabilidad (por sobre la presión de poro y la presión de colapso y por debajo de la presión de fractura y los tres (3) esfuerzos principales).

Del control y el cálculo acertado del peso del lodo depende gran parte de la estabilidad de un pozo: El uso de un peso de lodo inadecuado podría producir eventos de perforación no deseados (pegas, exceso de *cavings*, empaquetamientos) o llevar a fracturamiento de la roca de la pared del pozo (perdidas de fluido de perforación). Los valores de peso de lodo utilizado en los pozos A, B, C, D, E y F del campo Apiay fueron suministrados por Halliburton.

4.1.3.5 Esfuerzo Vertical

El esfuerzo vertical se calcula a partir del registro de densidad, mediante la siguiente ecuación (*Pérez et al., 2009*):

$$p(z) = z \cdot \rho \cdot g$$

Esta ecuación empírica relaciona el esfuerzo vertical con la densidad a una profundidad dada en producto con la constante gravitacional. Una vez más, las unidades usadas dependen de las introducidas en cada variable.

4.1.3.6 Esfuerzo Horizontal Mínimo

Para el cálculo del esfuerzo horizontal mínimo en una formación dada, es de vital importancia contar con un registro que nos entregue la porosidad de la roca a una profundidad determinada. El criterio de falla presentado a continuación ha sido desarrollado y probado extensamente, aplicando a cuencas con régimen de fallamiento normal (como es el caso de la cuenca de los Llanos Orientales), donde el esfuerzo máximo es el vertical (*Holbrook et al., 1995*):

$$\sigma_h = \sigma_v * (1 - \phi)$$

El esfuerzo horizontal mínimo equivale al producto del esfuerzo vertical y la diferencia entre 1 y la porosidad en una profundidad dada.

4.1.3.7 Esfuerzo Horizontal Máximo

Existe una ecuación empírica mediante la cual se puede calcular el esfuerzo horizontal máximo con una precisión aceptable (*Kirsch, 1898*), aunque no es de carácter definitivo. La ecuación se presenta a continuación:

$$\sigma_H = 3\sigma_h - GF - P_p - TS$$

Esta ecuación involucra al esfuerzo mínimo, el gradiente de fractura, la presión de poro y la resistencia a la tensión de la roca. Todas estas variables a la misma profundidad, en la cual se piensa calcular una aproximación al esfuerzo horizontal máximo.

4.1.4 Surveys

Los *surveys* de pozo del campo Apiay suministrados por Halliburton cuentan con un total de diez (10) datos distintos a profundidades determinadas. Estos son: profundidad medida (MD, *Measured Depth*), coordenadas planas Magna Sirgas de origen Bogotá (X, Y y Z), profundidad vertical verdadera (TVD, *True Vertical Depth*), desviación con respecto a las coordenadas (X y Y), azimut del pozo, inclinación del mismo y DLS (*Dogleg Severity*). De estas, se tomaron en cuenta dos (2) cuya relación a los eventos de pozo es directa (las demás fueron usadas para modelar el pozo en tres dimensiones, tal y como se verá más adelante):

4.1.4.1 Azimut

Se trata del ángulo de la dirección del pozo contado en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte geográfico a una profundidad determinada. El azimut está dado en grados sexagesimales y depende de la orientación que se le haya dado al pozo de acuerdo a los objetivos de la perforación y de la naturaleza de las capas perforadas (*Illidge, 2008*).

4.1.4.2 Inclinación

Se trata de la pendiente del pozo medida respecto a la vertical. Se mide en grados sexagesimales al igual que el azimut y está directamente relacionado a este, ya que si el pozo medido es perfectamente vertical, su azimut es indefinido y su inclinación es igual a cero. La inclinación de un pozo también depende del objetivo u objetivos de la perforación y las características estructurales de la roca perforada (*Illidge, 2008*).

4.1.5 Eventos

Se registró un total de siete (7) tipos de eventos distintos durante el proceso de perforación de los pozos A, B, C, D, E y F del campo Apiay. Estos se dividen en eventos de perforación (*cavings*, influjos y pérdidas) y eventos durante viajes en la misma (puntos e intervalos apretados, *reaming* y *backreaming*, empaquetamientos y pegas de tubería).

4.1.5.1 Cavings

Los *cavings* son fragmentos de roca producidos por inestabilidad de pozo (generalmente por peso de lodo insuficiente para controlar derrumbes), cuyo tamaño va desde unos pocos hasta más de 10 cm (en el caso de las formaciones

naturalmente fracturadas). El análisis de *cavings* constituye una herramienta muy útil en la determinación de inestabilidad de pozo en tiempo real, brindando información sobre (Vargas, 2009):

- Aspectos de integridad de pozo: los *cavings* son indicadores de derrumbes por peso de lodo inefectivo para el control de los esfuerzos en profundidad, así como de planos de estratificación débiles y fracturas preexistentes.
- Necesidad de mejorar la limpieza del hueco: el exceso de *cavings* puede implicar empaquetamientos o intervalos apretados.
- Acciones remediales: el control del volumen, la morfología y el tamaño de los *cavings* permite la acción oportuna de buenas prácticas de perforación, estableciendo mecanismos de falla ocurrentes y por lo tanto la acción remedial adecuada.

4.1.5.2 Influjos

Los influjos son eventos de perforación cuya ocurrencia es debida a insuficiencia en el peso del lodo respecto a la presión de poro: Si la presión ejercida por el fluido de perforación no es la necesaria, el contenido de la roca (sea este gas, agua o hidrocarburo) escapa y se mezcla con el lodo, provocando que este se corte y pierda parte de sus propiedades (Illidge, 2008). Para evitar influjos se recomienda aumentar el peso del lodo hasta controlar la presión de poro en la mayoría, incluso en toda la extensión de la formación perforada (Fernández & Alvarelllos, 2011).

4.1.5.3 Pérdidas de Fluido

Las pérdidas de fluido de perforación son la otra cara de la moneda respecto a los influjos. Ocurren igualmente debido a insuficiencia en el peso de lodo, pero en este caso al momento en el que la presión del mismo se encuentra muy por sobre

la presión de poro (descompensando el sistema) (Vásquez, 2001). En otras ocasiones, el peso de lodo es tan alto que supera la presión de fractura de la formación, ocasionando que este se filtre por las grietas y se pierda. Sin embargo, este tipo de evento es poco común aunque característico de las pruebas de LOT y XLOT (cuyas condiciones son controladas por la operadora).

4.1.5.4 Puntos e Intervalos Apretados

Este tipo de eventos se caracteriza por su génesis diversa, debida en algunos casos a la geometría del hueco a través de una o más formaciones, a las reacciones químicas de la roca y el fluido de perforación (lo que las lleva a hincharse por osmosis, como en el caso de los shales) o a problemas de limpieza por acumulación de cortes y/o *cavings*. Un punto o intervalo apretado debe ser corregido en la mayoría de los casos con un proceso de *reaming* o *backreaming* (dependiendo de la profundidad a la que se encuentre la broca), para el correcto ajuste del revestimiento asignado a la formación o formaciones afectadas (Vásquez, 2001).

4.1.5.5 Reaming - Backreaming

Este tipo de evento tiene como objetivo el repaso de la broca a través de la perforación (puede ser en una o más formaciones) con el fin de perfeccionar las paredes del pozo para el correcto ajuste del recubrimiento asignado al mismo.

Se le conoce como *reaming* al repaso de la broca hacia el fondo del pozo y *backreaming* al proceso contrario. Este tipo de evento debe ser hecho teniendo en cuenta las propiedades de las paredes del pozo posteriores al primer paso de la broca, ya que las rocas podrían encontrarse inestables debido al proceso de perforación (Fernández & Alvarelllos, 2011).

4.1.5.6 Pegas de Tubería

Una pega de tubería es un evento de viaje en la perforación cuyas características hacen de su origen algo diverso: Algunas pegas ocurren por desbalances de presión (peso de lodo mucho mayor a la presión de poro), otras por escalonamiento en las formaciones perforadas, algunas debido a que la sarta de perforación es demasiado rígida y el hueco tiene una inclinación considerable y también pueden deberse a falta de limpieza en un hueco con un ángulo alto (*Chirinos, 2012*).

Las pegas de tubería se dividen en dos tipos:

- Pegas diferenciales: Con circulación de la sarta, pero nula rotación de la misma, lo que impide la perforación.
- Pegas mecánicas: Con la sarta atrapada y rotación restringida de la misma.

Para corregir las pegas de tubería se puede utilizar el martillo de la sarta (un dispositivo que da un golpe a la misma para destrabarla), píldoras con químicos para equilibrar las presiones o procesos de rotación, compresión y/o tensión a profundidad.

4.1.5.7 Empaquetamientos

Los empaquetamientos se producen por un desbalance entre la presión de colapso y el peso del lodo, cuando este último tiene un valor menor. Debido a esto, se producen derrumbes (*cavings*) que al acumularse provocan el mal funcionamiento de la sarta de perforación, trabándola o deteniéndola (tanto en sentido vertical como en su rotación) (*Illidge, 2008*).

Los empaquetamientos son poco comunes si se monitorea correctamente la limpieza del pozo, por lo que en caso de ocurrir, esta última debe ser revisada con el fin de superar el evento.

4.2 ANALISIS

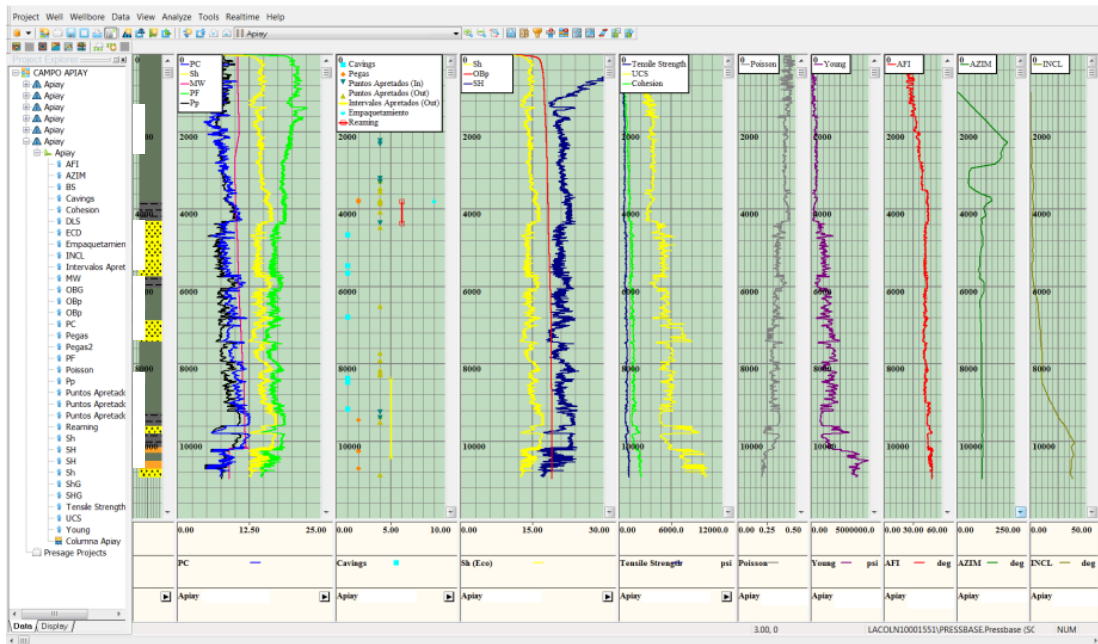
El análisis realizado a los esfuerzos que rigen el campo Apiay se basó en tres (3) etapas distintas, explicadas en detalle a continuación. Estas etapas se fundamentaron en un análisis cuidadoso del comportamiento de los datos procesados en seis pozos distintos y a distintas profundidades, en busca de patrones, tendencias y/o similitudes entre estos. Se correlacionó el modelo E1 (con sus respectivos esfuerzos) y el modelo E2 (con sus esfuerzos propios) con los eventos registrados durante la génesis de los pozos, con el fin de encontrar una relación que corrobore o refute la tendencia de esfuerzos en cada caso.

4.2.1 Correlación de Datos

Para este paso, se cargó la totalidad de la información adquirida y organizada en el software *Drillworks® Predict 5000.8.0* de la empresa Halliburton (ver *Figura 22*). Este software permite graficar, a manera de curvas o datos puntuales, valores tan distintos como lo pueden ser las propiedades mecánicas de la roca, los esfuerzos e incluso los eventos registrados en la perforación de los pozos.

Para los seis pozos se manejaron diversos *tracks* cuya finalidad era la interpretación de la información formación por formación y unidad por unidad en busca de posibles analogías y comparaciones entre pozos a partir de patrones, tendencias o similitudes entre las propiedades de las rocas de las paredes de los mismos. Cada pozo contó con una columna litológica propia, así como con una ventana de estabilidad de pozo y *tracks* para propiedades mecánicas y eventos. Finalmente, se analizó por separado las curvas correspondientes a esfuerzos.

Figura 22. Vista general de *Predict*, software usado para la correlación de datos.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

4.2.2 Regímenes Individuales

Los regímenes de cada uno de los seis pozos analizados fueron planteados en varias fases. Para el caso de los esfuerzos de ambos modelos, se contó con la información correspondiente a presiones de poro, cohesiones y ángulos de fricción interna de las rocas, las cuales permitieron calcular la presión de colapso de las rocas según los esfuerzos propuestos. Por consiguiente, las ventanas de estabilidad usadas para validar los esfuerzos del campo Apiay a partir de su correlación con los eventos acontecidos en la perforación contaron con las siguientes variables:

- Presión de poro.
- Presión de colapso (calculada mediante software para el modelo E2).
- Peso de lodo (el mismo en ambos casos).

Como primera conclusión respecto a los regímenes individuales planteados para cada uno de los seis pozos estudiados, se determinó que ninguno de ellos pertenece al régimen inverso de esfuerzos. Esto debido a que para este régimen, el esfuerzo vertical (σ_v) presenta un valor menor al del esfuerzo horizontal mínimo (σ_h), evento que no ocurre en ninguno de los seis pozos analizados en el presente proyecto. Por consiguiente, las alternativas restantes para definir el régimen de esfuerzos de los pozos estudiados en Apiay se reducen a dos: régimen normal y régimen transcurrente.

4.2.3 Régimen General

Una vez determinado el régimen (o regímenes) de esfuerzos en cada formación de cada uno de los seis pozos analizados, se procedió a correlacionar esta información de la siguiente manera:

1. Inicialmente, se procedió a analizar cada pozo por separado, con el fin de determinar si la totalidad del mismo se ajustaba a un régimen único o a varios de estos.
2. Una vez realizado este análisis, se compararon los regímenes propuestos a determinadas profundidades en los seis pozos estudiados, en busca de posibles patrones que permitiesen determinar la disposición o no de un único régimen a ciertas profundidades a nivel del campo petrolífero.
3. Una vez determinada o no la existencia de un régimen o regímenes de esfuerzos individuales de cada pozo, se procedió a analizar los resultados obtenidos en busca de las posibles implicaciones de estos en la estabilidad de los pozos perforados, además de dar pie a la discusión de los resultados obtenidos en estudios anteriores.

5. DESARROLLO DE LA METODOLOGIA

Como primera parte del desarrollo de la metodología planteada para el presente proyecto, se procedió a realizar un análisis de las litologías encontradas en las formaciones que infrayacen al campo Apiay mediante la correlación de datos de propiedades mecánicas de las rocas del modelo E1 con material bibliográfico, además del análisis de la ventana de estabilidad propuesta en el presente proyecto con énfasis en las presiones de poro y colapso respecto al peso del lodo utilizado en la perforación de cada pozo.

El análisis presentado a continuación mostro ciertas similitudes entre las propiedades mecánicas de las rocas de los seis (6) pozos estudiados (p. ej. Los valores de estas se ubican en rangos definidos para cada formación y estos no varían entre pozo y pozo). Gracias a este detalle (debido posiblemente a la poca diferencia entre topes y espesores de las formaciones (ver *Tabla 3* y *Tabla 4*) y la cercanía entre los pozos tratados), el análisis realizado pudo ser efectuado formación por formación y es aplicable a cada pozo por igual.

5.1 ESTRATIGRAFIA

Este análisis litológico se realizó teniendo en cuenta las propiedades mecánicas. Se trata de una correlación desde el punto de vista de la petrofísica, buscando corroborar los datos procesados. En cuanto a la estabilidad en la perforación de los pozos, se confronto el comportamiento de las tres (3) variables principales y sus posibles efectos sobre la roca, todo de acuerdo al modelo E1.

Como soporte para este proceso, se recopilaron los topes de las formaciones presentes en los pozos trabajados (ver *Tabla 3*) y a partir de estos se calcularon los espesores de estas últimas (ver *Tabla 4*).

Tabla 3. Topes medidos de las formaciones del campo Apiay en los pozos trabajados.

FORMACION	POZOS						
	Apiay A	Apiay B	Apiay C	Apiay D	Apiay E	Apiay F	
	TOPES						
F1	0	0	0	0	0	0	
F2	3836.28	3899.14	3878.83	3829.99	3759.9	3809.3	
F3	F3a	4313.9	4380.97	4349.57	4299.99	4199.9	4298.98
	F3b	5748.83	5829.39	5794.14	5769.99	5686.9	5744.23
	F3c	6048.55	6133.2	6084.05	6057.99	5999.89	6038.96
	F3d	6828.93	6894.72	6859.71	6870.99	6806.89	6874.07
	F3e	7351.48	7419.55	7376.16	7416.5	7324.89	7417.79
	F3f	9204.84	9229.96	9207.48	9325.63	9190.16	9260.72
	F3g	9585.17	9637.67	9603.32	9676.76	9558.09	9600.62
	F3h	9765.73	9818.48	9767.29	9872.21	9747.23	9800.37
F4	F4a	10047.71	10104.7	10033.51	10144.52	10088.11	10157.81
	F4b	10131.45	10186.79	10128.01	10229.6	NA	NA
F5	F5a	10212.42	10279.38	10226.78	10314.42	10281.84	10296.41
	F5b	10532.62	10555.03	10493.12	10602.02	10505.22	10501.35
F6	10687.43	10746.41	10685.72	10806.12	10644.93	10719.31	
Fondo del Pozo	10956.81	10906.25	10875.07	11013.16	10902.74	10931.27	

Igualmente, se incluyen figuras (construidas con *Drillworks® Predict 5000.8.0*) mostrando el comportamiento de las variables estudiadas (en forma de curvas) respecto a la profundidad. Las variables presentadas en estas curvas mostraron algunos patrones y tendencias, indicadas en la descripción de cada formación.

5.1.1 Formación F1

F1 está definida como una secuencia de areniscas estratificadas de grano fino a grueso, arcillas y una serie de lutitas, con un espesor de entre 1300 y 3300 ft (*Salamanca, 2010*).

El espesor de F1 en los seis pozos analizados en el campo Apiay es de entre 3759 y 3899 ft (presentados en Apiay E y B, respectivamente), siendo la segunda formación de mayor extensión vertical en el campo (después de F3).

Tabla 4. Espesores calculados de las formaciones del campo Apiay en los pozos trabajados.

FORMACION		POZOS					
		Apiay A	Apiay B	Apiay C	Apiay D	Apiay E	Apiay F
		ESPESORES					
F1		3836.28	3899.14	3878.83	3829.99	3759.9	3809.3
F2		477.62	481.83	470.74	470	440	489.68
F3	F3a	1434.93	1448.42	1444.57	1470	1487	1445.25
	F3b	299.72	303.81	289.91	288	312.99	294.73
	F3c	780.38	761.52	775.66	813	807	835.11
	F3d	522.55	524.83	516.45	545.51	518	543.72
	F3e	1853.36	1810.41	1831.32	1909.13	1865.27	1842.93
	F3f	380.33	407.71	395.84	351.13	367.93	339.9
	F3g	180.56	180.81	163.97	195.45	189.14	199.75
	F3h	281.98	286.22	266.22	272.31	340.88	357.44
F4	F4a	83.74	82.09	94.5	85.08	193.73	138.6
	F4b	80.97	92.59	98.77	84.82	NA	NA
F5	F5a	320.2	275.65	266.34	287.6	223.38	204.94
	F5b	154.81	191.38	192.6	204.1	139.71	217.96
F6		269.38	159.84	189.35	207.04	257.81	211.96

Litológicamente, F1 se caracteriza en los pozos estudiados en el campo Apiay por la presencia de intercalaciones de areniscas y arcillolitas, así como algunos shales hacia su base (lo que concuerda con la descripción dada en la bibliografía).

Desde el punto de vista del tamaño de grano, las intercalaciones de areniscas y arcillolitas parecen ser bastante uniformes en la parte superior de la formación, cambiando esto hacia la base de la misma, en la cual las areniscas pasan a intercalarse con shales (esto a una profundidad de entre 2226 y 3057 ft, dependiendo del pozo).

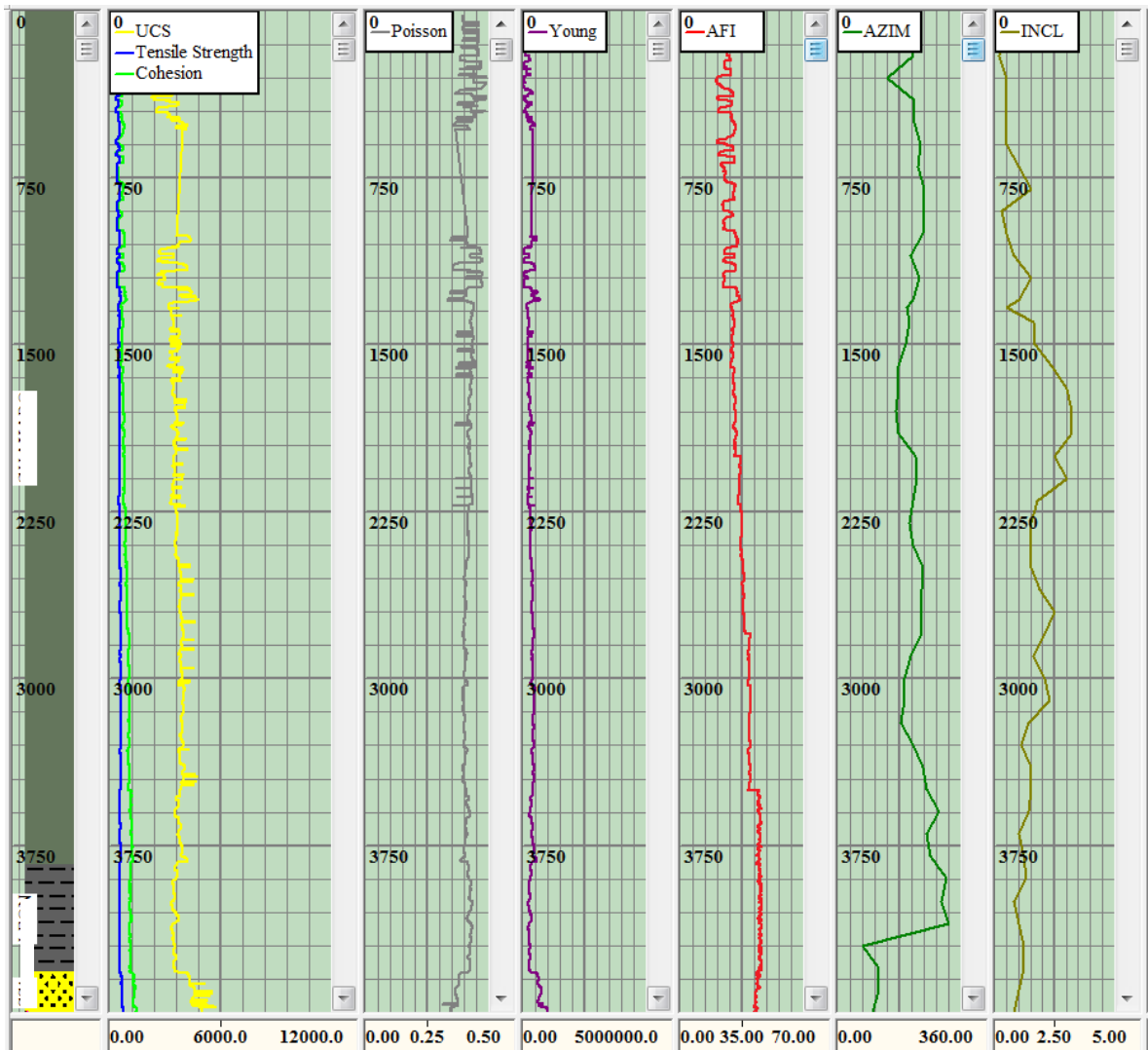
Lo anterior se sustenta en los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) para la formación F1 en los seis (6) pozos analizados del campo Apiay (ver *Figura 23*):

- Los valores en areniscas varían entre los 3825 y los 4900 psi de UCS y los 29 y 36 grados de AFI (cantidades correspondientes al grano más fino y al grano más grueso, respectivamente). La formación está conformada por shale y areniscas.
- Los valores en arcillolitas están en el rango de los 2375 psi de UCS y 24 grados de AFI. Estos valores marcan una tendencia a partir de esta formación y hasta el fondo del pozo.
- Los valores en shales se ubican próximos a los de las arcillolitas (UCS del orden de los 3100 psi y 27 grados de AFI), siendo mayores que los de estas últimas, aunque no tanto como los de las areniscas. Esta tendencia de los shales respecto a las arcillolitas aplica para todo el pozo y para todos los pozos.

La cohesión de las rocas de la formación F1 en el campo Apiay presenta valores de entre 400 y 1425 psi, incrementándose gradualmente a medida que aumentan la presión y la profundidad, al igual que el esfuerzo vertical correspondiente, afectado por la altura de la columna litológica y la densidad de las rocas que la conforman.

Existen picos en los valores de la curva correspondiente, aunque poco diferenciados de la tendencia, para las rocas de grano más grueso (en el caso de los valores altos) y para las de grano más fino (en el caso de los valores bajos). Las litologías predominantes de la formación F1 son las de grano fino (shales), seguidas por areniscas con tamaño de grano diverso (entre muy fino y medio, dependiendo de la capa analizada).

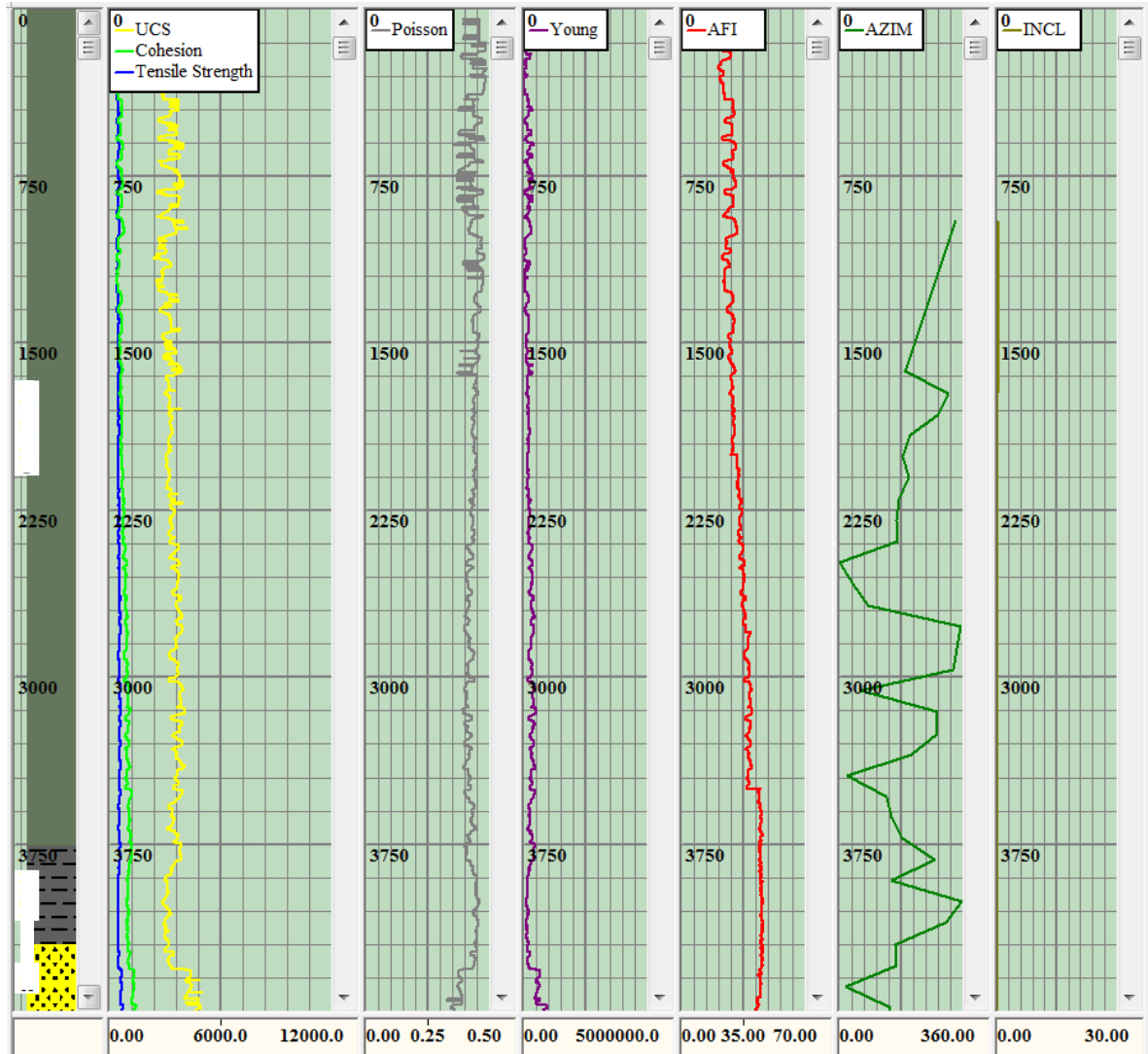
Figura 23. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de la formación F1 en el pozo A. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El comportamiento es similar para los valores de tensión que soporta la roca: varían entre los 300 y los 550 psi (valores bastante menores a los del UCS, como es de esperar), mostrando un incremento proporcional a la presión y la profundidad (con sus respectivos picos en los valores de la curva, igualmente poco diferenciados de la tendencia, también de valores más altos para las litologías con tamaño de grano más grueso y más bajos para las litologías de grano más fino).

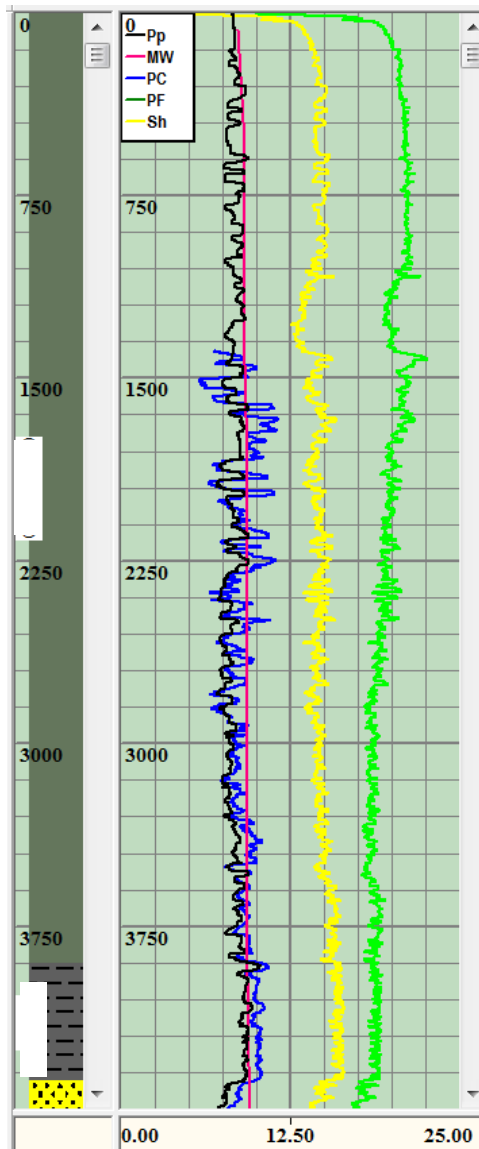
Figura 24. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de la formación F1 en el pozo E. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El módulo de Young para la formación F1 en el campo Apiay presenta igualmente un incremento gradual en sus valores a medida que aumenta la profundidad, contrario a lo que respecta al valor de la relación de Poisson en estas mismas rocas.

Figura 25. Ventana de estabilidad para la formación F1 en el pozo B, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El módulo de Young varía entre 60000 y 660000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano más gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.34 y 0.48 (que contrario al módulo de Young, representa los tamaños de grano más gruesos con los valores más bajos). La relación de Poisson es una cantidad adimensional (ver *Figura 24*).

Los valores de presión de colapso y presión de poro para F1 muestran un único comportamiento a través de la formación: la presión de colapso presenta valores superiores a los de la presión de poro (aproximadamente 2 ppg de diferencia en todo momento).

El tramo superior de la formación (desde la superficie hasta entre 2747 y 3158 ft, dependiendo del pozo) se caracteriza por picos pronunciados en la curva de presión de colapso (con respecto a la presión de poro), mientras que el tramo inferior (desde estos puntos hasta la base de F1) presenta una disminución en los valores de la misma (que se hacen más cercanos a los de presión de poro, aunque son mayores generalmente).

El peso de lodo utilizado para la perforación de la formación F1 en los pozos analizados en el campo Apiay presenta varias diferencias entre sí:

- En Apiay A el peso de lodo usado varía entre 8.8 y 9.3 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para controlar las presiones de poro y colapso en la formación. Existen picos en la curva de presión de colapso que sobrepasan al peso de lodo a lo largo de todo F1 (de entre 1 y 2 ppg) y un tramo entre 227 y 1246 ft en el cual la presión de poro hace lo mismo, aunque de forma no tan pronunciada.
- En Apiay B (ver *Figura 25*) el peso de lodo varía entre 8.75 y 9.2 ppg, siendo este valor igualmente ineficiente (en teoría) para el control de las presiones de poro y colapso en F1 (la presión de colapso presenta picos en su curva de hasta 2 ppg por sobre el peso del lodo a través de toda la formación y la presión de poro muestra valores mayores a los del mismo desde 300 hasta 2259 ft).
- En Apiay C el peso de lodo varía entre 9 y 9.9 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (esta

presenta picos en su curva de hasta 1.5 ppg por sobre el peso del lodo en la totalidad de F1), pero suficiente para controlar la presión de poro (se mantiene aproximadamente 2.5 ppg por encima de esta).

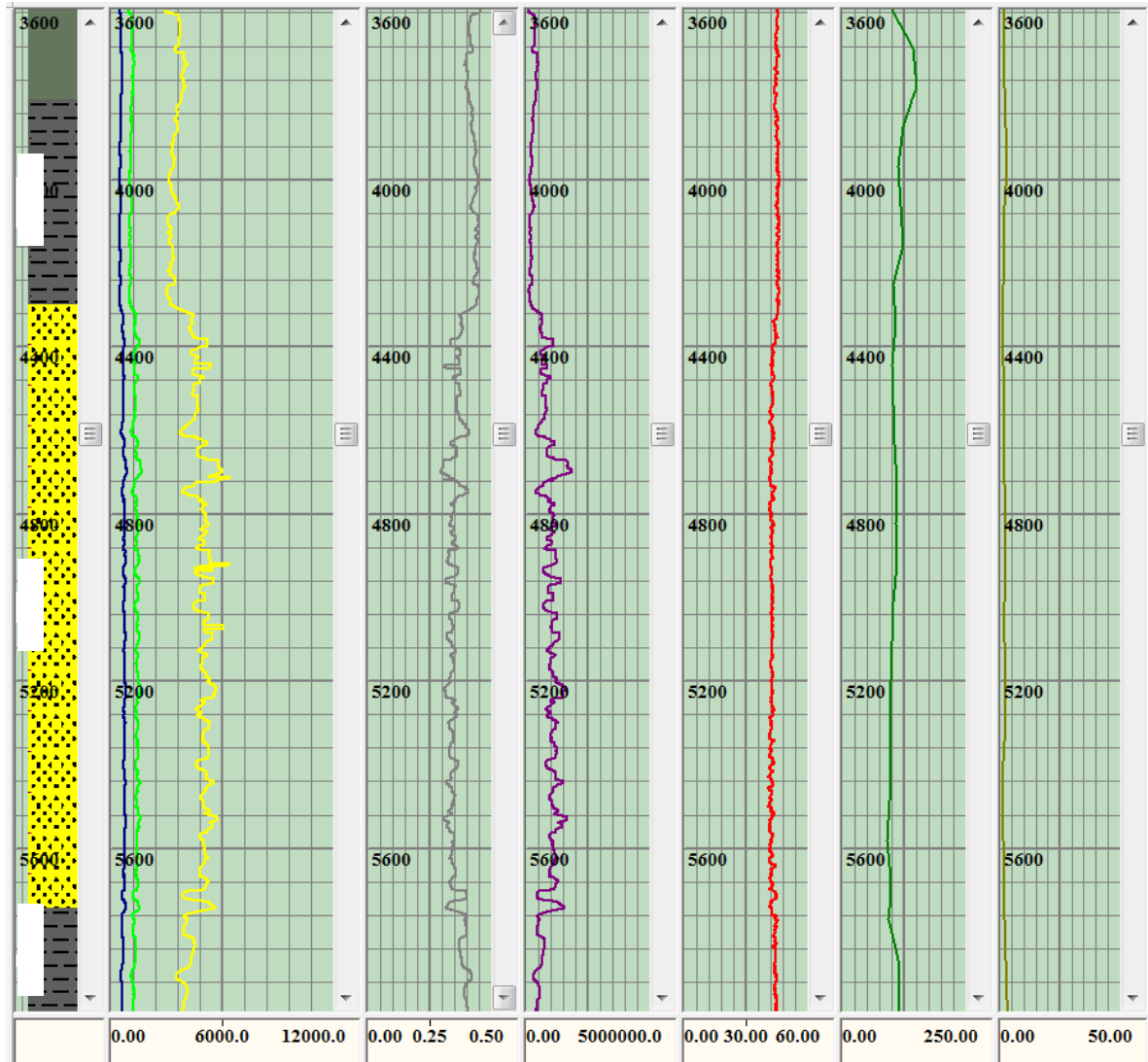
- En Apiay D el peso de lodo varía entre 9.6 y 10.5 ppg, siendo este valor, una vez más, teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso en la formación (se presentan picos en su curva de hasta 1.5 ppg por sobre el peso del lodo en toda la extensión vertical de F1), pero suficiente para controlar la presión de poro en todo momento (se mantiene aproximadamente de 2.5 a 3 ppg por encima de esta).
- En Apiay E el peso de lodo varía entre 10 y 10.75 ppg, siendo este valor por tercera vez teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso en la formación (picos en su curva de hasta 1.5 por sobre el peso del lodo, aunque muchos menos que en los pozos C y D), pero suficiente para controlar la presión de poro en todo momento (una vez más se mantiene entre 2.5 y 3 ppg por encima de esta).
- En Apiay F el peso de lodo varía entre 10 y 10.4 ppg, con algunas diferencias en cuanto a lo realizado en los pozos anteriores (el peso de lodo más alto se presenta hacia el tope y no hacia la base de la formación) siendo estos valores teóricamente eficientes para el control de las presiones de poro y colapso en toda la formación (con una única excepción de la presión de colapso 0.2 ppg por sobre el peso del lodo a 3588 ft).

5.1.2 Formación F2

La formación F2 está definida como una serie de lutitas verdosas en contacto discordante con la formación F3 (*Salamanca, 2010*).

El espesor de F2 en los pozos analizados en el campo Apiay es de entre 440 y 489 ft (presentados en los pozos E y F, respectivamente), siendo la tercera formación de mayor extensión vertical en el campo.

Figura 26. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de la formación F2 y el miembro F3a en el pozo F. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

F2 se caracteriza en este pozo por la predominancia de shales, con la aparición muy ocasional de litologías de tamaño de grano mayor (areniscas de grano muy fino) cerca al techo de la formación (Apiay B, D, F) o hacia la mitad de la misma (Apiay A, C y E).

Los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en F2 muestran algunas características de sus capas:

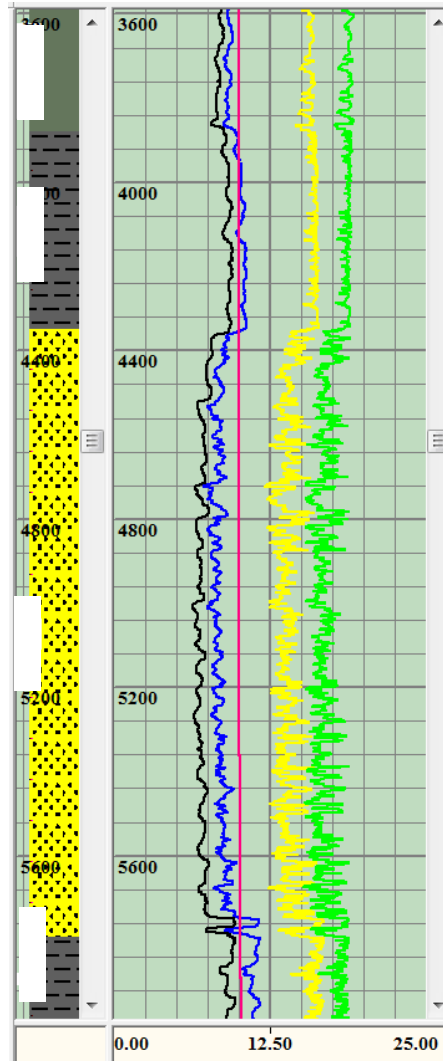
- Los valores en shales (predominantes en la formación) están en el rango de los 3075 psi de UCS y 42 grados de AFI.
- Los valores en areniscas (litología escasa en aparición) están en el rango de los 3600 psi de UCS y 46 grados de AFI.

La cohesión de las rocas de F2 presenta valores de entre 950 y 1260 psi (ver *Figura 26*), disminuyendo gradualmente con el aumento en la presión y la profundidad. Existen tramos poco diferenciados de la tendencia general con valores más altos (para las rocas de grano más grueso) y más bajos (para las de grano más fino). La tensión que soporta la roca se comporta de manera similar: varía entre 380 y 450 psi, mostrando un decremento ligero a medida que aumentan la presión y la profundidad (con algunos tramos de valores más altos para las litologías con tamaño de grano grueso y más bajos para las litologías con tamaño de grano fino).

El módulo de Young para la formación F2 en el campo Apiay presenta un decremento ligero a medida que aumenta la profundidad, contrario al valor de la relación de Poisson. El módulo de Young varía entre 50000 y 350000 psi (valores altos para tamaños de grano gruesos y viceversa), mientras los valores de Poisson oscilan entre 0.41 y 0.5 (contrario al módulo de Young, tamaños de grano gruesos muestran valores bajos respecto a la tendencia).

Los valores de presión de colapso y presión de poro en F2 muestran un comportamiento típico de una secuencia con predominancia casi total de shales, sin importar donde se midan: La presión de poro presenta valores menores a los de la presión de colapso en la totalidad de la formación, con gran cantidad de tramos en los cuales el peso de lodo es ineficiente para controlar estas variables.

Figura 27. Ventana de estabilidad para la formación F2 y el miembro F3a en el pozo C, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El peso de lodo utilizado para la perforación de la formación F2 en los pozos estudiados del campo Apiay presenta las siguientes características:

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de 9.2 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso

en la formación ya que ambas igualan o superan (por hasta 1.5 ppg) al peso de lodo a lo largo de todo F2.

- En Apiay B el peso de lodo usado fue de entre 9.2 y 9.3 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en la formación ya que ambas la primera iguala al peso de lodo y la segunda lo supera (por hasta 1 ppg) a lo largo de todo F2.
- En Apiay C (ver *Figura 27*) el peso de lodo usado fue de 9.9 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso en la formación ya que esta supera al peso de lodo a lo largo de todo F2 (por hasta 0.5 ppg). La presión de poro, en cambio, es controlada efectivamente con este peso en la totalidad de los 470 ft de formación.
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de entre 10.5 y 10.6 ppg, siendo este valor, al igual que en el pozo 19, teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso en la formación ya que esta supera al peso de lodo a lo largo de todo F2 (por hasta 0.5 ppg). La presión de poro, en cambio, es controlada efectivamente con este peso de lodo en todo el trayecto.
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de entre 10.75 y 10.85 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la formación ya que ambas se mantienen por debajo de los valores de peso de lodo de F2 (por entre 0.4 y 1.5 ppg).
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de 10 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en la formación ya que ambas igualan o superan (en hasta 0.8 ppg) al peso de lodo a lo largo de buena parte de F2.

5.1.3 Formación F3

La Formación F3 es definida como una alternancia de lutitas y areniscas, dividida en ocho unidades diferentes y con un total de 10130 ft de espesor (*Salamanca, 2010*). Esta descripción es bastante superficial, teniendo en cuenta que se trata de

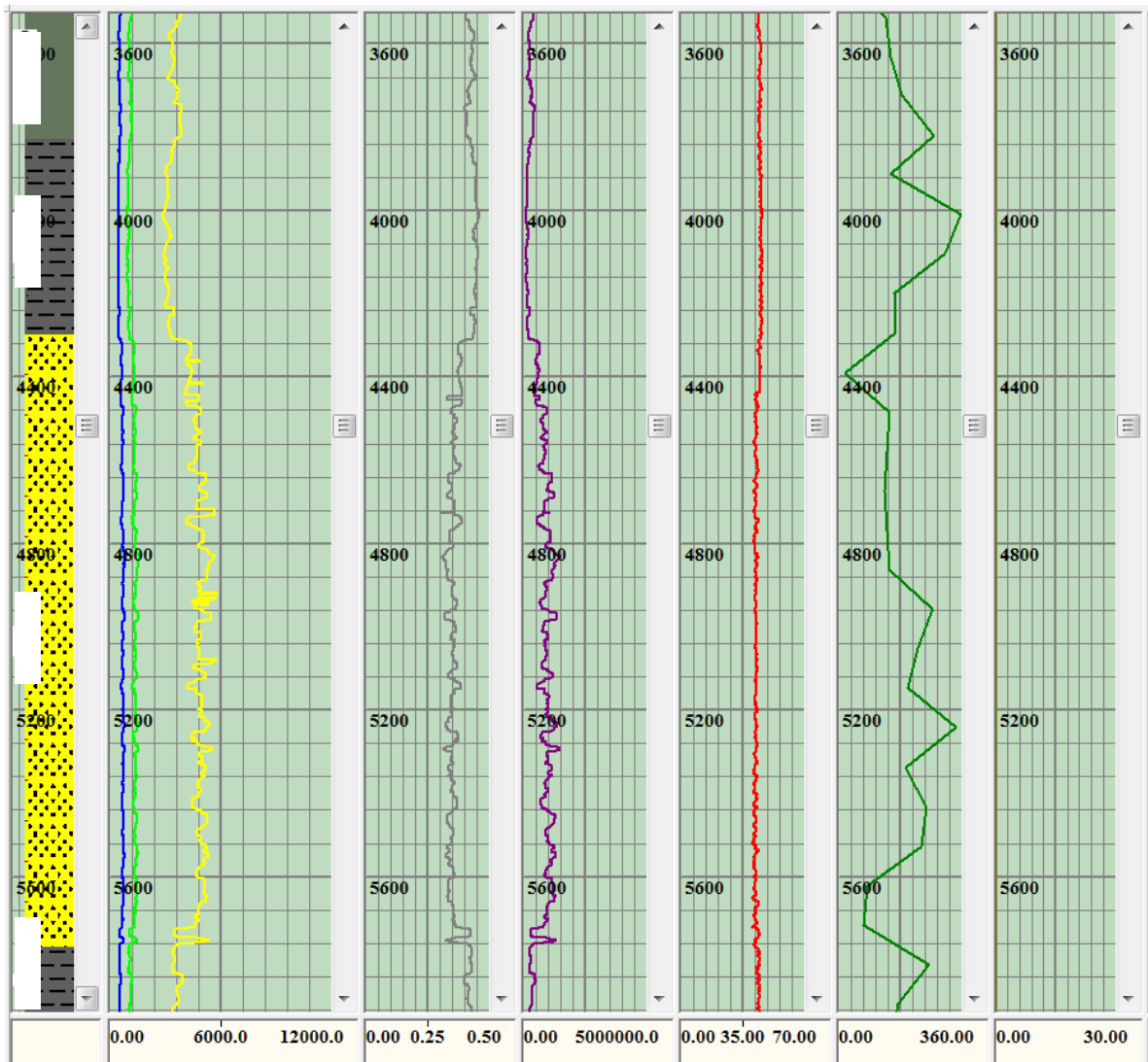
una formación de tamaño y extensión considerables. En el campo Apiay la formación F3 presenta en su totalidad las ocho (8) unidades conformantes mencionadas en la bibliografía, aunque con un espesor mucho menor al de su sección tipo para los pozos analizados (de entre 5683 y 5888 ft, en los pozos C y E respectivamente). Sin embargo, sigue siendo la formación de mayor espesor en Apiay.

5.1.3.1 Unidad F3a

Tal y como su nombre lo indica, esta unidad está definida como una secuencia de areniscas estratificadas con tamaño de grano variable (*Salamanca, 2010*). El espesor de F3A (nombre con el que esta unidad será identificada de aquí en adelante) en los seis pozos analizados del campo Apiay varía entre los 1435 y los 1487 ft (en los pozos A y E, respectivamente).

Litológicamente hablando, F3A se caracteriza en el campo Apiay por la predominancia de areniscas (de grano muy fino a grueso), con la aparición bastante puntual de algunas capas de lo que probablemente sea shale (en el caso de Apiay F). Desde el punto de vista del tamaño de grano, las areniscas de grano más grueso son más comunes en la mitad superior de F3A, caracterizándose el resto de la unidad por areniscas de grano muy fino a medio (aunque las areniscas de grano más grueso siguen apareciendo esporádicamente).

Figura 28. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de la formación F2 y el miembro F3a en el pozo D. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

Estas afirmaciones se sustentan en los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en F3A (ver *Figura 28*):

- Los valores en areniscas varían entre los 4520 y los 6400 psi de UCS y los 42 y 43 grados de AFI (cantidades correspondientes al grano muy fino y al grano grueso, respectivamente).
- Los valores en shales (en el caso del pozo F) están en el rango de los 3800 psi de UCS y 41 grados de AFI.

La cohesión de las rocas de F3A presenta valores de entre 1200 y 1570 psi, manteniéndose relativamente constante con el aumento en presión y profundidad (a diferencia de lo medido en las unidades suprayacentes, aplicando en todos los pozos), aunque los valores en la base de F3A siguen siendo los mayores. Existen picos en la curva, poco diferenciados de la tendencia, para las rocas de grano más grueso (en el caso de los valores altos) y para las de grano más fino (en el caso de los valores bajos). Con los valores de tensión que resiste la roca el comportamiento es similar: varían entre los 525 y los 750 psi, mostrando una tendencia más constante que creciente a medida que aumentan la presión y la profundidad (con sus respectivos picos poco diferenciados de la tendencia de la curva: valores altos para las litologías con tamaño de grano grueso y bajos para las litologías de grano fino).

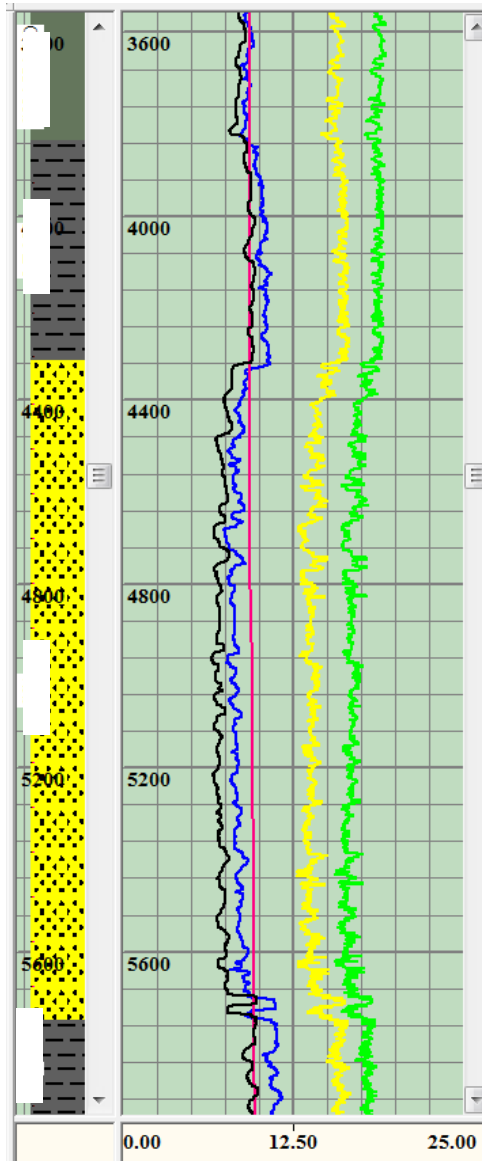
El módulo de Young para F3A en el campo Apiay (y a diferencia de la cohesión y la tensión) manifiesta un incremento gradual más marcado en sus valores a medida que aumenta la profundidad, contrario a lo que respecta al valor de la relación de Poisson (que decrece poco a poco) en estas areniscas. El módulo de Young varía entre 360000 y 1500000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano más gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.3 y 0.4 (que contrario al módulo de Young, representa los tamaños de grano más gruesos con los valores más bajos). La curva correspondiente a los valores para el módulo de Young (y por consiguiente, para la relación de Poisson) es en apariencia, muy irregular; ello debido a que a pesar de que las litologías son mayoritariamente arenosas, el tamaño de grano de estas es bastante diferenciado.

Los valores de presión de colapso y presión de poro para F3A muestran un comportamiento único a través de la unidad: la presión de colapso se mantiene siempre por sobre la presión de poro en aproximadamente 0.6 ppg.

El peso de lodo utilizado para la perforación de F3A en el campo Apiay se incrementa con la profundidad en los seis pozos analizados, aunque en todos a un ritmo distinto:

- En Apiay A (ver *Figura 29*) el peso de lodo usado fue de entre 9.2 y 9.6 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (aproximadamente 2.2 y 1.2 ppg por debajo del peso del lodo, respectivamente) en la unidad.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de entre 9.4 y 9.6 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (aproximadamente 2.7 y 1.7 ppg por debajo del peso del lodo, respectivamente) en la unidad.
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de entre 9.9 y 10 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (aproximadamente 2.9 y 1.9 ppg por debajo del peso del lodo, respectivamente) en la totalidad de la unidad.
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de entre 10.7 y 10.9 ppg, siendo este valor, al igual que en el pozo C, teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (aproximadamente 3.7 y 2.7 ppg por debajo del peso del lodo, respectivamente) en la totalidad de la unidad.
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de 10.9 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la unidad ya que ambas se mantienen por debajo de los valores de peso de lodo de F3A (3.5 y 2.5 ppg, respectivamente).
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de entre 10.2 y 10.5 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (aproximadamente 2.4 y 1.4 ppg por debajo del peso del lodo, respectivamente) en la unidad.

Figura 29. Ventana de estabilidad para la formación F2 y el miembro F3a en el pozo A, según el modelo E1.

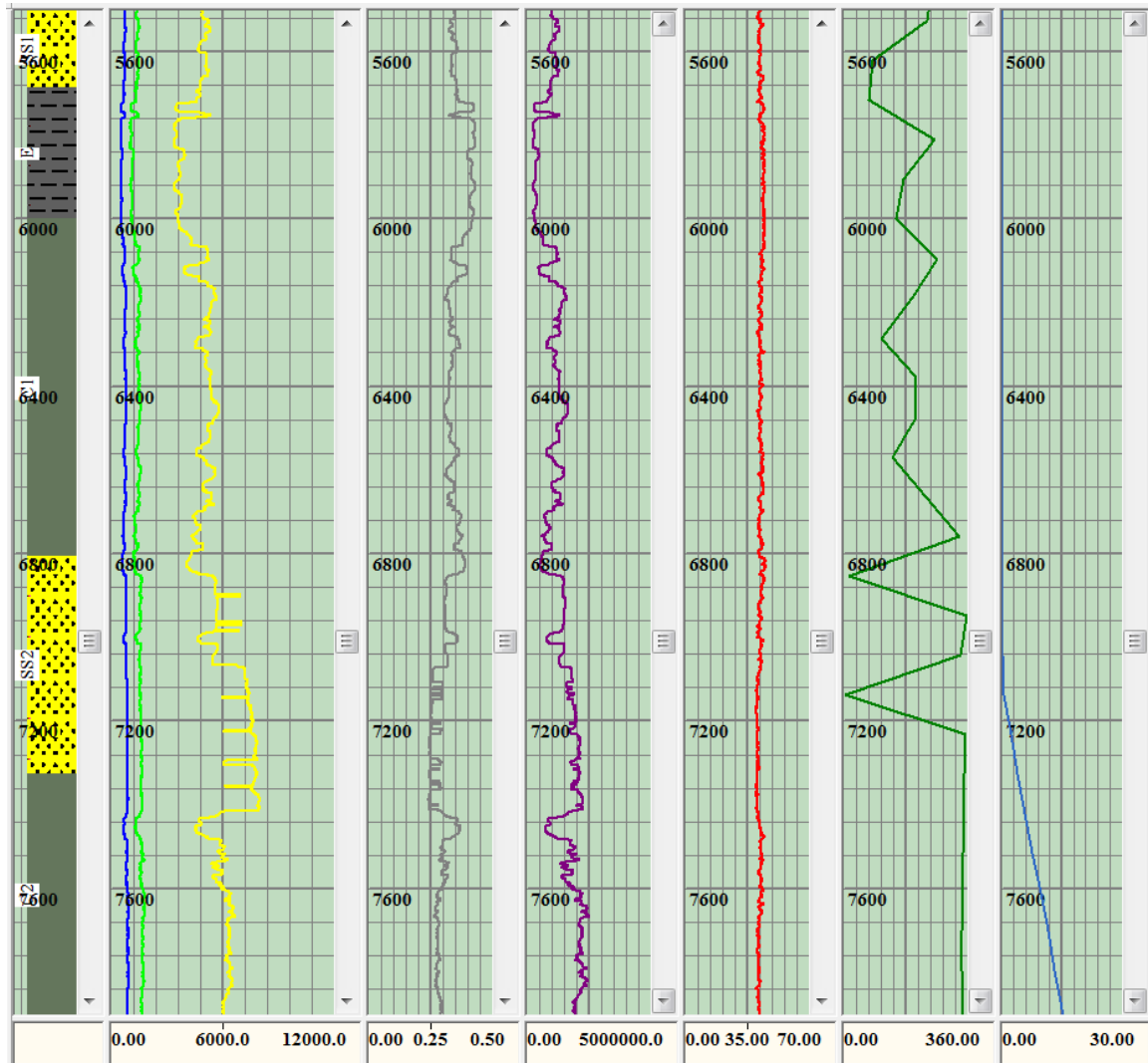


Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

5.1.3.2 Unidad F3b

Figura 30. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo E. También se aprecian el azimut y la

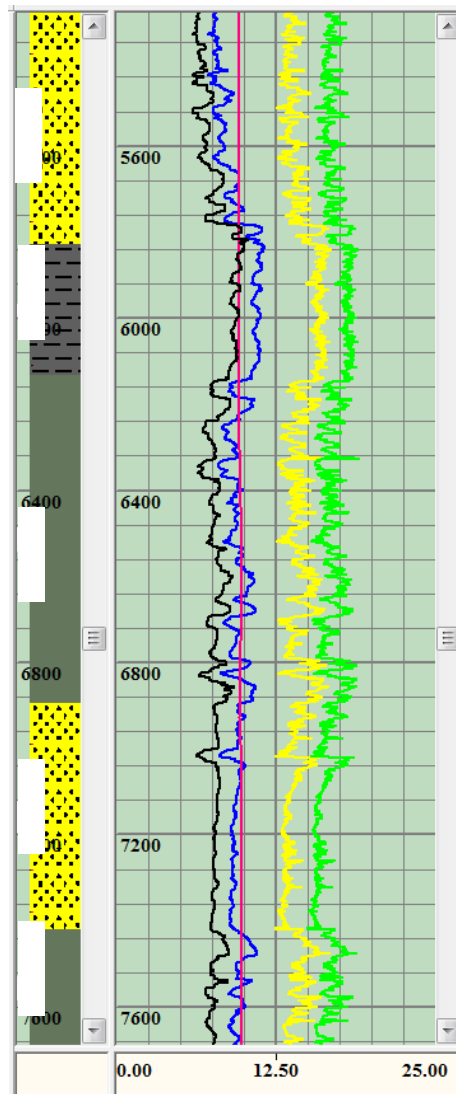
inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

La unidad F3b está definida como una intercalación de lutitas entre las F3a y la unidad F3C (*Salamanca, 2010*). El espesor de la misma en los pozos estudiados del campo Apiay varía entre 288 y 312 ft (para los pozos D y E, respectivamente). La F3b se caracteriza en el campo Apiay por la predominancia absoluta de shales.

Figura 31. Ventana de estabilidad para los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo B, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

Los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en la F3b (ver *Figura 30*) sirven para determinar algunas características de la litología que la conforma: Se trata de shales con valores de UCS entre los 3520 y los 4520 psi, cantidades mucho más bajas que las de las areniscas de la unidad suprayacente (F3A) pero cercanas a las de los shales registrados en la misma. El AFI en la F3b está en el rango de los 43 grados.

La cohesión de las rocas de la F3b presenta valores de entre 1125 y 1425 psi, disminuyendo muy gradualmente con el aumento en la presión y la profundidad. La tendencia de la tensión que soporta la roca se comporta de manera similar: varía entre 600 y 820 psi, mostrando un decremento muy ligero a medida que aumentan la presión y la profundidad.

El módulo de Young para la F3b en el campo Apiay presenta un decremento ligero a medida que aumenta la profundidad, contrario al valor de la relación de Poisson. El módulo de Young varía entre 360000 y 660000 psi (valores correspondientes a shales, teniendo en cuenta la profundidad y considerando su tamaño de grano reducido), mientras los valores de Poisson oscilan entre 0.36 y 0.43 (contrario al módulo de Young, la tendencia es al incremento, aunque sea local).

Los valores de presión de colapso y presión de poro en la F3b muestran un comportamiento típico de una secuencia con predominancia total de shales (como es el caso de la formación F2), con ligeras variaciones dependiendo de dónde se midan. La presión de poro presenta valores menores a los de la presión de colapso en la totalidad de la unidad (la diferencia es de aproximadamente 1.8 ppg).

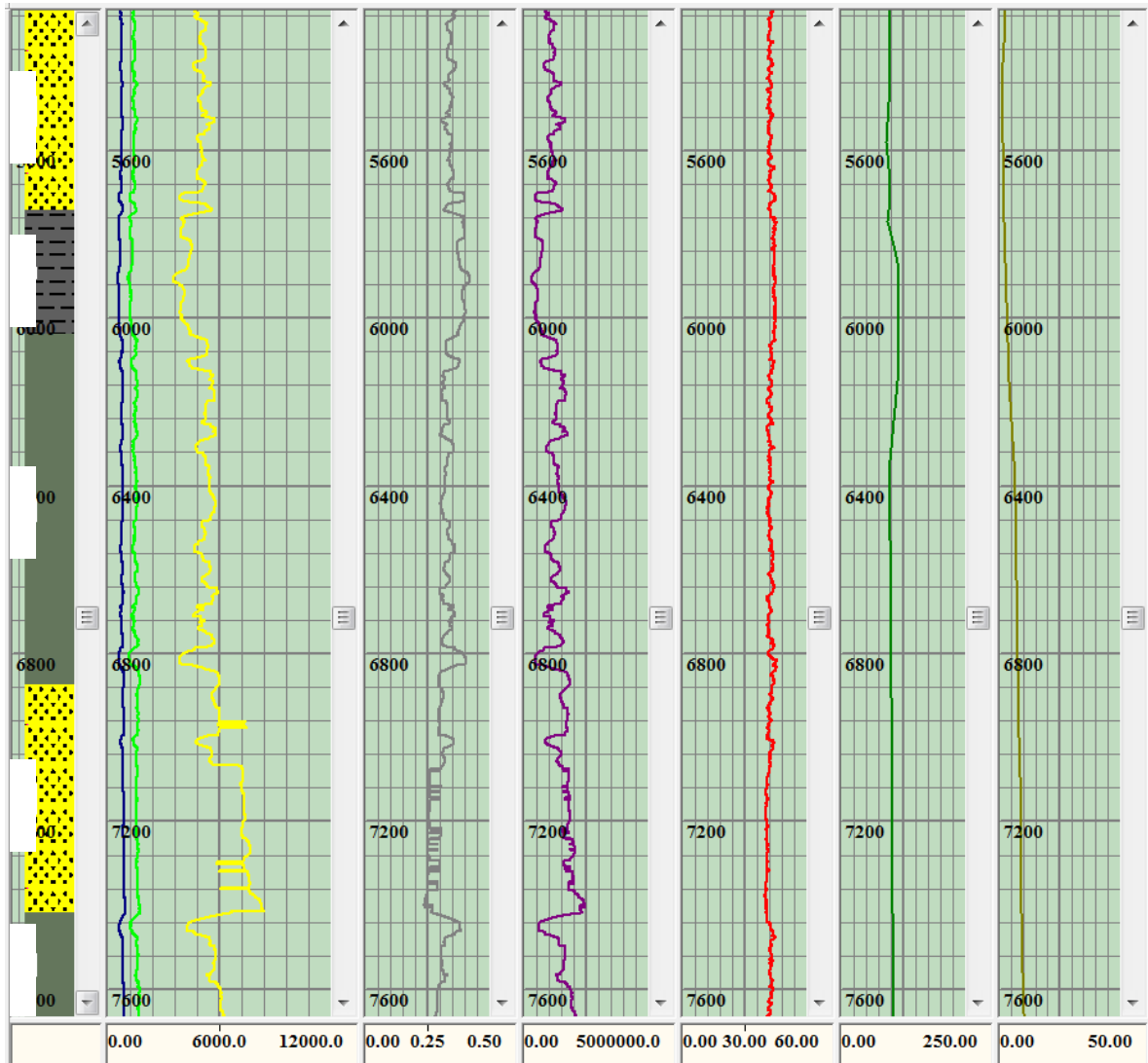
El peso de lodo utilizado para la perforación de la F3b en el campo Apiay se caracteriza por no mantenerse por sobre el valor para la presión de colapso (teóricamente, el peso del lodo debería ser mayor para controlarla):

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de 9.6 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en la unidad (la primera pasa la mayor parte de la unidad con el mismo valor del peso del lodo y la segunda se mantiene por encima del mismo entre 0.7 y 1.7 ppg en todo el trayecto).

- En Apiay B (ver *Figura 31*) el peso de lodo usado fue de 9.65 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en la unidad (al igual que en el pozo A, la presión de poro se iguala al peso del lodo en buena parte de la unidad y la presión de colapso lo supera entre 1 y 2 ppg).
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de entre 10 y 10.1 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (hasta 1.5 ppg por sobre el peso del lodo) pero no para la presión de poro (que se mantiene aproximadamente 1 ppg por debajo del peso de lodo en todo momento) en la unidad.
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de entre 10.7 y 10.9 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (que se encuentra aproximadamente 1 ppg por debajo) pero no el de la presión de colapso en la totalidad de la unidad (esta última se mantiene hasta 1 ppg por encima del valor del peso del lodo).
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de entre 10.8 y 10.9 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso en toda la unidad (ya que esta siempre es mayor o igual al valor de peso de lodo de la F3b). La presión de poro, en cambio, es controlada eficientemente con este peso.
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de entre 10.5 y 10.6 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (aproximadamente 1.4 ppg por debajo, aunque se presentó un pico en esta, igualando al peso del lodo a 5897 ft) e ineficiente para el control de la presión de colapso (que estuvo sobre el peso de lodo 0.75 ppg en casi todo momento) en la unidad.

5.1.3.3 Unidad F3c

Figura 32. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo F. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El miembro F3C está definido como una secuencia de shales y areniscas de grano fino a medio estratificadas (*Salamanca, 2010*). El espesor de F3C en los pozos

analizados del campo Apiay es de entre 761 y 835 ft (el caso de Apiay B y F, respectivamente).

Litológicamente, F3C se caracteriza en este pozo por la presencia de intercalaciones de shales (predominantes) y areniscas. Desde el punto de vista del tamaño de grano, estas intercalaciones no parecen seguir una tendencia definida.

Estas afirmaciones se sustentan en los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en F3C (ver *Figura 32*):

- Los valores en areniscas se encuentran en el rango de los 5600 psi de UCS, y su AFI es de 42 a 44 grados aproximadamente.
- Los valores en shales se ubican en el rango de los 4200 psi de UCS (con un mínimo de 3850 psi) y los 40 grados de AFI en promedio.

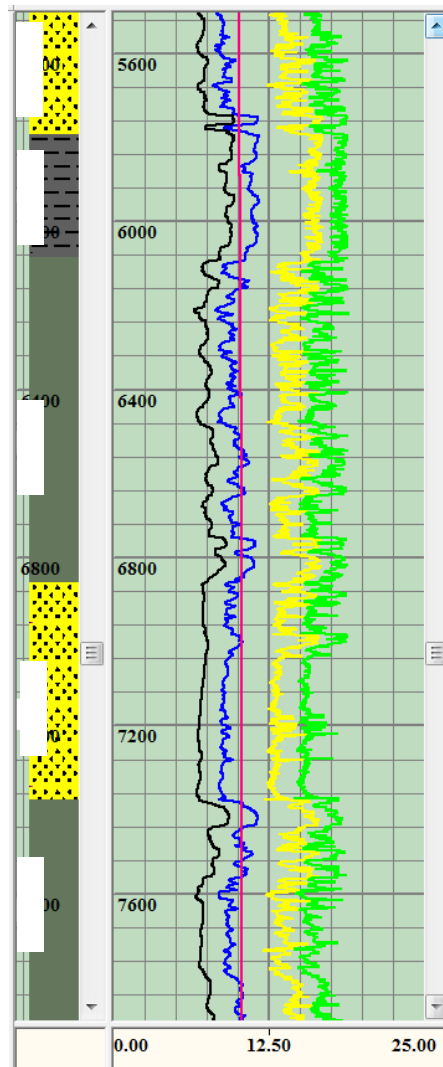
La cohesión de las rocas de la unidad F3C presenta valores de entre 1280 y 1640 psi, sin mostrar una tendencia clara de aumento o decremento a medida que aumentan la presión y la profundidad. Existen picos en la curva, poco diferenciados de la tendencia, para las rocas de grano grueso (valores altos) y para las de grano fino (valores bajos). El comportamiento es similar para los valores de tensión que resiste la roca: varían entre los 600 y los 825 psi, sin evidencia de incremento o decremento proporcional a la presión y la profundidad (con sus respectivos picos en la curva, poco diferenciados de la tendencia: valores altos para litologías con tamaño de grano grueso y viceversa).

Ni módulo de Young ni relación de Poisson en el campo Apiay tienen tendencia al incremento o decremento de acuerdo a la profundidad de la capa de roca. El módulo de Young varía entre 660000 y 1660000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano más gruesos y viceversa), mientras que la relación

de Poisson oscila entre 0.3 y 0.4 (contrario al módulo de Young, los tamaños de grano más gruesos coinciden con los valores más bajos).

Los valores de presión de colapso y presión de poro para F3C mantienen la tendencia de la unidad suprayacente (F3A) al mantenerse la presión de colapso por sobre la de poro en aproximadamente 1.25 ppg por toda la unidad.

Figura 33. Ventana de estabilidad para los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo C, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El peso de lodo utilizado para la perforación de la unidad F3C en el campo Apiay presenta una tendencia explicada en detalle a continuación:

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de 9.7 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso en la unidad (esta sobrepasa al peso del lodo hasta en 1.2 ppg). La presión de poro, por otra parte, se mantiene entre 2 y 2.5 ppg por debajo del peso del lodo.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de 9.7 ppg, siendo este valor, una vez más, teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso en la unidad (al igual que en el pozo A, la presión de colapso sobrepasa al peso del lodo hasta 1.3 ppg). La presión de poro llega a estar 3.2 ppg por debajo del peso de lodo.
- En Apiay C (ver *Figura 33*) el peso de lodo usado fue de entre 10.1 y 10.2 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (hasta 1 ppg por sobre el peso del lodo) pero no para la presión de poro (que se mantiene entre 2.5 y 3 ppg por debajo del peso de lodo en todo momento).
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de entre 11 y 11.2 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (aproximadamente 3.2 ppg por debajo, con riesgo de eventos de pega o perdidas) e ineficiente para el control de la presión de colapso a 6124 ft (momento en los cual esta estuvo 0.5 ppg por encima del peso del lodo).
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de 10.8 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (aproximadamente 2.5 ppg por debajo) e ineficiente para el control de la presión de colapso a 6058 y 6501 ft (momento en los cual esta estuvo 0.5 ppg por encima del peso del lodo).

- En Apiay F el peso de lodo usado fue de entre 10.6 y 10.9 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro y la presión de colapso en todo momento (estas se mantuvieron aproximadamente 2.5 y 0.5 ppg por debajo del peso del lodo, respectivamente).

5.1.3.4 Unidad F3d

Esta unidad está definida como una secuencia de areniscas estratificadas con tamaño de grano grueso (*Salamanca, 2010*). El espesor de F3D (nombre con el que esta unidad será identificada de aquí en adelante) en los pozos estudiados en el campo Apiay varía entre los 516 y los 545 ft (en Apiay C y Apiay D, respectivamente).

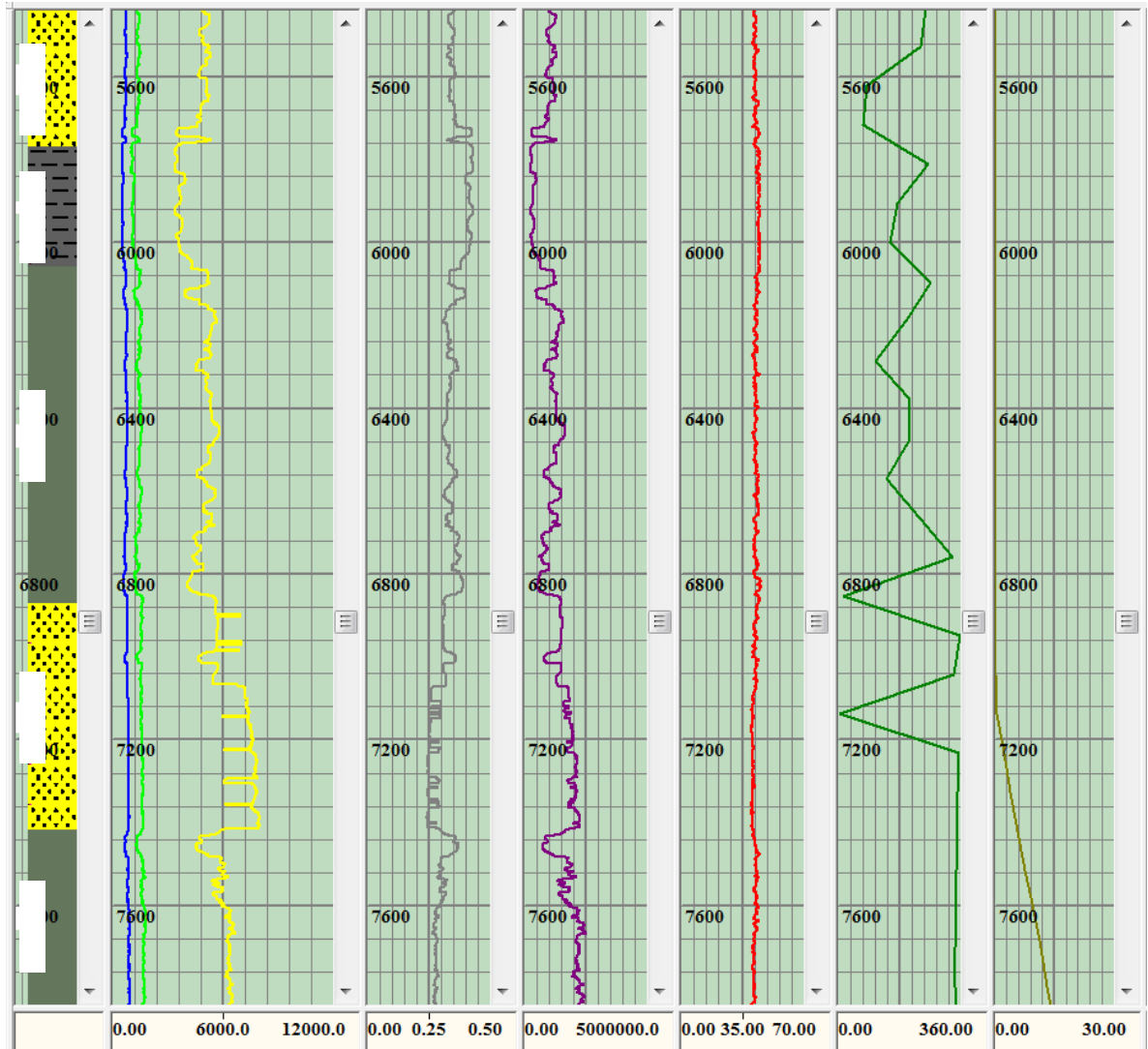
Litológicamente hablando, F3D se caracteriza en el campo Apiay por la predominancia casi total de areniscas (de grano medio a muy grueso). Desde el punto de vista del tamaño de grano, la mayoría de las areniscas de grano más grueso se encuentran en las dos terceras partes inferiores de la unidad (entre la base de esta y los 7064 y 7417 ft, dependiendo de la unidad), siendo el resto de la unidad una sucesión de capas de arenisca de grano medio.

Esto último se sustenta en los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en F3D: Los valores en areniscas varían entre los 5480 y los 7350 psi de UCS y los 41 y 43 grados de AFI (cantidades correspondientes al grano medio y al grano grueso, respectivamente).

La cohesión de las rocas de F3D presenta valores de entre 1275 y 1500 psi, manteniéndose constante con el aumento en presión y profundidad, aunque los valores en la base de F3D son los mayores para la unidad. Con los valores de tensión que resiste la roca el comportamiento es prácticamente igual: varían entre

los 600 y los 825 psi, mostrando una tendencia casi constante a medida que aumenta la presión y la profundidad.

Figura 34. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo D. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.

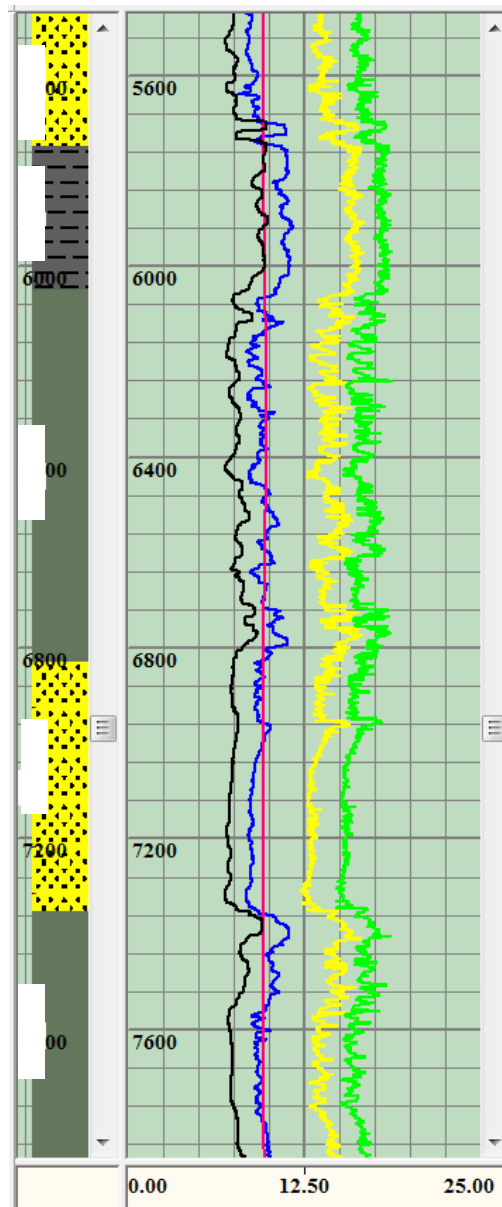


Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El módulo de Young (ver *Figura 34*) para F3D en el pozo manifiesta un incremento bastante apreciable en sus valores a medida que aumenta la profundidad,

contrario a lo que respecta al valor de la relación de Poisson (que decrece al mismo ritmo) en estas areniscas.

Figura 35. Ventana de estabilidad para los miembros F3b, F3c y F3d en el pozo A, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El módulo de Young varía entre 780000 y 2040000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.26 y 0.35 (contrario al módulo de Young, representa los tamaños de grano gruesos con los valores bajos).

Los valores de presión de colapso y presión de poro para F3D muestran un comportamiento único a través de la totalidad de la unidad. La presión de colapso se mantiene siempre por sobre la presión de poro en un promedio de 1.2 ppg en todo momento.

El peso de lodo utilizado para la perforación de F3D en los pozos analizados en el campo Apiay presenta un incremento gradual con la profundidad y se muestra suficiente para controlar la estabilidad de la mayoría de la litología perforada en los seis pozos analizados:

- En Apiay A (ver *Figura 35*) el peso de lodo usado fue de entre 9.5 y 9.6 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso a 6859 y 6964 ft (esta sobrepasa al peso del lodo hasta en 0.4 ppg). La presión de poro, por otra parte, se mantiene entre 2 y 2.2 ppg por debajo del peso del lodo.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de 9.7 ppg, siendo este valor, una vez más, teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso a 7038 y 6927 ft (al igual que en el pozo A, la presión de colapso sobrepasa al peso del lodo hasta 0.5 ppg). La presión de poro llega a estar 1.5 ppg por debajo del peso de lodo.
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de 10.2 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (esta iguala al peso del lodo a 6994 ft) pero no para la presión de poro (que se mantiene entre 3 y 3.2 ppg por debajo del peso de lodo en todo momento).

- En Apiay D el peso de lodo usado fue de entre 11.2 y 11.3 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (aproximadamente 3.2 ppg por debajo, con riesgo de eventos de pega o perdidas) y para el control de la presión de colapso (excepto a 6701 ft, momento en los cual esta fue igual al peso del lodo).
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de 11 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control tanto de la presión de poro como de la presión de colapso (aproximadamente 2.7 y 1.7 ppg por debajo del peso del lodo, respectivamente).
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de entre 10.9 y 11 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro y la presión de colapso en todo momento (excepto a 7005 ft, momento en el que la presión de colapso igualo al peso del lodo).

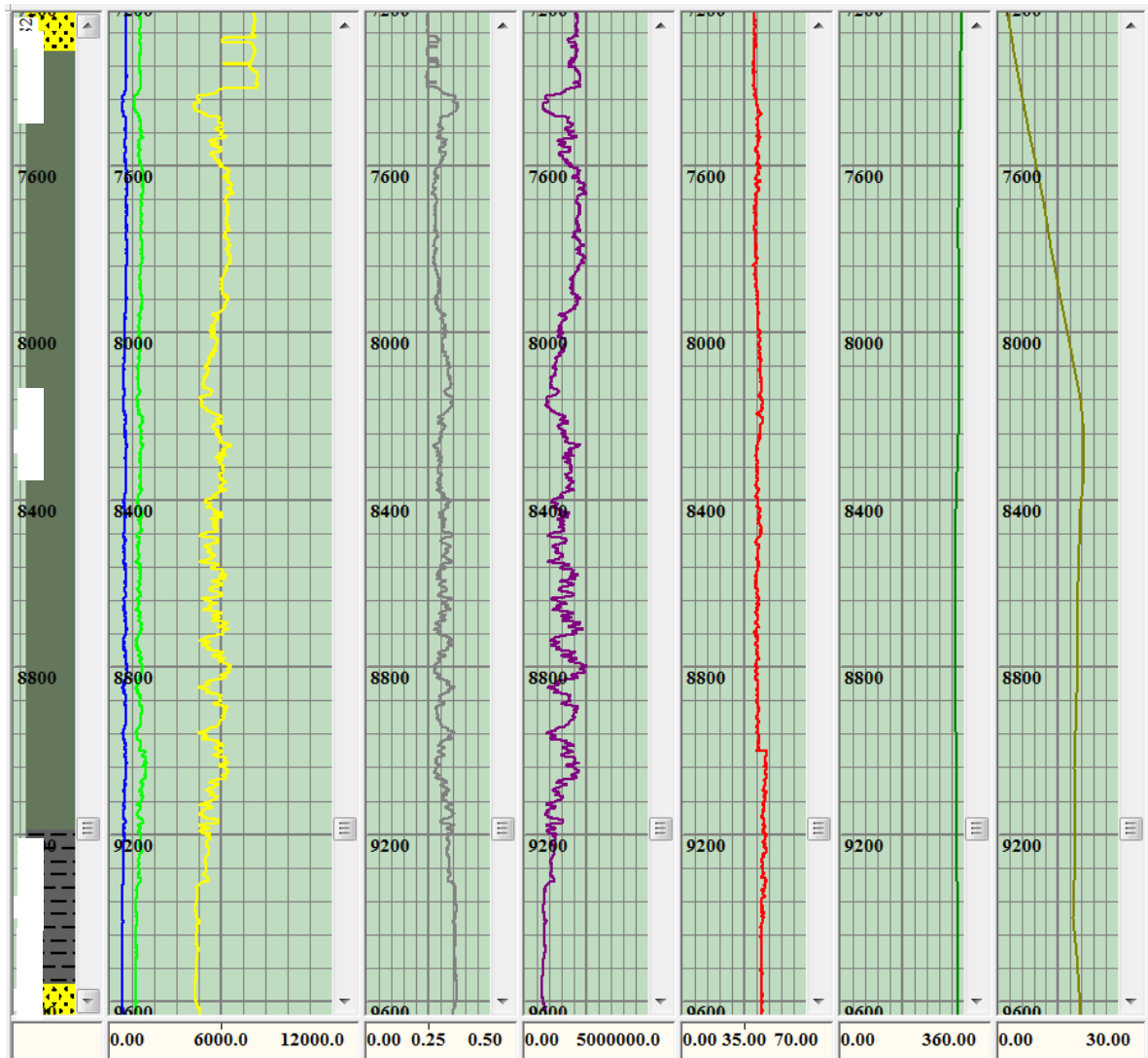
5.1.3.5 Unidad F3e

La unidad F3E, al igual que F3C, está definida como una secuencia de shales y areniscas de grano fino a medio (*Salamanca, 2010*). El espesor de F3E en los pozos analizados del campo Apiay es de entre 1810 y 1909 ft (en el caso de los pozos B y D, respectivamente).

En el plano litológico, F3E se caracteriza en el campo Apiay por la presencia de intercalaciones de shales y areniscas (en ese orden de frecuencia). Desde el punto de vista del tamaño de grano, la parte superior de F3E (entre 7417 y 7936 ft, dependiendo del pozo) presenta predominancia de areniscas, seguidas de una sección con predominancia de shales (entre 7936 y 8163 ft, una vez más dependiendo del pozo) para terminar con intercalaciones desde el final de la mencionada sección hasta la base de la unidad.

Para sustentar las litologías propuestas, se presentan los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en F3E (ver *Figura 36*):

Figura 36. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3e y F3f en el pozo E. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

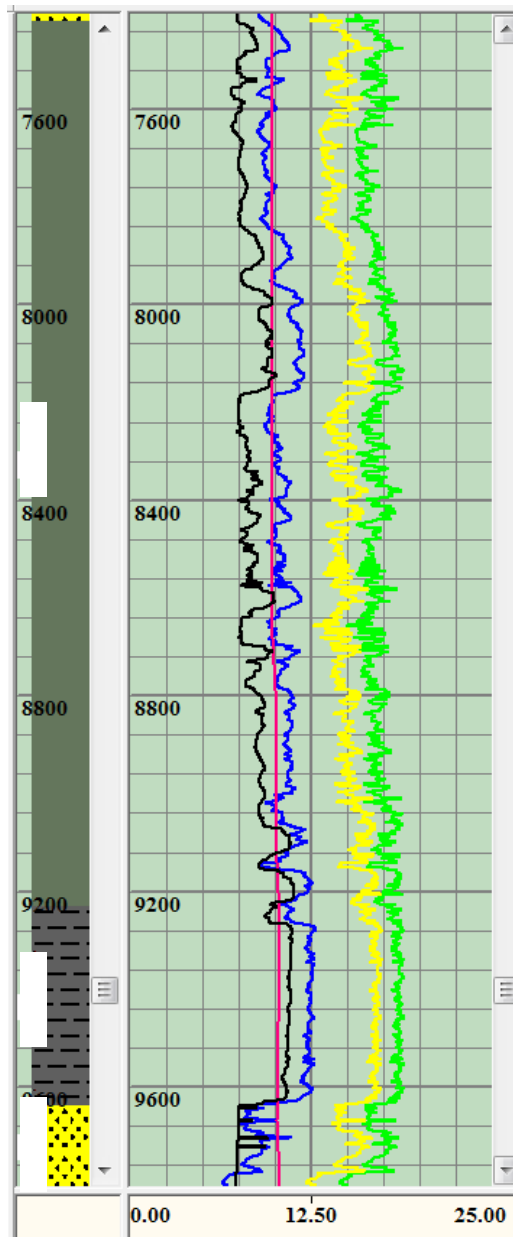
- Los valores en areniscas se encuentran en el rango de los 6400 psi (máximo en 6520 psi) de UCS, y su AFI es de entre 43 y 45 grados aproximadamente.
- Los valores en shales se ubican en el rango de los 4600 psi (mínimo en 4560 psi) de UCS y los 42 grados de AFI en promedio.

La cohesión de las rocas de la unidad F3E presenta valores de entre 1200 y 1875 psi, sin mostrar una tendencia clara de aumento o decremento con la presión y la profundidad. Existen picos en la curva respectiva, algo diferenciados de la tendencia, para las rocas de grano grueso (valores altos) y para las de grano fino (valores bajos). El comportamiento es parecido para los valores de tensión de la roca: varían entre los 600 y los 900 psi (valores menores a los de UCS), sin evidencia de incremento o decremento con la presión y la profundidad (con sus respectivos picos en la curva, algo diferenciados de la tendencia: valores altos para litologías con tamaño de grano grueso y viceversa).

La tendencia local del módulo de Young y la relación de Poisson para la unidad F3E en seis pozos del campo Apiay es al aumento y al decremento, respectivamente. Ambos de forma muy poco perceptible, pero visible a medida que se profundiza en la unidad. El módulo de Young varía entre 720000 y 2280000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.27 y 0.38 (con un comportamiento inverso al del módulo de Young, los tamaños de grano gruesos equivalen a los valores más bajos).

Los valores de presión de colapso y presión de poro para F3E se caracterizan por el dominio de la presión de colapso por sobre la presión de poro (la primera aproximadamente 0.9 ppg por sobre la segunda durante todo el trayecto de la unidad).

Figura 37. Ventana de estabilidad para los miembros F3e y F3f en el pozo B, según el modelo E1.



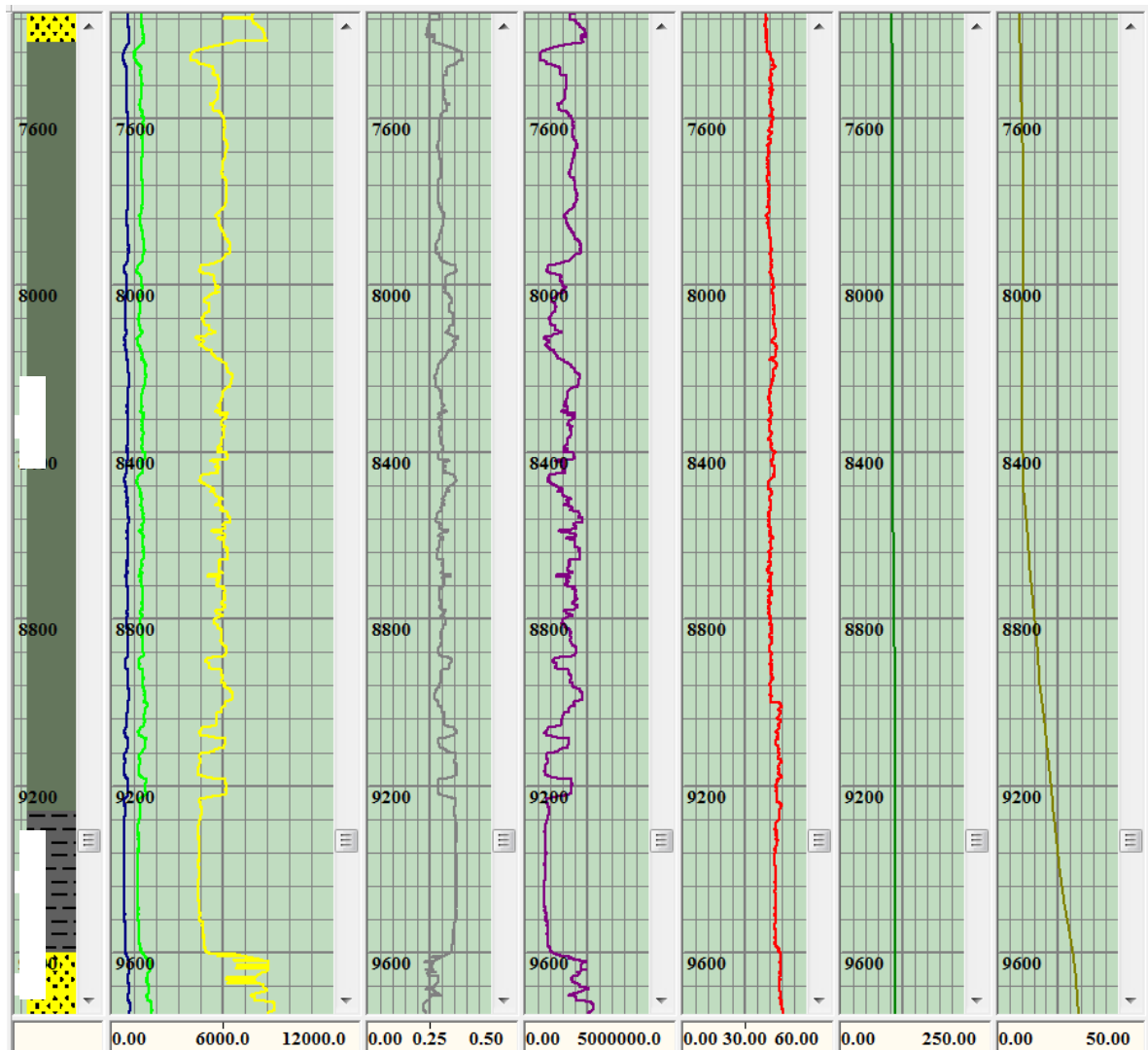
Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El peso de lodo utilizado para la perforación de la unidad F3E en los seis pozos estudiados del campo Apiay tuvo las siguientes características:

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de entre 9.6 y 9.7 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la unidad: la presión de colapso es mayor al peso de lodo en hasta 1.5 ppg (excepto entre 7558 y 7782 ft) y la presión de poro se iguala al peso del lodo desde 9043 ft y hasta la base de la unidad (manteniéndose hasta 2.2 ppg por debajo en el resto de la unidad).
- En Apiay B (ver *Figura 37*) el peso de lodo usado fue de entre 9.7 y 10 ppg, siendo este valor, una vez más, teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (esta sobrepasa al peso del lodo hasta 2 ppg) y el control de la presión de poro (que iguala al peso de lodo en varios tramos de la unidad).
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de entre 10.2 y 10.5 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (esta supera al peso del lodo hasta en 1.8 ppg) pero no para la presión de poro (que se mantiene entre 0.5 y 3.4 ppg por debajo del peso de lodo en todo momento).
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de entre 11.3 y 11.6 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (hasta 3.3 ppg por debajo, con riesgo de eventos de pega o perdidas) pero no para el control de la presión de colapso (que iguala y supera al peso del lodo hasta 0.5 ppg).
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de entre 11.2 y 11.5 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (hasta 3.5 ppg por debajo) pero no para el de la presión de colapso (igualando al peso del lodo y hasta 2 ppg por encima del mismo en algunas zonas de la unidad).
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de entre 11.1 y 11.5 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro, pero no el de la presión de colapso (esta iguala o supera al peso del lodo a 7941, 8124, 8450, 8893 y 9054 ft en hasta 0.5 ppg).

5.1.3.6 Unidad F3f

Figura 38. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3e y F3f en el pozo F. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

La unidad E3 está definida como shale gris oscuro intercalado con arenisca de grano fino (*Salamanca, 2010*). El espesor de la misma en los pozos analizados del campo Apiay es de entre 340 y 407 ft, caracterizándose por la predominancia

absoluta de shales (no hay rastro de las intercalaciones arenosas indicadas en la bibliografía a ningún nivel).

Los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en la F3f corroboran algunas características de la litología que la conforma: Se trata de shales con valores de UCS entre los 4575 y los 4725 psi (cantidades en la tendencia de los shales registrados en la F3b, con valores entre 3520 y 4520 psi) y con un AFI en el rango de los 45 grados para toda la unidad.

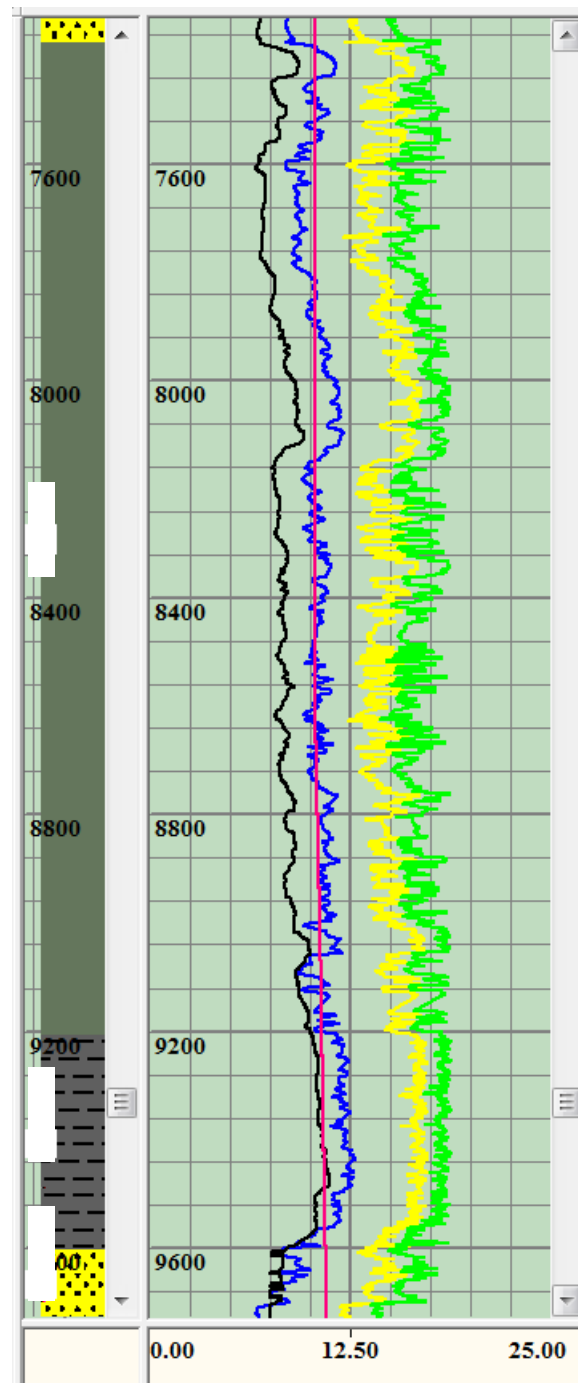
La cohesión de las rocas de F3F (ver *Figura 38*) presenta valores de entre 1425 y 1475 psi, disminuyendo muy gradualmente hasta aproximadamente la mitad de la unidad, punto en el cual vuelve a la tendencia creciente hasta el contacto con las areniscas de F3G.

La tendencia de la tensión que soporta la roca se comporta de manera similar, aunque de forma no tan marcada: varía entre 640 y 680 psi en los pozos estudiados.

El módulo de Young para la F3f en el campo Apiay presenta una tendencia al decremento a medida que aumenta la profundidad, con una recuperación e incremento de la mitad de la misma en adelante y hasta la base de la unidad. Lo contrario ocurre con el valor de la relación de Poisson. El módulo de Young varía entre 660000 y 840000 psi, mientras los valores de Poisson oscilan entre 0.35 y 0.4 (valores correspondientes a shales).

Los valores de presión de colapso y presión de poro en la F3f muestran un comportamiento que se ajusta a una secuencia con predominancia total de shales (como es el caso de la formación F2 o la F3b).

Figura 39. Ventana de estabilidad para los miembros F3e y F3f en el pozo C, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El comportamiento solo varía en el tope y en la base de F3F, la presión de poro presenta valores menores a los de la presión de colapso en la totalidad de la unidad (la diferencia entre una y otra varía entre 1 y 1.5 ppg, dependiendo del pozo).

El peso de lodo utilizado para la perforación de la F3f en los pozos analizados del campo Apiay muestra el siguiente comportamiento:

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de 9.7 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la unidad: la presión de colapso es mayor al peso de lodo en hasta 2.8 ppg y la presión de poro hace lo mismo en hasta 1.4 ppg.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de entre 10.1 y 10.2 ppg, siendo este valor, una vez más, teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso (la primera sobrepasa al peso del lodo hasta 1 ppg y la segunda hace lo mismo en hasta 2.3 ppg).
- En Apiay C (ver *Figura 39*) el peso de lodo usado fue de entre 10.7 y 10.8 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (que supera al peso del lodo hasta en 2 ppg) y para el de la presión de poro (supera al peso del lodo en 0.5 ppg a 9449 ft).
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de 11.6 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (hasta 0.9 ppg por debajo) pero no para el control de la presión de colapso (que iguala y supera al peso del lodo hasta 1 ppg).
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de entre 11.7 y 11.8 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro (hasta 1 ppg por debajo) pero no para el de la presión de colapso (igualando al peso del lodo y hasta 1 ppg por encima del mismo en algunas zonas de la unidad).

- En Apiay F el peso de lodo usado fue de 11.6 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de la presión de poro, pero no el de la presión de colapso (esta iguala o supera al peso del lodo por toda la unidad en hasta 1 ppg).

5.1.3.7 Unidad F3g

Esta unidad está definida como una secuencia areno-lodosa, aunque esta definición varía dependiendo de la zona (*Salamanca, 2010*). El espesor de F3G en el campo Apiay varía entre 164 y 199 ft (para Apiay C y F, respectivamente) en los pozos estudiados.

Litológicamente, F3G se caracteriza en el campo Apiay por la predominancia de areniscas de grano fino a grueso. Desde el punto de vista del tamaño de grano, la parte superior de la unidad (entre 9600 y 9690 ft, dependiendo del pozo) se caracteriza por intercalaciones de arenisca de grano grueso y fino, pero a partir de esta zona y hasta la base de la unidad, predominan las litologías de grano medio a grueso.

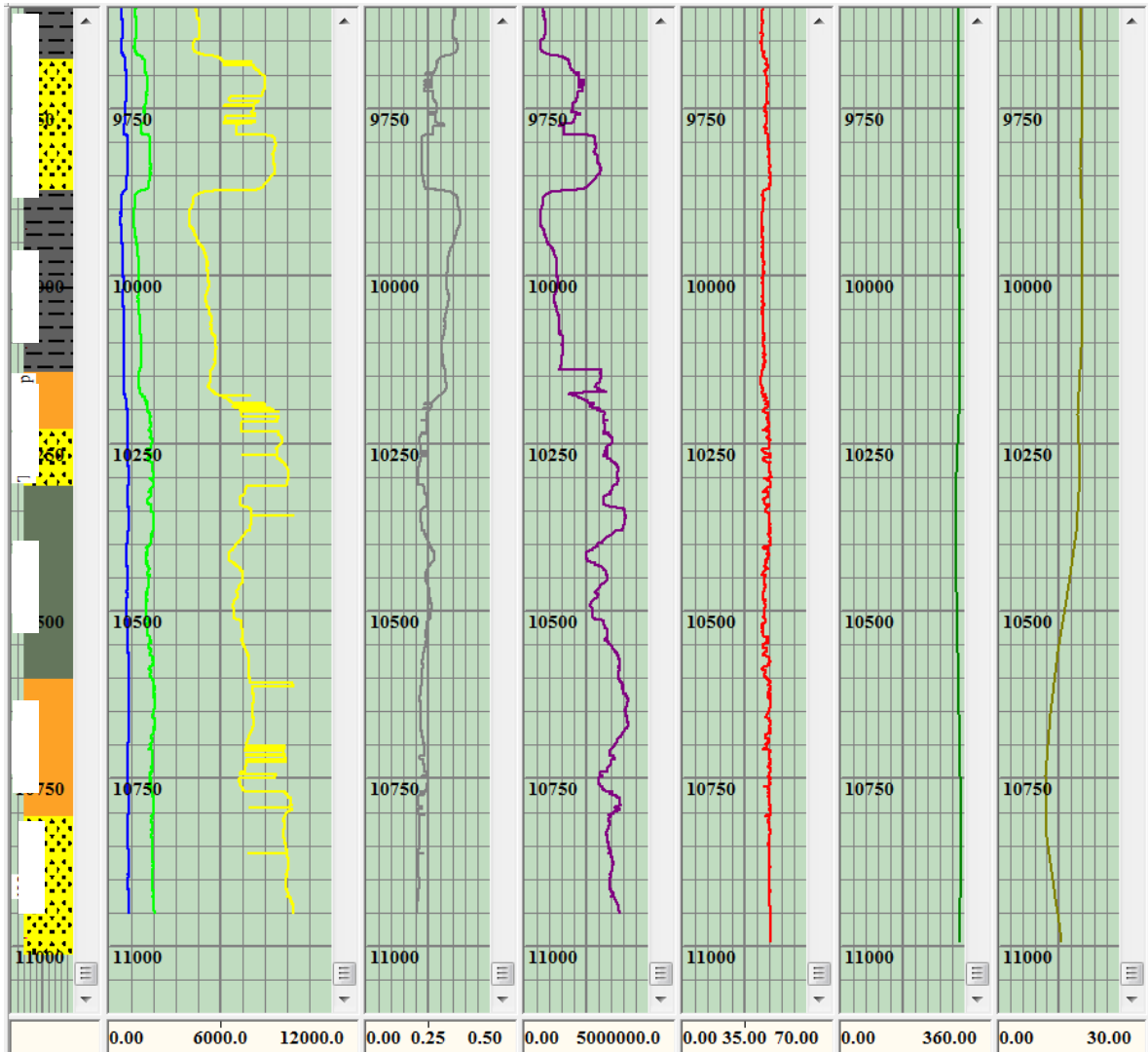
Estas afirmaciones se sustentan en los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en F3G (ver *Figura 40*):

- Los valores en areniscas de grano grueso se ubican en el rango de los 9000 psi y los 48 o 49 grados de AFI.
- Los valores en areniscas grano fino están en el rango de los 6200 psi y los 46 o 47 grados de AFI.

La cohesión de las rocas de F3G presenta valores de entre 1800 y 2175 psi, valores mayores a los presentados por los shales de las unidades que la suprayacen e infrayacen (F3F y F3H, respectivamente). Los valores de tensión

que resiste la roca se comportan de forma similar, aunque no tan marcada: varían entre los 750 y los 950 psi.

Figura 40. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo D. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

El módulo de Young para F3G en el campo Apiay manifiesta un incremento bastante apreciable en sus valores si los comparamos con los de F3F y F3H. El

valor de la relación de Poisson muestra el mismo comportamiento pero a la inversa en estas areniscas. El módulo de Young varía entre 1680000 y 3120000 psi (los valores mas altos en el caso de los tamaños de grano gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.22 y 0.3 (contrario al módulo de Young, representa los tamaños de grano gruesos con los valores bajos).

Los valores de presión de poro y presión de colapso para F3G muestran un cambio en el comportamiento de la estabilidad del pozo, disminuyendo notoriamente con respecto al valor de peso de lodo correspondiente a cada profundidad (la presión de poro llega a estar a 5.5 ppg por debajo, al igual que la presión de colapso).

El peso de lodo utilizado en los seis pozos analizados del campo Apiay fue el siguiente:

- En Apiay A (ver *Figura 41*) el peso de lodo usado fue de 9.7 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la unidad: la presión de colapso es menor al peso de lodo en hasta 3.5 ppg (aunque tuvo un pico 0.3 ppg por encima de este último a 9644 ppg) y la presión de poro hace lo mismo en hasta 3 ppg.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de entre 10.1 y 10.2 ppg, siendo este valor, una vez más, teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (ambas se encuentran por debajo del peso de lodo en hasta 3 ppg, con un único pico en la presión de colapso a 9696 ft).
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de 10.9 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (que son superadas por el valor del peso del lodo hasta en 3.5 ppg) a lo largo de toda la unidad.

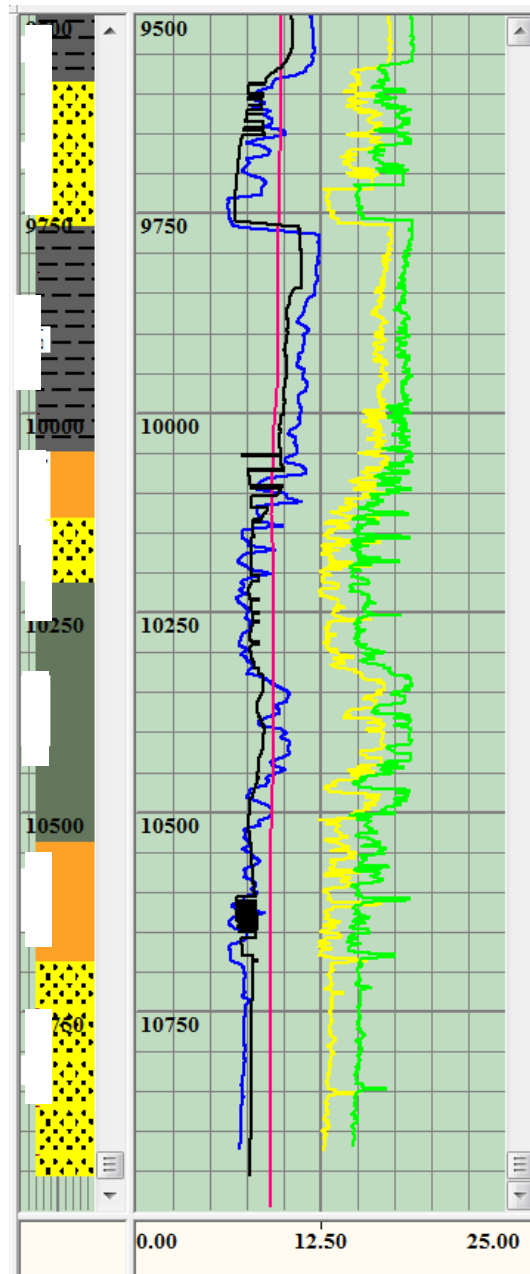
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de 11.7 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso, quizá demasiado alto (hacia la base de la unidad, el valor del peso de lodo se encuentra hasta 5.7 ppg por encima de las presiones, lo que podría ocasionar pérdidas o pegas).
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de 11.7 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso, quizá (al igual que en el pozo D) demasiado alto (hacia la mitad inferior de la unidad, el valor del peso de lodo se encuentra hasta 6.4 ppg por encima de las presiones, lo que podría ocasionar pérdidas o pegas).
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de 11.6 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (aunque la mayor parte de la unidad estas se encuentran muy por debajo del peso del lodo, casi 5.5 ppg).

5.1.3.8 Unidad F3h

La F3h está definida como un shale gris oscuro y masivo (*Salamanca, 2010*). El espesor de la misma en los pozos estudiados del campo Apiay es de entre 266 y 357 ft y se caracteriza por la predominancia absoluta de shales (aunque su tamaño de grano parece registrar algún tipo de variación, aunque sin llegar a un tamaño de grano arenoso en ningún nivel).

Los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en la F3h dan una idea de las características más generales de la litología que la conforma: Se trata de shales con valores de UCS entre los 4650 y los 5925 psi (cantidades en la tendencia de los shales registrados en la F3b y la F3f) y con un AFI en el rango de los 45 grados para toda la unidad.

Figura 41. Ventana de estabilidad para los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo A, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

La cohesión de las rocas de F3H presenta valores de entre 1350 y 1800 psi, manteniendo una tendencia relativamente constante hasta el contacto con F4a. La

tendencia de la tensión que soporta la roca se comporta de manera similar, variando entre 600 y 700 psi.

El módulo de Young para la F3h (ver *Figura 40*) en los pozos analizados en Apiay presenta una tendencia al incremento a medida que aumenta la profundidad. Lo contrario ocurre con el valor de la relación de Poisson. El módulo de Young varía entre 840000 y 1740000 psi, mientras los valores de Poisson oscilan entre 0.3 y 0.35 (valores típicos en shales).

Los valores de presión de poro y presión de colapso en la F3h muestran un comportamiento en el cual el valor de la primera presión se mantiene por debajo del valor de la segunda durante toda la unidad. Estos valores de presión tienen una tendencia decreciente bastante notoria y proporcional al aumento en el tamaño de los granos del shale de la unidad.

El peso de lodo utilizado para la perforación de la F3h en los pozos estudiados en el campo Apiay presenta las siguientes características:

- En Apiay A (ver *Figura 41*) el peso de lodo usado fue de 9.5 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la unidad: la presión de colapso es mayor al peso de lodo en hasta 2.8 ppg y la presión de poro hace lo mismo en hasta 1.6 ppg.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de entre 10.1 y 10.2 ppg, siendo este valor, una vez más, teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso (ambas se encuentran por encima del peso de lodo en hasta 1.6 y 2.8 ppg, respectivamente).
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de 10.9 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso (la primera iguala al peso del lodo y la segunda lo supera hasta 1.5 ppg) a lo largo de toda la unidad.

- En Apiay D el peso de lodo usado fue de 11.7 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (la de poro se mantiene por debajo del peso de lodo hasta 1.5 ppg), ya que esta supera al peso del lodo hasta 2 ppg en algunas zonas de la unidad.
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de 11.8 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (que se mantiene igual o mayor en hasta 0.8 ppg) pero eficiente para el control de la presión de poro (que se mantiene por debajo del peso del lodo hasta 1.8 ppg).
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de 11.8 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (que se mantiene igual o mayor en hasta 0.7 ppg) pero eficiente para el control de la presión de poro (que se mantiene por debajo del peso del lodo hasta 2 ppg).

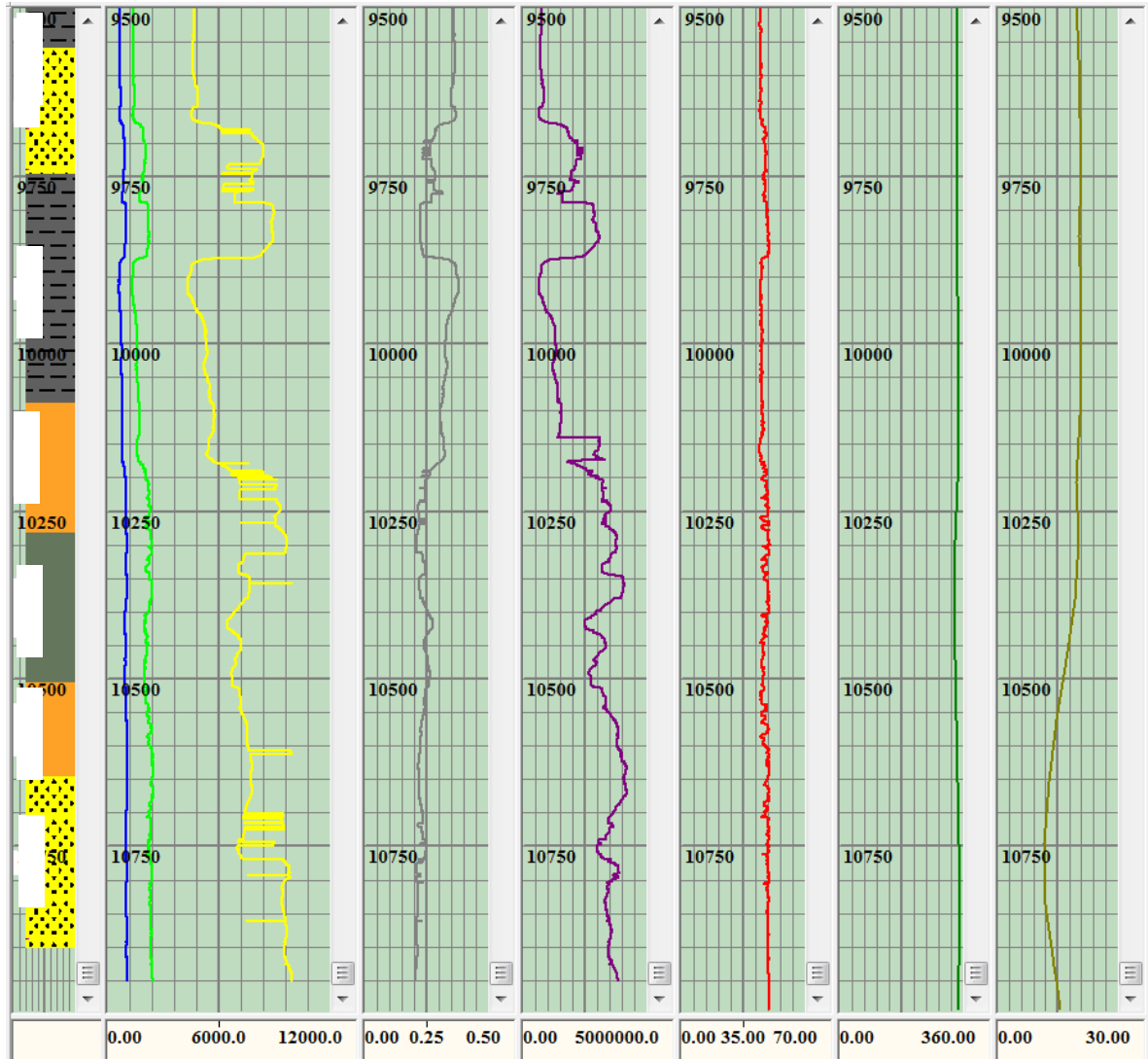
5.1.4 Formación F4

La formación F4 (representada en estos pozos por F4a y F4b) está definida como una secuencia de areniscas de grano fino a grueso y shales (*Salamanca, 2010*). F4 es la única formación en los pozos estudiados que no se registra en algunos de ellos (el caso de F4b en los pozos E y F).

5.1.4.1 Unidad F4a

La unidad F4a es una intercalación de areniscas y shales, con predominancia de litologías de grano relativamente grueso. El espesor de F4a (que se encuentra presente en los seis pozos analizados) es de entre 82 y 193 ft (casos de los pozos B y E, respectivamente).

Figura 42. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3g y F3h y las formaciones F4a, F5 y F6 en el pozo E. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

En el plano litológico, F4a se caracteriza en los seis pozos analizados en el campo Apiay por la presencia de intercalaciones de shales y areniscas (bastante diferenciadas, la parte superior de la unidad es exclusivamente shale y la inferior exclusivamente arenisca). Desde el punto de vista del tamaño de grano, la parte superior de F4a (entre 10157 y 10211 ft) es básicamente shale (con valores de

UCS en el rango de los 5800 psi y un AFI de entre 45 y 47 grados), para luego convertirse en una intercalación de areniscas de grano fino y grueso (con valores de UCS entre los 6680 y los 9360 psi y de AFI entre los 47 y los 50 grados) hasta la base de la unidad (con cambios ligeros dependiendo del pozo).

La cohesión de las rocas de la unidad F4a (ver *Figura 42*) presenta valores de entre 2025 y 2100 psi, con una tendencia clara al aumento a medida que aumentan la presión y la profundidad. El comportamiento es parecido para los valores de tensión de la roca: varían entre los 825 y los 900 psi, una vez más mostrando una tendencia al incremento con el aumento en presión y profundidad.

La tendencia local del módulo de Young y la relación de Poisson para la unidad F4a en los pozos analizados del campo Apiay es al aumento y el decremento, respectivamente. Ambos de forma perceptible a medida que se profundiza en la unidad. El módulo de Young varía entre 2520000 y 3420000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.24 y 0.27 (con un comportamiento inverso al del módulo de Young, los tamaños de grano gruesos equivalen a los valores más bajos).

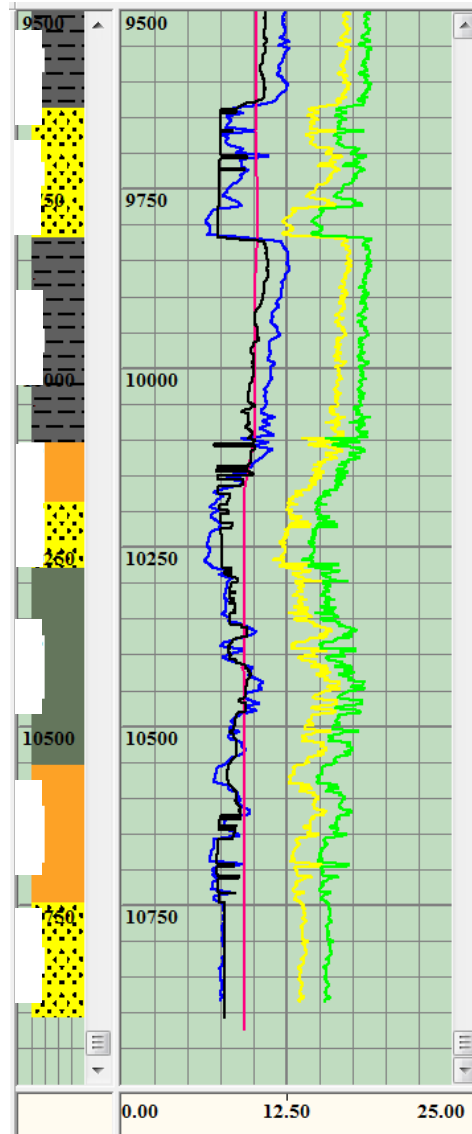
Los valores de presión de colapso y presión de poro para F4a muestran una tendencia difícil de describir, ya que los cambios litológicos que se produce a medida que aumenta la profundidad hacen que los valores de presión de poro y de colapso sean por momentos altos y sin tendencia definida (con porciones dominadas por la presión de colapso y porciones dominadas por la presión de poro) y por momentos súbitamente más bajos, pero también sin tendencia definida, estabilizándose hacia el final de la unidad (en algunos de los pozos).

El peso de lodo utilizado para la perforación de la unidad F4a en los pozos analizados del campo Apiay presenta las siguientes características:

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de 9.1 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la unidad: estas se mantienen entre 1.5 y 2.5 ppg por debajo y por encima del peso del lodo, respectivamente.
- En Apiay B (ver *Figura 43*) el peso de lodo usado fue de entre 9.2 y 9.9 ppg, siendo estos valores teóricamente ineficientes para el control de las presiones de poro (que iguala al peso del lodo) y colapso (que supera a este hasta 2 ppg) hasta la mitad de la unidad (momento en el cual las presiones son controladas parcialmente).
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de entre 8.9 (para la parte inferior) y 10.9 ppg (para la parte superior), siendo el primer valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (que llega a ser 2 ppg más alta que el peso del lodo) y el segundo eficiente para el control tanto de la presión de poro como de la de colapso (aunque esta última iguala al peso del lodo en un tramo).
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de entre 9.5 (para la parte inferior) y 11.9 ppg (para la parte superior), siendo el primer valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (con un pico 0.5 ppg por sobre el peso del lodo a 10198 ft) y el segundo eficiente para el control tanto de la presión de poro como de la de colapso (aunque esta última casi supera el valor del peso del lodo en un tramo).
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de entre 9.5 (para la parte inferior) y 11.9 ppg (para la parte superior), siendo ambos valores teóricamente eficientes para el control de las presiones de poro y colapso (con una zona de transición inestable pero rápidamente controlada a 10125 ft).
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de entre 8.9 (para la parte inferior) y 11.8 ppg (para la parte superior), siendo ambos valores teóricamente eficientes para el control de las presiones de poro y colapso (con una zona de transición inestable pero rápidamente controlada a 10170 ft).

5.1.4.2 Unidad F4b

Figura 43. Ventana de estabilidad para los miembros F3h y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo B, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

La unidad F4b está conformada en su totalidad por areniscas con diverso tamaño de grano. El espesor de F4b, que de los seis pozos se encuentra en cuatro (Apiay A, B, C y D) varía entre los 80 y 98 ft (casos de los pozos A y C, respectivamente).

Litológicamente, F4b se caracteriza en el campo Apiay por la predominancia de areniscas de grano fino a grueso. Desde el punto de vista del tamaño de grano, la parte superior de la unidad se caracteriza por intercalaciones de arenisca de grano diverso, pero a partir de esta zona y hasta la base de la unidad, predominan las litologías de grano grueso.

Estas afirmaciones se sustentan en los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en F4b (ver *Figura 42*):

- Los valores en areniscas de grano grueso se ubican en el rango de los 9300 psi y los 49 grados de AFI.
- Los valores en areniscas grano fino están en el rango de los 7450 psi y los 47 grados de AFI.

La cohesión de las rocas de F4b presenta valores de entre 2171 y 2300 psi, con una tendencia bastante constante. Los valores de tensión que resiste la roca se comportan de forma similar: se encuentran en el rango de los 970 psi.

El módulo de Young para F3G en el campo Apiay manifiesta un incremento bastante apreciable en sus valores si los comparamos con los de la unidad suprayacente. El valor de la relación de Poisson muestra el comportamiento contrario en estas areniscas. El módulo de Young varía entre 2600000 y 3500000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.2 y 0.23 (contrario al módulo de Young, representa los tamaños de grano gruesos con los valores bajos).

Los valores de presión de poro y presión de colapso para F4b muestran un cambio en el comportamiento de la estabilidad del pozo, disminuyendo notoriamente con respecto al valor de peso de lodo correspondiente a cada profundidad (la presión

de poro se mantiene a 1.5 ppg por debajo y la presión de colapso fluctúa entre 2.5 y 0 ppg menos que el peso del lodo).

El peso de lodo utilizado en los cuatro pozos analizados del campo Apiay en los cuales se presenta esta unidad fue el siguiente:

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de 9.2 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la unidad: la presión de colapso es menor al peso de lodo en hasta 2 ppg (con un pico por sobre este a 10141 ft) y la presión de poro hace lo mismo en hasta 1.5 ppg.
- En Apiay B (ver *Figura 43*) el peso de lodo usado fue de 9.2 ppg, siendo este valor, una vez más, teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (ambas se encuentran por debajo del peso de lodo).
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de 8.9 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (que son superadas por el valor del peso del lodo hasta en 1.5 ppg) a lo largo de toda la unidad, con excepción de un pico en la presión de colapso a 10154 ft (2.5 ppg por sobre el peso del lodo).
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de 9.5 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso a excepción de unos picos en los valores de esta última a 10257 ft y 10280 ft (hasta 1 ppg por encima del peso del lodo).

5.1.5 Formación F5

La formación F5 (representada en estos pozos por F5a y F5b) está definida como una secuencia de areniscas de tamaño de grano diverso y shales (*Salamanca, 2010*). Las dos unidades que conforman a F5 en Apiay se diferencian por la

litología predominante en las intercalaciones, siendo shales en el caso de la parte superior y areniscas en el caso de la parte inferior.

5.1.5.1 Unidad F5a

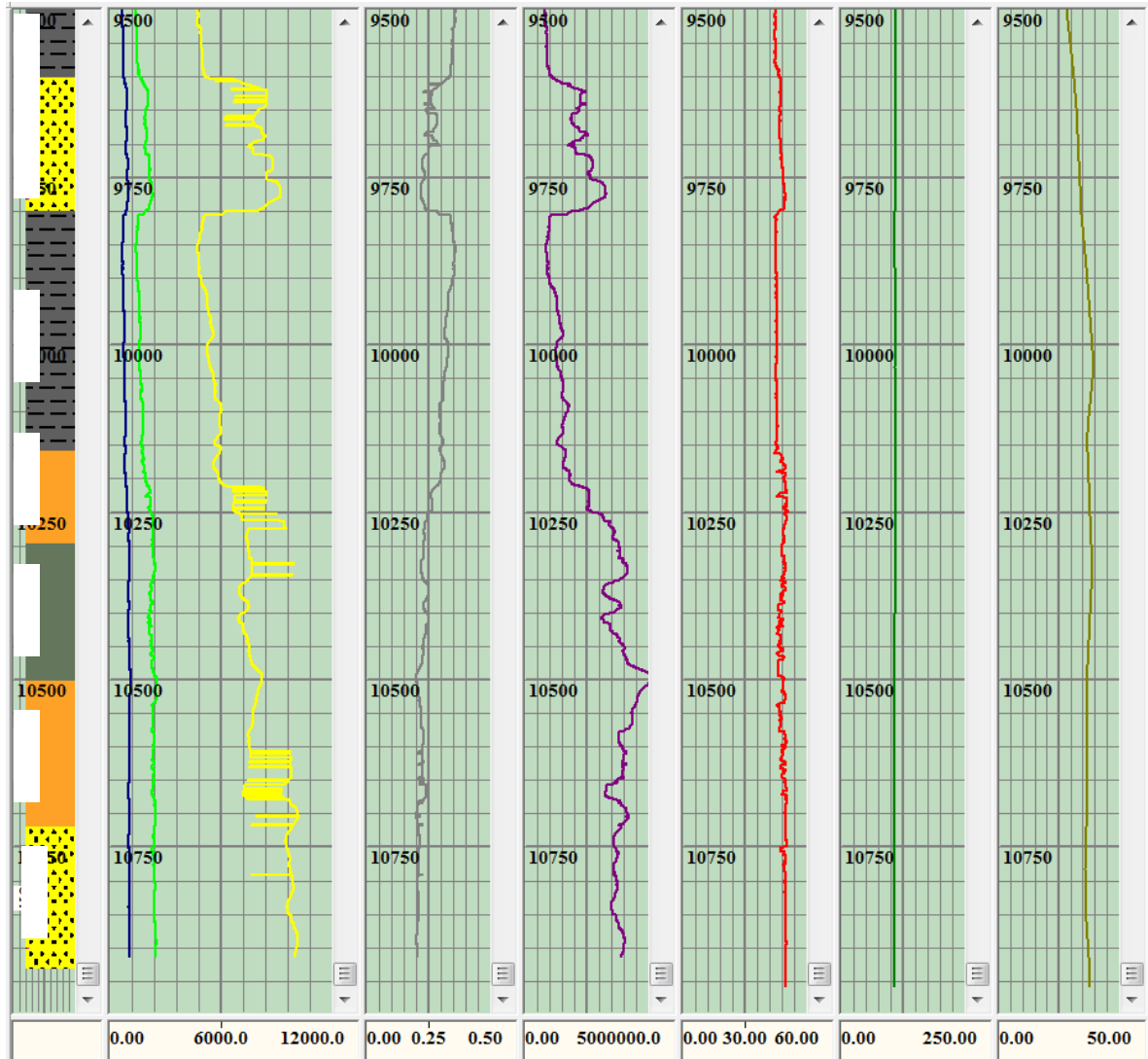
La unidad F5a está definida como una secuencia de shales y areniscas de grano fino a grueso (*Salamanca, 2010*). El espesor de F4a en el campo Apiay es de entre 204 y 320 ft (espesores de Apiay F y A, respectivamente).

Litológicamente, F5a se caracteriza en los pozos estudiados del campo Apiay por la presencia de intercalaciones de shales y areniscas bien diferenciadas (como ocurre también en F4a): la parte superior de la unidad (del tope hasta entre 10350 y 10415 ft aproximadamente, dependiendo del pozo) es una sucesión de areniscas de grano muy fino con intercalaciones de areniscas de grano grueso y la parte inferior, hasta la base, se compone casi en su totalidad de shales (con la aparición de arena de grano muy fino esporádicamente y entre 10385 y 10392 ft, dependiendo del pozo).

Los valores de UCS en F5a (ver *Figura 44*) están en el rango de los 6900 y los 9900 psi (para tamaños de grano muy finos tipo shale y gruesos tipo arenisca, respectivamente). El ángulo de fricción interna de estas rocas está en el rango de los 38 grados para shales y entre 45 y 47 grados para areniscas.

La cohesión de las rocas de la unidad F5a presenta valores de entre 2100 y 2350 psi, sin una tendencia clara definida, sea al aumento o al decremento. El comportamiento es parecido para los valores de tensión de la roca: varían entre los 900 y los 1000 psi, una vez más sin mostrar una tendencia clara definida.

Figura 44. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3g y F3h y las formaciones F4a, F5 y F6 en el pozo F. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

La tendencia local del módulo de Young y la relación de Poisson para la unidad F4a en los pozos analizados del campo Apiay es al aumento y el decremento (con marcados altibajos en la curva), respectivamente. Ambos de forma perceptible a medida que se profundiza en la unidad. El módulo de Young varía entre 3060000 y 4080000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano gruesos y

viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.22 y 0.25 (con un comportamiento inverso al del módulo de Young, los tamaños de grano gruesos equivalen a los valores más bajos).

Los valores de presión de colapso y presión de poro para F5a muestran una tendencia poco ordenada, sin el dominio claro de una presión por sobre la otra durante un intervalo determinado, aunque la presión de poro tiende a ser dominante en la mitad superior de la unidad, mientras que en la mitad inferior ocurre lo contrario (la presión de colapso pasa a ser dominante).

El peso de lodo utilizado para la perforación de la unidad F5a en los pozos analizados del campo Apiay se comporta de la siguiente manera:

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de entre 9.1 y 9.2 ppg, siendo estos valores teóricamente ineficientes para el control de la presión de colapso en la mitad inferior de la unidad: esta se mantiene hasta 1.2 ppg por sobre el peso del lodo.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de 9.2 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso, que se ubica hasta 1.5 ppg por sobre el peso del lodo en distintos intervalos, dependiendo del pozo. La presión de poro fue controlada satisfactoriamente (excepto por algunos intervalos en los que igualo en valor al peso del lodo.
- En Apiay C (ver *Figura 45*) el peso de lodo usado fue de 8.9 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (que llega a ser 2.3 ppg más alta que el peso del lodo en la parte mas critica). La presión de poro vuelve a ser controlada satisfactoriamente, aunque en algunos puntos igualo en valor al peso del lodo.
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de 9.5 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (que llega a ser 1 ppg más alta que el peso del lodo en la parte inferior de la unidad). La

presión de poro vuelve a ser controlada satisfactoriamente, aunque en un punto (a 10420 ft) igualo en valor al peso del lodo.

- En Apiay E el peso de lodo usado fue de 9.4 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de las presiones de poro y colapso en un intervalo entre 10350 y 10442 ft.
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de 8.9 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (entre 10390 y 10479 ft, con máximos 1 ppg por sobre el peso del lodo). La presión de poro se mantiene controlada.

5.1.5.2 Unidad F5b

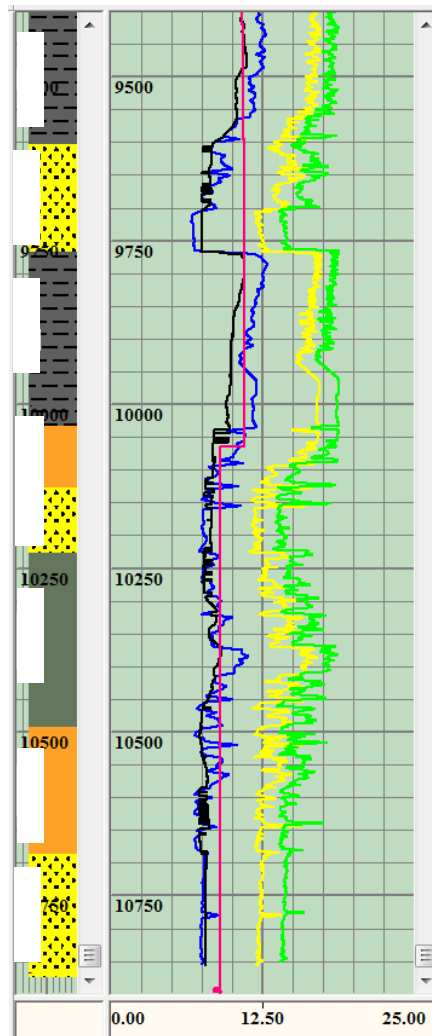
La unidad F5b está definida como una secuencia de areniscas de grano medio y shales (*Salamanca, 2010*). El espesor de F5b en el campo Apiay varía entre 139 y 217 ft (para el caso de los pozos E y F, respectivamente).

En el plano litológico, F5b se caracteriza en los pozos estudiados del campo Apiay por la presencia de intercalaciones de areniscas y shales, tal y como lo indica la bibliografía. Con respecto al tamaño de grano, la parte superior de F5b está conformada por shale en su totalidad (con valores de UCS en el rango de los 7600 psi y un AFI de entre 42 y 43 grados), para luego convertirse en una intercalación de areniscas de grano medio y shales (con valores de UCS entre los 7520 y los 10120 psi y de AFI en el rango de los 38 grados para los shales y los 47 grados para las areniscas de grano medio) hasta la base de la unidad.

La cohesión de las rocas de la unidad F5b presenta valores de entre 2250 y 2400 psi, manteniéndose una tendencia relativamente constante a medida que aumentan la presión y la profundidad. El comportamiento es parecido para los valores de tensión de la roca: varían entre los 975 y los 1000 psi, con la misma

tendencia constante al ritmo del aumento en presión y profundidad. En ambos casos, los valores más bajos corresponden a shales y los más altos a areniscas.

Figura 45. Ventana de estabilidad para los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo C, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

La tendencia local del módulo de Young y la relación de Poisson para la unidad F5b (ver *Figura 44*) en el campo Apiay es al decremento y a una tendencia bastante constante, respectivamente. En el caso del módulo de Young es más perceptible a medida que se profundiza en la unidad. Este último varía entre

3180000 y 4560000 psi (los valores más altos en el caso de los tamaños de grano gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.2 y 0.24 (con un comportamiento contrario al del módulo de Young, los tamaños de grano gruesos equivalen a los valores más bajos).

Los valores de presión de colapso y presión de poro para F5b muestran tendencias bien diferenciadas en cada pozo y relacionadas directamente a los cambios litológicos que se producen a distintas profundidades: los shales muestran presiones de colapso que dominan por sobre la presión de poro y las intercalaciones no muestran predominancia de alguna presión sobre la otra, pero si un comportamiento bastante errático en los valores de presión de poro (que fluctúan entre 6.8 y 8.1 ppg).

El peso de lodo utilizado para la perforación de F5b de los pozos analizados en el campo Apiay, a diferencia de las presiones de colapso y poro, no presenta cambios bruscos a ningún nivel:

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de 9.1 ppg, siendo estos valores teóricamente eficientes para el control de las presiones de poro y colapso a lo largo de toda la unidad: estas se mantienen hasta 2.5 ppg por debajo del peso del lodo.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de 9.2 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso, que se ubican hasta 2 ppg por debajo del peso del lodo. Sin embargo, existe un punto a 10618 ft en el cual la presión de colapso se encuentra 0.7 ppg por sobre el peso del lodo.
- En Apiay C (ver *Figura 45*) el peso de lodo usado fue de 8.9 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (que llega a ser 1.5 ppg más alta que el peso del lodo en la parte más

critica). La presión de poro vuelve a ser controlada satisfactoriamente (manteniéndose hasta 1.5 ppg por debajo del peso del lodo).

- En Apiay D el peso de lodo usado fue de 9.5 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (con picos hasta 1 ppg por sobre el peso del lodo). La presión de poro vuelve a ser controlada satisfactoriamente en la totalidad de la unidad.
- En Apiay E el peso de lodo usado fue de 9.4 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso en la totalidad de la unidad.
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de 8.9 ppg, siendo este valor teóricamente ineficiente para el control de la presión de colapso (entre 10532 y 10574 ft, con máximos 1 ppg por sobre el peso del lodo). La presión de poro se mantiene controlada.

5.1.6 Formación F6

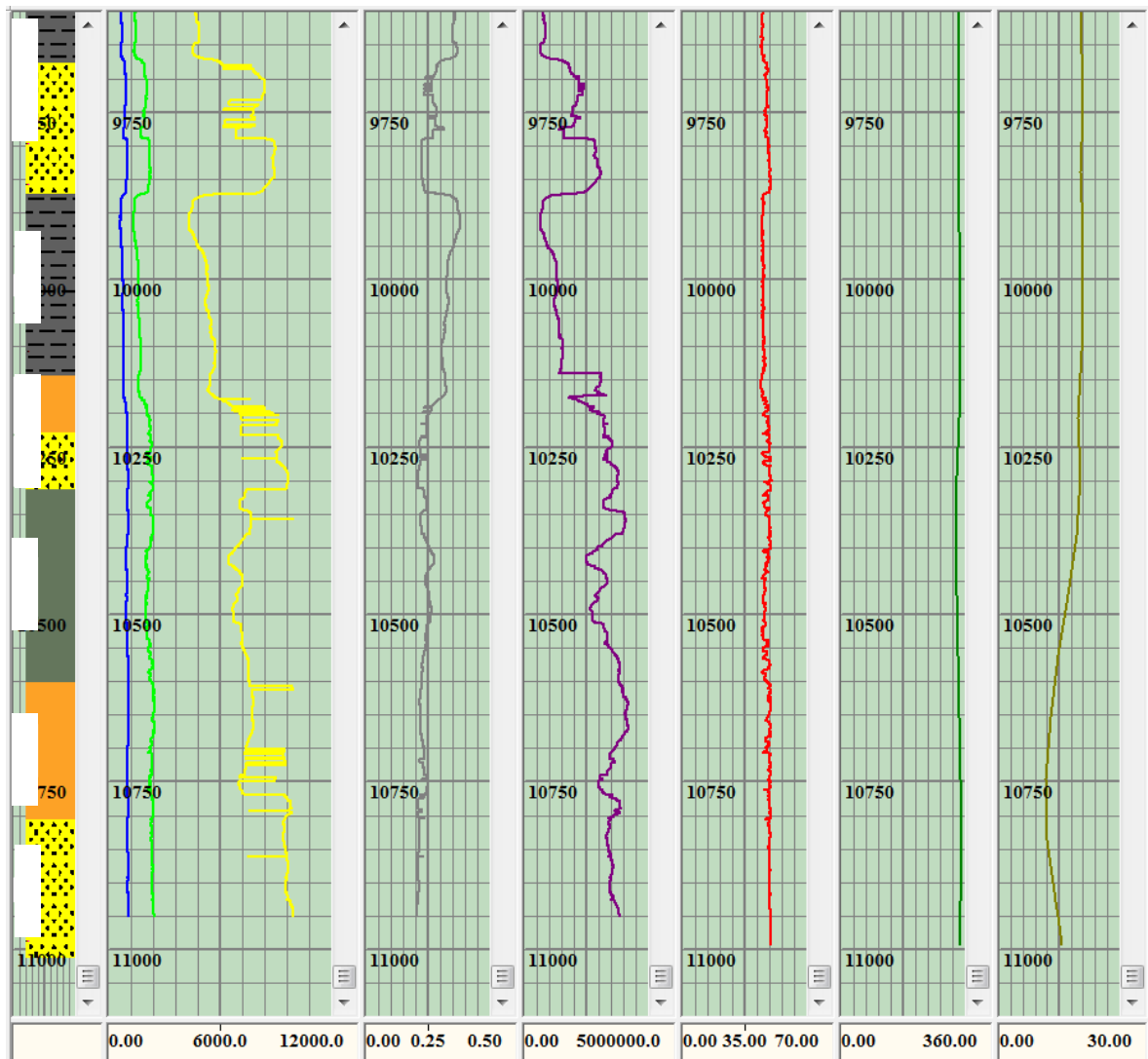
La formación F6 (conocida como F6) está definida como una secuencia arenosa en su totalidad (*Salamanca, 2010*).

El espesor de F6 en los pozos estudiados no es fácil de determinar, ya que la base de los pozos se encuentra en esta formación. Sin embargo, teniendo en cuenta este detalle, en los pozos trabajados del campo Apiay la profundidad medida para F6 es de entre 159 y 269 ft (para los pozos B y A, respectivamente).

Litológicamente, la formación F6 se caracteriza en los pozos analizados en el campo Apiay por la predominancia total de areniscas (de grano medio con una pequeña capa de lo que parece ser grano fino, dependiendo del pozo).

Desde el punto de vista del tamaño de grano, la totalidad de la formación (a excepción de una capa en algunos pozos) se caracteriza por la aparición de arenisca de grano medio.

Figura 46. Comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas de los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo D. También se aprecian el azimut y la inclinación del mismo.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

Estas afirmaciones se sustentan en los valores de UCS y ángulo de fricción interna (AFI) en F6 (ver *Figura 46*):

- Los valores en areniscas de grano medio se ubican en el rango de los 9700 psi y los 46 grados de AFI.
- El valor de la capa de arenisca de grano fino es de 7560 psi y los 45 grados de AFI.

La cohesión de las rocas de la formación F6 presenta valores de entre 2250 y 2300 psi (la tendencia es bastante constante hasta el fondo del pozo). Los valores de tensión que resiste la roca se comportan de forma similar, aunque no tan marcada: varían entre los 750 y los 1050 psi.

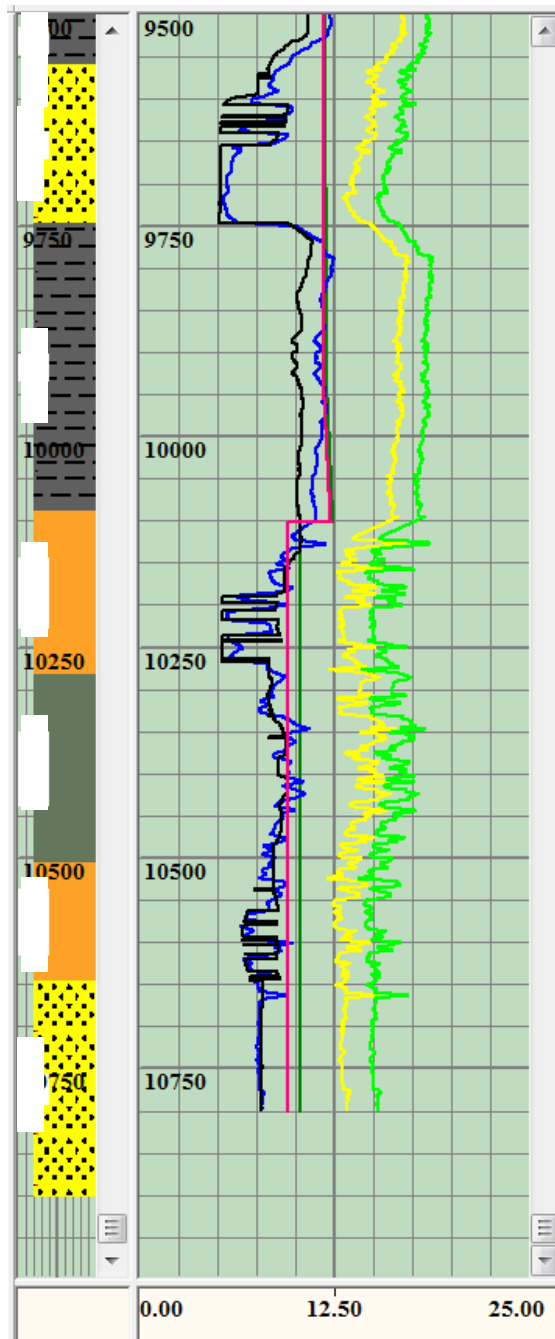
El módulo de Young para F6 en los pozos analizados del campo Apiay manifiesta otra tendencia relativamente constante en sus valores. El valor de la relación de Poisson muestra el mismo comportamiento.

El módulo de Young varía entre 3420000 y 3900000 psi (los valores mas altos en el caso de los tamaños de grano gruesos y viceversa), mientras que la relación de Poisson oscila entre 0.2 y 0.21 (contrario al módulo de Young, representa los tamaños de grano gruesos con los valores bajos).

Los valores de presión de colapso y presión de poro para la formación F6 muestran una vez más, una tendencia relativamente constante cuyo mayor cambio con respecto al resto del pozo es el dominio de la presión de poro por sobre la de colapso (la diferencia entre ambas es de aproximadamente 0.5 ppg).

El peso de lodo utilizado en la perforación de la formación controla las presiones de poro y colapso sin inconvenientes:

Figura 47. Ventana de estabilidad para los miembros F3g y F3h y las formaciones F4, F5 y F6 en el pozo E, según el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- En Apiay A el peso de lodo usado fue de 9 ppg, siendo estos valores teóricamente eficientes para el control de las presiones de poro y colapso a lo largo de toda la formación: estas se mantienen hasta 2 ppg por debajo del peso del lodo.
- En Apiay B el peso de lodo usado fue de 9.2 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso, que se ubican hasta 1.5 ppg por debajo del peso del lodo.
- En Apiay C el peso de lodo usado fue de 8.9 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (que se mantienen 1.5 ppg por debajo del peso del lodo en prácticamente toda la formación).
- En Apiay D el peso de lodo usado fue de 9.5 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso (que se mantienen hasta 2 ppg por debajo del peso del lodo).
- En Apiay E (ver Figura 47) el peso de lodo usado fue de 9.3 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso en la totalidad de la formación (manteniéndose 1.7 ppg por debajo del peso del lodo en todo momento).
- En Apiay F el peso de lodo usado fue de 8.9 ppg, siendo este valor teóricamente eficiente para el control de las presiones de poro y colapso en toda la formación (estas se mantienen a 1.5 ppg por debajo del peso del lodo).

Como conclusión respecto al comportamiento de las propiedades mecánicas de las rocas y las presiones que estas soportan en el campo Apiay, se puede afirmar que existen tendencias definidas en sus valores dependiendo básicamente de la litología (sea esta tipo arenisca o tipo shale, ver *Tabla 5*) a lo largo de los seis (6) pozos estudiados.

Tabla 5. Comportamiento de los valores de las propiedades mecánicas de las rocas y las presiones que estas soportan en los pozos analizados del campo Apiay. Tales comportamientos aplican a nivel de formación.

PROPIEDADES MECANICAS Y PRESIONES	LITOLOGIA	
	ARENISCA	SHALE
Angulo de Friccion Interna	Alto	Bajo
UCS	Alto	Bajo
Cohesion	Alta	Baja
Resistencia a la Tension	Alta	Baja
Relacion de Poisson	Baja	Alta
Modulo de Young	Alto	Bajo
Presion de Poro	Baja	Alta
Presion de Colapso	Baja	Alta
Presion de Fractura	Baja	Alta

5.2 REGIMENES INDIVIDUALES

Para la validación de regímenes de esfuerzos individuales (pozo por pozo) se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros con el fin de otorgar una descripción más clara y efectiva:

- Los cambios puntuales de régimen de esfuerzo (intervalos de 1 ft o menos) no fueron tomados en cuenta a menos de que se presentase más de uno de ellos en menos de 10 ft.
- Tampoco fueron tomados en cuenta los cambios de régimen si los esfuerzos implicados (el vertical y el horizontal máximo en todos los casos) no tenían una diferencia de al menos 0.5 ppg en sus magnitudes.

Por otra parte, se presentaron tres (3) posibles configuraciones de datos para interpretación al momento de validar los regímenes y sus respectivos esfuerzos:

1. En los intervalos en los cuales ambos modelos (E1 y E2) presentaron un mismo régimen de esfuerzos, se determinó este último como el régimen válido para tal intervalo.
2. En los intervalos en los cuales se presentaban cambios de régimen entre modelos pero no se contaba con información de eventos, no se realizó la validación de regímenes por insuficiencia de datos.
3. En los intervalos en los cuales se presentaban cambios de régimen entre modelos y se contaba con información de eventos, se procedió a realizar una validación del régimen a partir de la comparación de los modelos de estabilidad (conformados por la presión de poro, la presión de colapso y el peso del lodo) en busca del que se ajustase a los eventos ocurridos en tal intervalo.

Como observación previa a la descripción de los pozos analizados, el modelo E2 se caracteriza en la totalidad de estos últimos por mostrar un régimen transcurrente a cualquier profundidad a la que se mida. Es el modelo E1 el que presenta diferencias en el régimen de esfuerzos a distintas profundidades (de régimen transcurrente a régimen normal en todos los casos), por lo cual siempre que se citen cambios en los esfuerzos se estará hablando de este modelo.

Igualmente, todo intervalo no mencionado en la descripción es considerado bajo la influencia de un régimen de esfuerzos transcurrente (debido a que se trata de intervalos en los cuales ambos modelos presentaron el mismo régimen de esfuerzos, como se explica en el numeral 1 de las posibles configuraciones de datos a analizar).

El análisis realizado a continuación mostro la existencia de puntos comunes en la totalidad de los pozos analizados:

1. La configuración de los esfuerzos y las presiones según el modelo E1 parece estar influenciada por la litología o litologías presentes en cada formación (los valores de presión de poro, presión de colapso y los esfuerzos horizontales tienden a disminuir en areniscas y a aumentar en shales).
2. Existen lugares comunes en los cuales el modelo E1 muestra cambio de régimen transcurrente a normal: las unidades F3D y F3G (esta última hacia su base), las secciones inferiores de la formación F4 y la formación F5 y finalmente, la totalidad de la formación F6.
3. La configuración de los esfuerzos del modelo E2 no presenta cambios a ninguna profundidad en ninguno de los pozos analizados, su régimen se mantiene como transcurrente sin tener en cuenta cambios litológicos o de presiones.

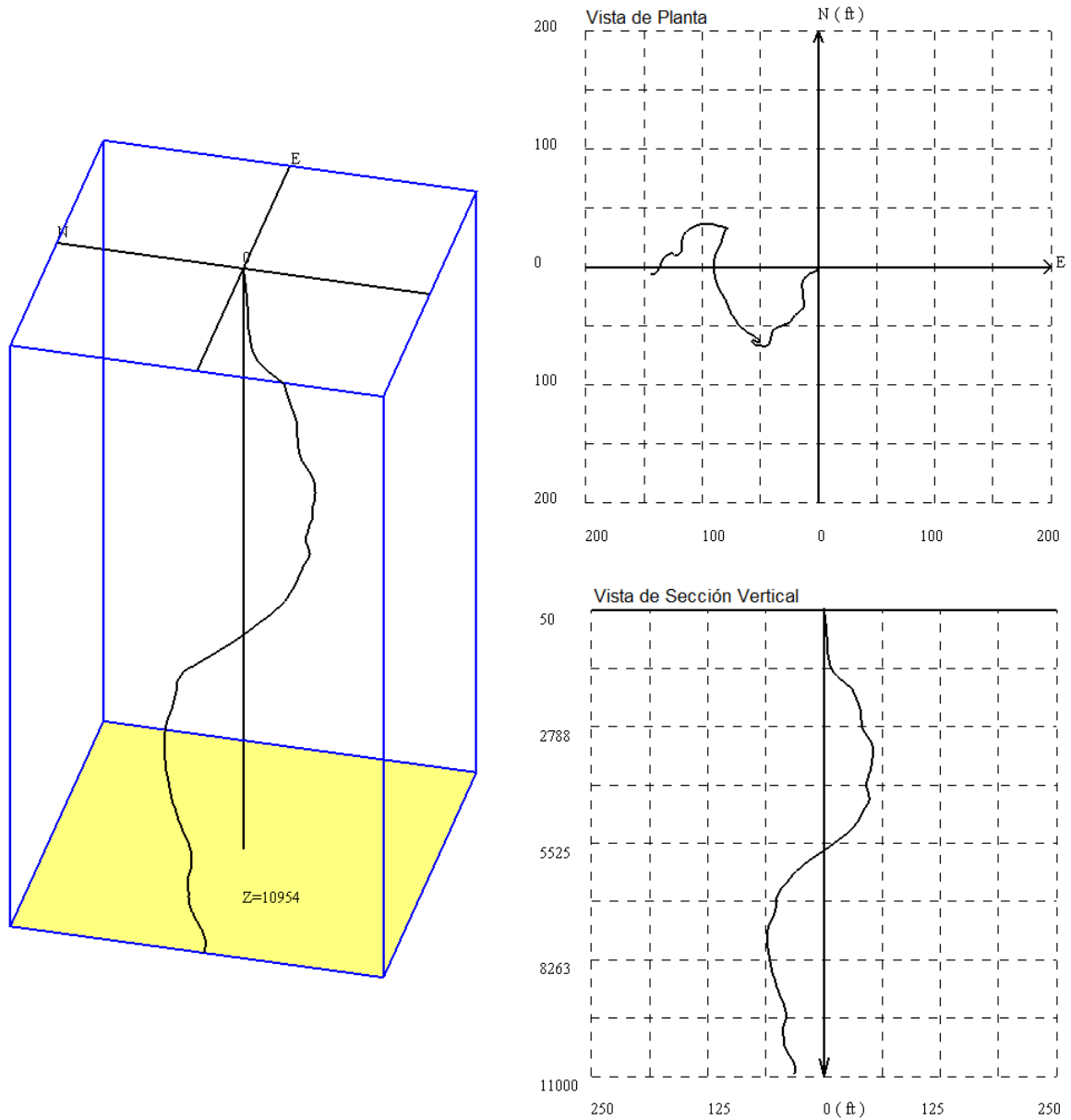
5.2.1 Apiay A

El pozo Apiay A se encuentra ubicado al noreste del campo Apiay, a 981 ft sobre el nivel del mar. La longitud del pozo es de 10960 ft a una profundidad máxima de 10957 ft y su trayectoria es bastante desviada (ver *Figura 48*) ya que sus valores de azimut varían sustancialmente. Su inclinación, por otra parte, es relativamente baja (no supera los 5 grados en ningún punto). A continuación se analizarán los puntos e intervalos en los cuales se presentaron variaciones en la configuración de los regímenes de esfuerzos (ver *Figura 49* y *Figura 50*):

- Este pozo presenta un régimen de esfuerzos transcurrente desde la superficie hasta 6428 ft (unidad F3C, formación F3). Desde este punto y hasta 6441 ft el modelo E1 muestra un cambio de régimen transcurrente a régimen normal de esfuerzos. Posterior a este intervalo, el régimen vuelve a comportarse como transcurrente, hasta otro intervalo entre 6615 y 6638 ft (en el que ocurre lo mismo que entre 6428 y 6441 ft). Debido a que en

estos intervalos (todos al interior de la unidad F3C) no se presentaron eventos de perforación, no se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos.

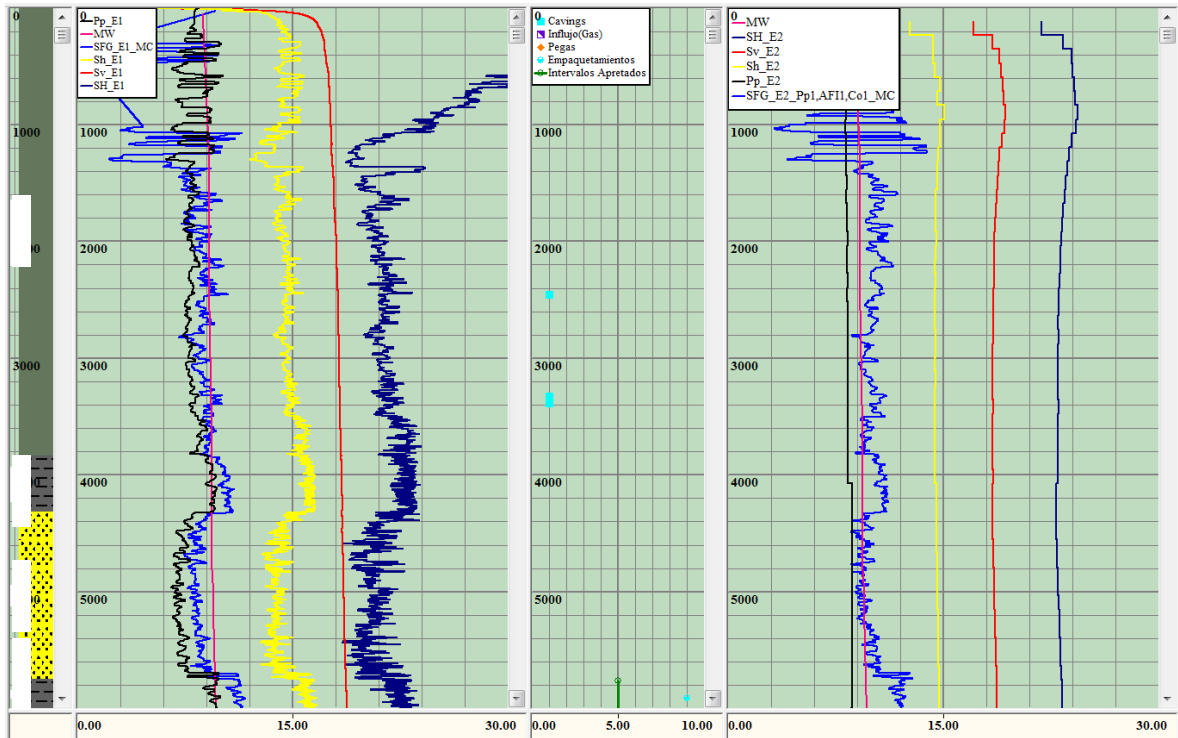
Figura 48. Esquema tridimensional del pozo A, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- Posterior al segundo intervalo con cambio de régimen de esfuerzos de F3C, se encontró otro intervalo (entre 7030 y 7349 ft) al interior de la unidad F3D (formación F3) en el cual el modelo E1 muestra un cambio de régimen transcurrente a régimen normal. En esta ocasión tampoco se presentaron eventos de perforación dentro del intervalo, por lo que no se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos.

Figura 49. Sección superior del pozo A. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- Dentro de la unidad F3E (formación F3) se presentaron cambios bastante puntuales pero considerables en el régimen de esfuerzos según el modelo E1 (de transcurrente a normal) a 7710, 8613, 8641 y 8665 ft. Una vez más, no se presentaron eventos de perforación dentro del intervalo, por lo que no

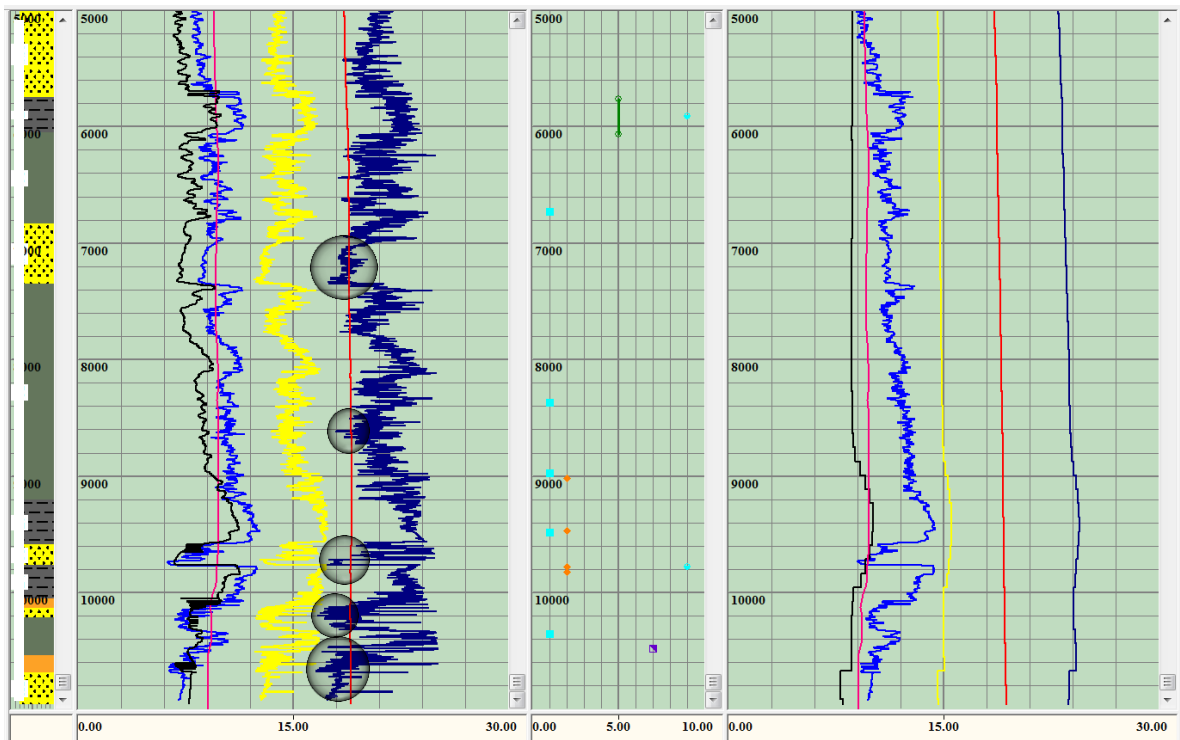
se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos.

- A nivel de la unidad F3G (entre 9718 y 9761 ft) se presentó otro cambio de régimen de esfuerzos en el modelo E1 (de transcurrente a normal). A poca distancia de este intervalo (9779 ft) se presentaron dos eventos de pozo (una pega de tubería y un empaquetamiento), por lo que se determinó que el régimen válido en este intervalo era el correspondiente a E1 (régimen normal), ya que en este se muestra un amplio diferencial entre la presión de poro (6.6 ppg) y el peso del lodo (9.6 ppg), el cual es generador de este tipo de eventos.
- Entre las formaciones F4b y F5a se presentó un intervalo (comprendido entre 10115 y 10318 ft) en el cual el régimen de esfuerzos cambió una vez más en el modelo E1. En esta ocasión se presentó un evento de *cavings* (a 10350 ft), por el cual se dio por válido el modelo E1 ya que la presión de colapso (10.3 ppg) y el peso del lodo por debajo de esta (9.3 ppg) mostrados en este último ajustan con la naturaleza del evento presentado.
- Aun dentro de la formación F5a existe otro intervalo (entre 10458 y 10474 ft) en el que el modelo E1 vuelve a mostrar cambio de régimen transcurrente a régimen normal. Se presentó un evento de influjo de gas solo unos pies más debajo de este intervalo (a 10480 ft), por lo que se determinó que el modelo que mejor calibraba con las características del evento era el correspondiente a E2, en el cual la presión de poro (8.5 ppg) y el peso del lodo (9.1 ppg) se encuentran relativamente cerca y la ocurrencia de eventos como el mencionado es bastante posible.
- Finalmente, entre las formaciones F5a y F6 (en el intervalo entre 10507 y 10957 ft) ocurrió otro cambio en el régimen de esfuerzos del modelo E1 (de

transcurrente a normal), pero no se presentaron eventos con los cuales realizar la validación del régimen de esfuerzos a tal profundidad.

- No se pudo determinar un régimen de esfuerzos único para la totalidad del pozo A ya que se validaron dos regímenes distintos a diversas profundidades. Igualmente, no se puede entregar una conclusión definitiva al respecto del dominio de un régimen u otro, ya que hubo intervalos en los cuales la carencia de eventos no permitió realizar validación alguna.

Figura 50. Sección inferior del pozo A. Se aprecian los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.

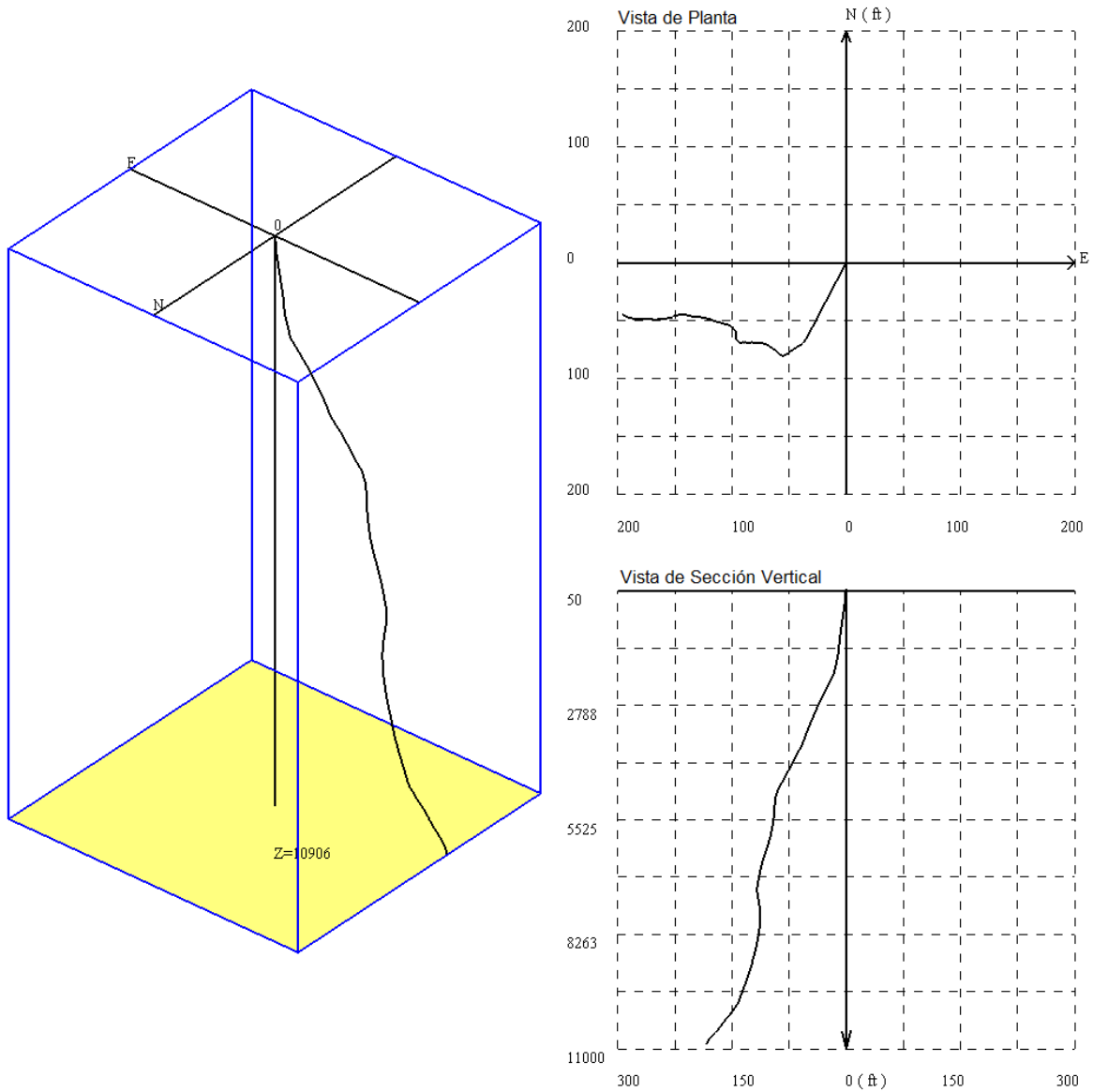


Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

5.2.2 Apiay B

El pozo Apiay B se encuentra ubicado al noreste del campo Apiay, a 974 ft sobre el nivel del mar.

Figura 51. Esquema tridimensional del pozo B, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

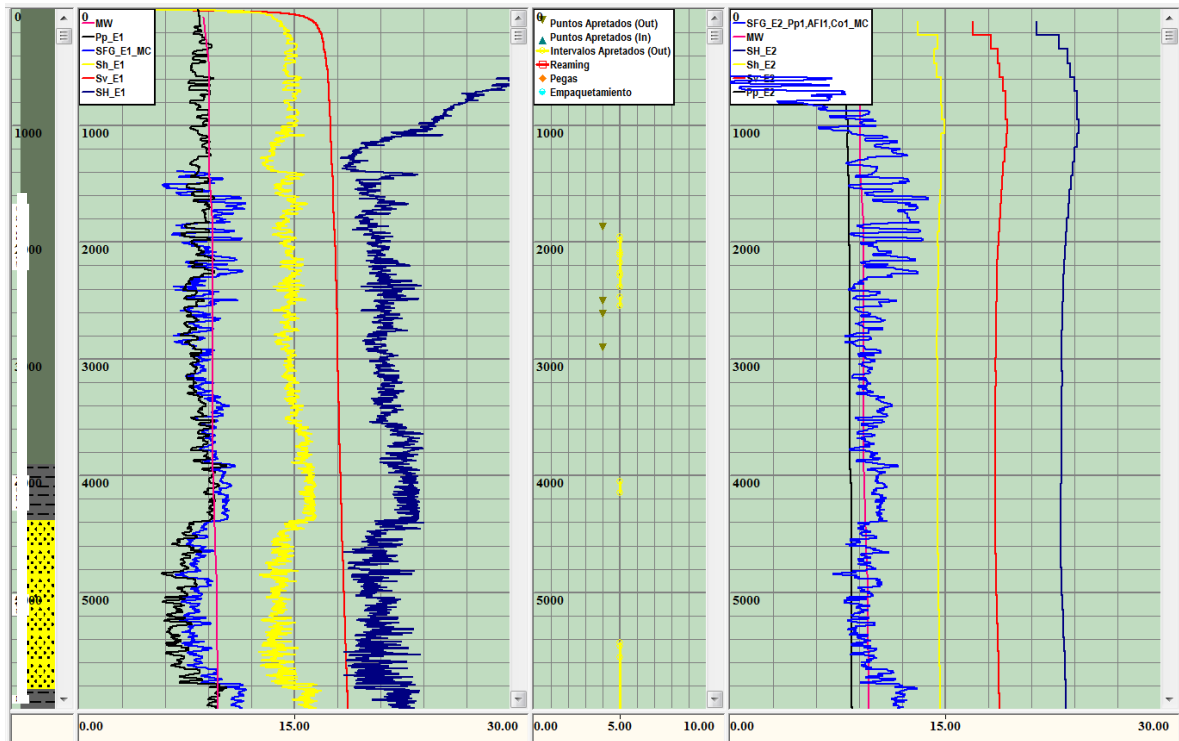
La longitud del pozo es de 10910 ft a una profundidad máxima de 10907 ft y su trayectoria esta relativamente poco desviada de la vertical.

La orientación del pozo es suroeste (ver *Figura 51*). A continuación se analizaran los puntos e intervalos en los cuales se presentaron variaciones en la configuración de los regímenes de esfuerzos (ver *Figura 52* y *Figura 53*):

- Este pozo presenta un régimen de esfuerzos transcurrente desde la superficie hasta 6506 ft (unidad F3C, formación F3). En este punto y los presentados a 6517, 6700, 6707 y 6785 ft de profundidad se presenta un cambio de régimen de esfuerzos en el modelo E1 (de transcurrente a normal). En ninguno de los puntos antes mencionados se presentaron eventos de perforación, por lo cual no se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos y se procedió a la realización de los siguientes con el fin de encontrar tramos en los cuales la aparición de eventos fuese la base de la validación de regímenes de esfuerzos según resultados de estabilidad de pozo en el campo Apiay, del piedemonte llanero.
- Posterior a estos puntos en los cuales se presentaron cambios de régimen de esfuerzos según el modelo E1, se presentó un intervalo entre 7109 y 7417 ft (al interior de la unidad F3D, formación F3) en el cual hubo otro cambio en la configuración de los esfuerzos de E1 e igualmente no se presentaron eventos de perforación a tal nivel, por lo que no se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos.
- A 7680 ft (unidad F3E, formación F3), el modelo E1 mostro cambios en el régimen de esfuerzos (de transcurrente a normal). Se presentó un punto apretado a este nivel (7681 ft), por lo que se determinó que el modelo E2 ajusta correctamente a tal evento (presión de colapso de 11.5 ppg y peso

de lodo de 9.7 ppg, cuya configuración pudo contribuir a la generación del punto apretado).

Figura 52. Sección superior del pozo B. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).



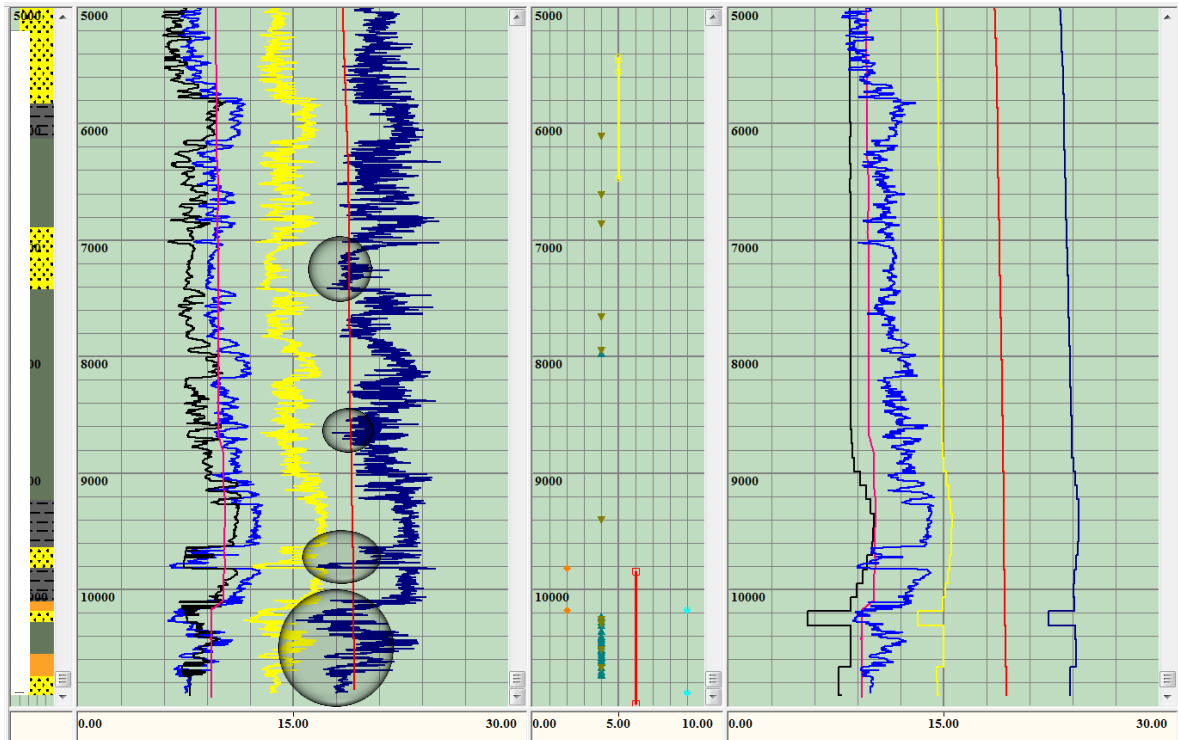
Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- Aun al interior de la unidad F3E (formación F3) se presentaron otros cambios bastante puntuales pero considerables en el régimen de esfuerzos según el modelo E1 (de transcurrente a normal) a 7733, 7773, 7820, 8302, 8449, 8548, 8655, 8678 y 8702 ft. Una vez más, no se presentaron eventos de perforación dentro del intervalo, por lo que no se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos.
- A nivel de la unidad F3G (entre 9774 y 9814 ft) se presentó otro cambio de régimen de esfuerzos en el modelo E1 (de transcurrente a normal). Se

presentó una pega de tubería a 9818 ft, por lo que se determinó como válido el modelo E1 debido al amplio diferencial existente entre su presión de poro (7.3 ppg) y su peso de lodo (10.2 ppg), típico generador de pegas.

- Entre las formaciones F4a y F5a se presentó un intervalo (comprendido entre 10167 y 10353 ft) en el cual el régimen de esfuerzos cambió una vez más en el modelo E1. En esta ocasión se presentaron un evento de pega de tubería y un empaquetamiento (ambos a 10176 ft) y numerosos puntos apretados (tanto entrando como saliendo). Se determinó que el modelo de mayor ajuste con estos eventos era el E2, debido al amplio diferencial entre la presión de poro (5.5 ppg) y el peso del lodo (9.3 ppg), que podría haber generado la pega de tubería.
- Entre las formaciones F5a e Inferior, el modelo E1 presenta cambios de régimen (de transcurrente a normal) a 10380, 10390 ft y en los intervalos comprendidos entre 10400 y 10408, 10513 y 10520 y finalmente 10553 y 10593 ft. Se determinó que el régimen que mejor se ajustaba era el correspondiente al modelo E1, ya que se observaron puntos apretados a profundidades en las cuales la presión de colapso de este modelo (10.7 ppg) se encuentra muy por sobre el peso del lodo (9.4 ppg).
- Entre 10653 y 10907 ft (correspondiente a un intervalo que abarca parte de las formaciones F5b y F6) se mostraron cambios de régimen en el modelo E1 (de transcurrente a normal). Se presentaron numerosos puntos apretados y un empaquetamiento (a 10882 ft) que permitieron determinar cómo válido el modelo E2, debido a que la presión de colapso de este (9.9 ppg) se encuentra por sobre el peso del lodo (9.3 ppg), lo cual podría provocar derrumbes que al acumularse generarían el empaquetamiento y los numerosos puntos apretados.

Figura 53. Sección inferior del pozo B. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

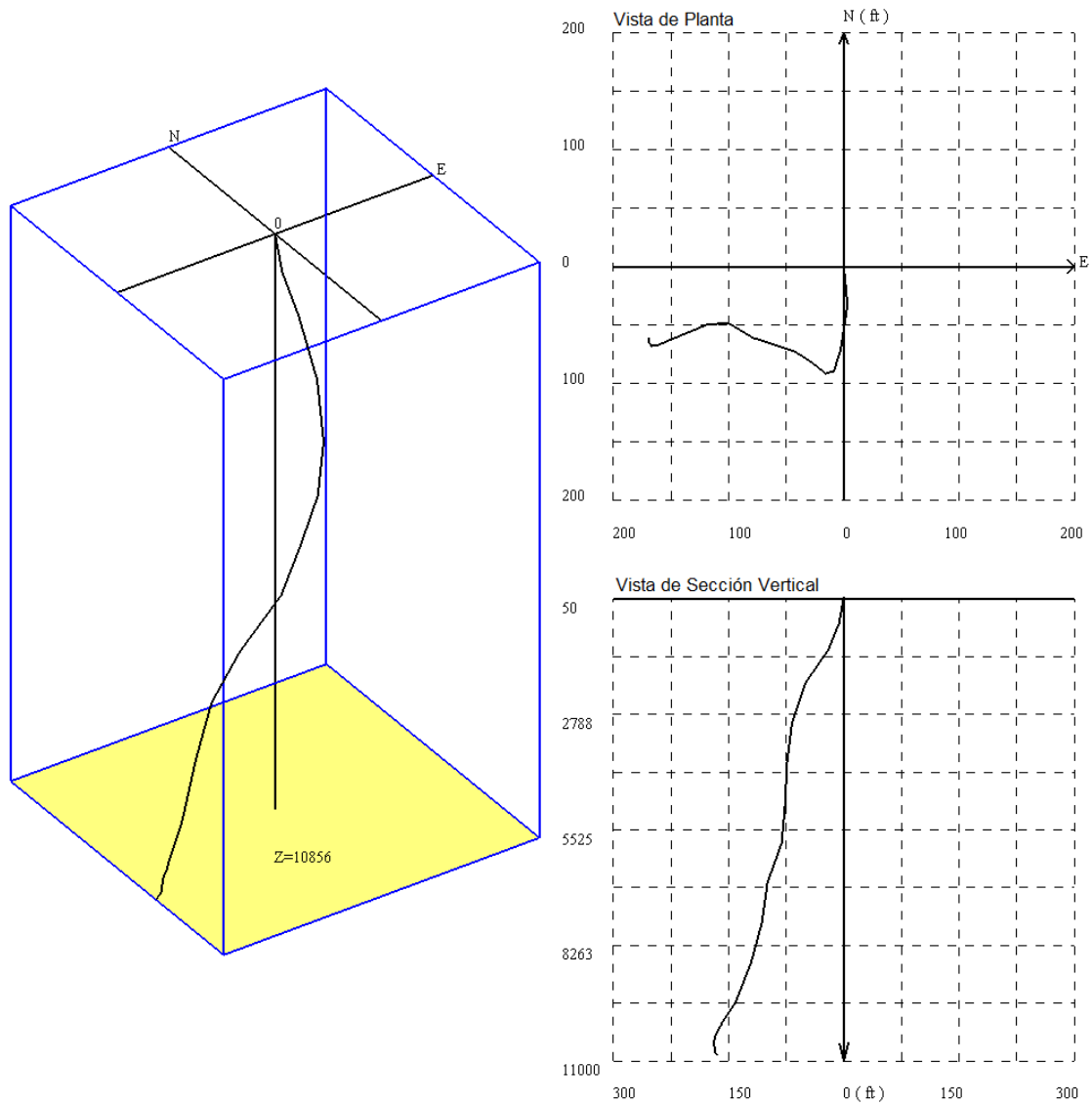
Para este caso tampoco se pudo determinar un régimen de esfuerzos único para la totalidad del pozo ya que a pesar de que en gran parte de este resulta válido el régimen transcurrente, existen intervalos en los cuales se validó el régimen normal y otros en los cuales por falta de datos no se pudo validar ni uno ni otro régimen.

5.2.3 Apiay C

El pozo Apiay C se encuentra ubicado al noreste del campo Apiay, a 955 ft sobre el nivel del mar. La longitud del pozo es de 10860 ft a una profundidad máxima de 10855 ft. Su trayectoria (como puede verse comparando la longitud del pozo con su profundidad) está relativamente poco desviada de la vertical. La orientación del

pozo es suroeste (ver *Figura 54*). A continuación se analizarán los puntos e intervalos en los cuales se presentaron variaciones en la configuración de los regímenes de esfuerzos (ver *Figura 55* y *Figura 56*):

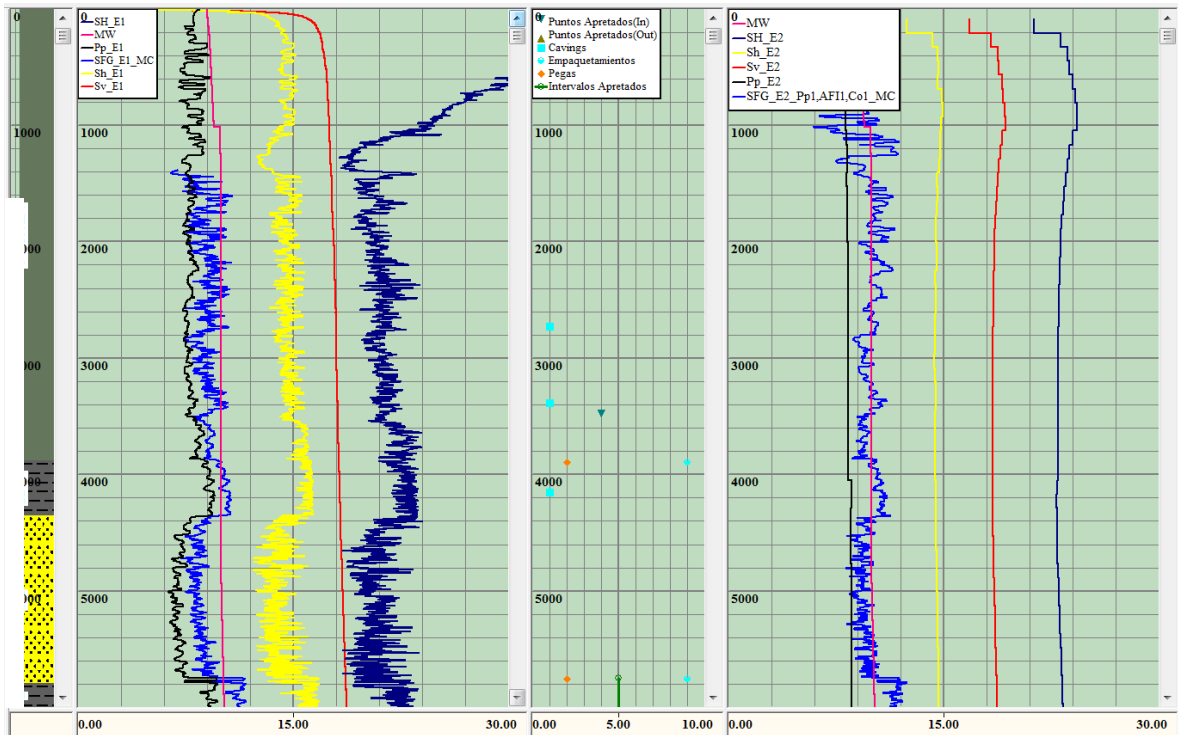
Figura 54. Esquema tridimensional del pozo C, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- El pozo presenta un régimen de esfuerzos transcurrente hasta 6277 ft y los puntos ubicados a 6336, 6505, 6518, 6700 y 6708 ft (unidad F3C, formación F3), donde el modelo E1 muestra un cambio de régimen transcurrente a régimen normal de esfuerzos. Debido a que en ninguno de los puntos mencionados se presentaron eventos de perforación, no se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos.

Figura 55. Sección superior del pozo C. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).



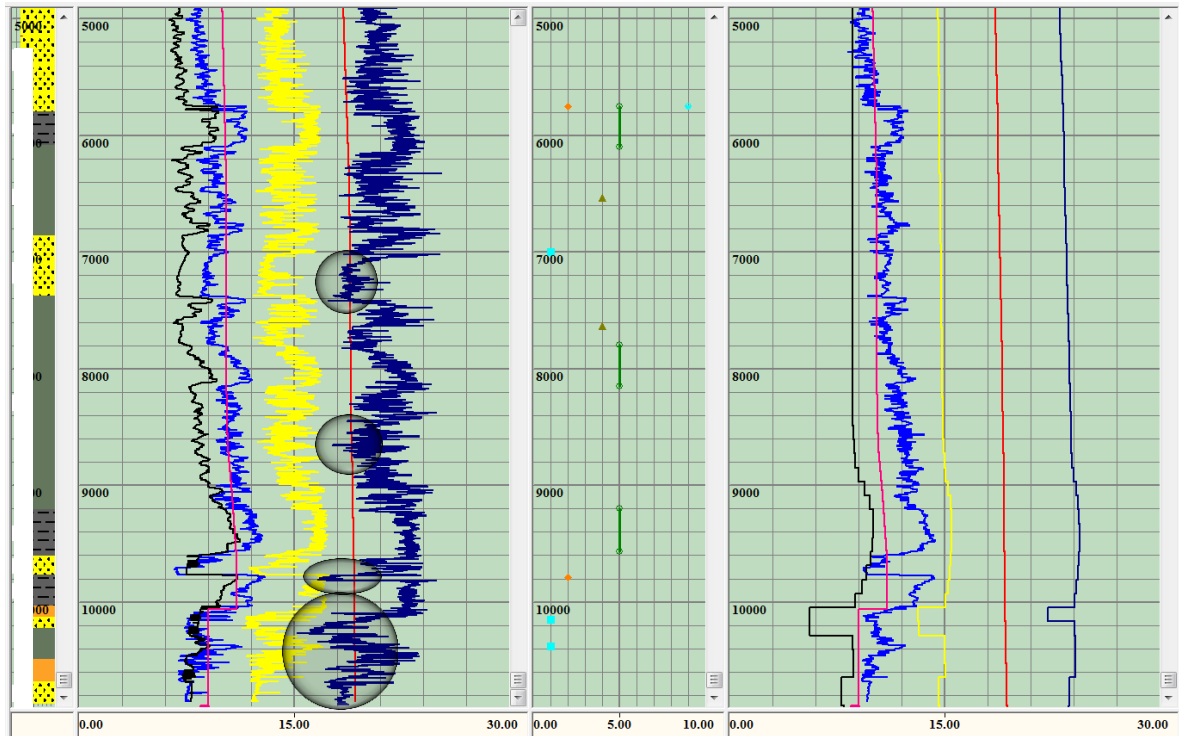
Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- Entre 6992 y 7016 ft (unidad F3D, formación F3), el modelo E1 presenta un cambio de régimen de esfuerzos de transcurrente a normal. Debido a que se presentaron *cavings* (a 7001 ft) en este intervalo, se tomó por válido el modelo E1 debido a que la presión de colapso (10.2 ppg) se encuentra por

sobre el peso del lodo (10.1 ppg), lo que conlleva a que se puedan generar derrumbes como los reportados.

- Se presentaron numerosos puntos con cambio en el régimen de esfuerzos del modelo E1 a 7109, 7414, 7679, 7822, 8302, 8449, 8547, 8653, 8681 y 8702 ft (entre la unidad F3D y la unidad F3E), no pudiéndose determinar el régimen de esfuerzo valido debido a que a estas profundidades no se presentaron eventos de perforación con los cuales calibrar un modelo de régimen de esfuerzos.
- Entre 10169 y 10391 ft (entre las formaciones F4b y F5a) se presentaron cambios en el modelo E1 (de régimen transcurrente a régimen normal). Se presentaron *cavings* (a 10152 y 10381 ft) en este intervalo, por lo que se determinó que el modelo que mejor ajustaba para validar régimen de esfuerzos era el correspondiente a E1, debido a que la presión de colapso (11.3 ppg) se encuentra por sobre el peso del lodo (9 ppg) y conlleva a que se generen derrumbes como los reportados.
- En los intervalos entre 10510 y 10519 ft y 10552 y 10591 ft (ubicados entre las formaciones F5a y F5b), el modelo E1 presento un cambio de régimen de esfuerzos de transcurrente a normal. Sin embargo, debido a que en ninguno de los intervalos mencionados se presentaron eventos de perforación, no se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos.
- Finalmente, entre 10655 y 10875 ft (entre las formaciones F5b y F6), el modelo E1 presenta una vez más cambio de régimen de esfuerzos de transcurrente a normal. Como en ninguno de los intervalos mencionados se presentaron eventos de perforación, no se realizó una validación de regímenes de esfuerzos por insuficiencia de datos.

Figura 56. Sección inferior del pozo C. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

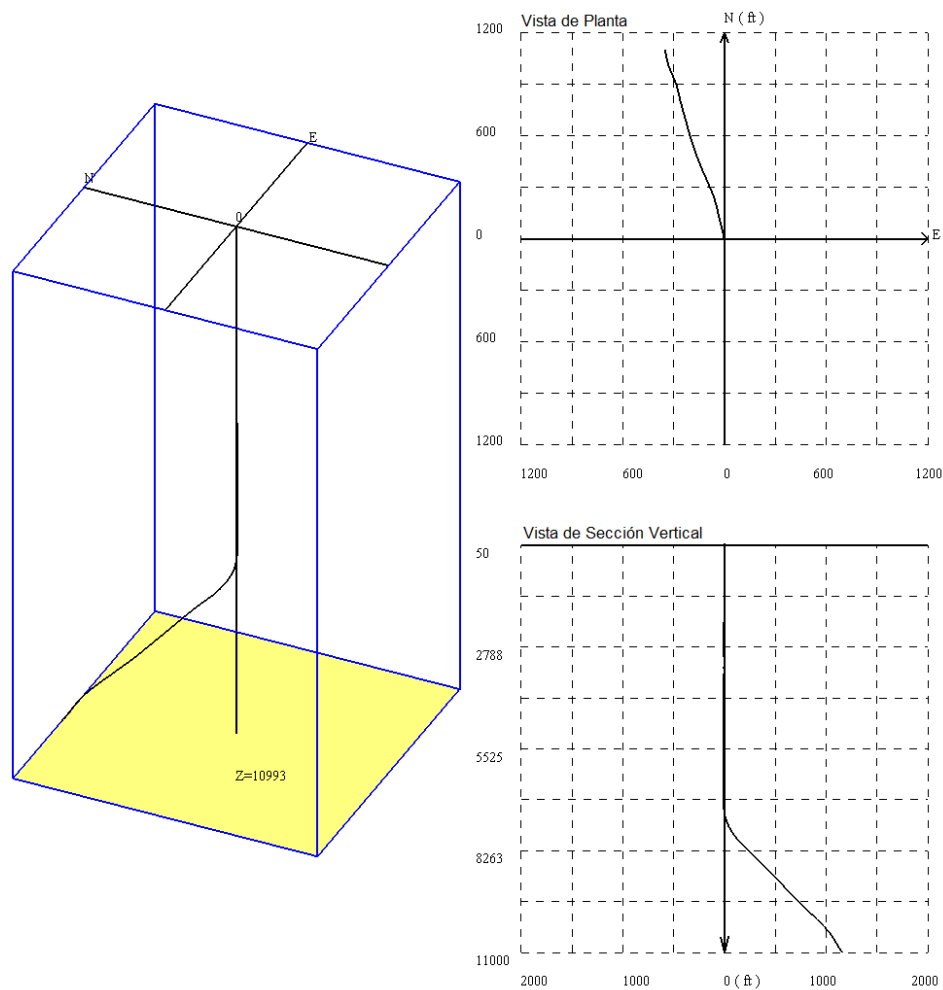
No se pudo determinar un régimen de esfuerzos único para la totalidad del pozo C: dependiendo de la profundidad a la cual se mida, este varía entre régimen transcurrente y régimen normal, por lo que se puede concluir que existen ambos regímenes en el pozo. Igualmente, existen intervalos en los cuales no se puede asegurar el dominio de un régimen u otro.

5.2.4 Apiay D

El pozo Apiay D se encuentra ubicado al noroeste del campo Apiay, a 951.5 ft sobre el nivel del mar. La longitud del pozo es de 11180 ft a una profundidad máxima de 10993 ft. Su trayectoria es vertical en más de la mitad de su

profundidad, inclinándose a más de 7500 ft (ver *Figura 57*). La orientación del pozo es noroeste. A continuación se analizaran los puntos e intervalos en los cuales se presentaron variaciones en la configuración de los regímenes de esfuerzos (ver *Figura 58* y *Figura 59*):

Figura 57. Esquema tridimensional del pozo D, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

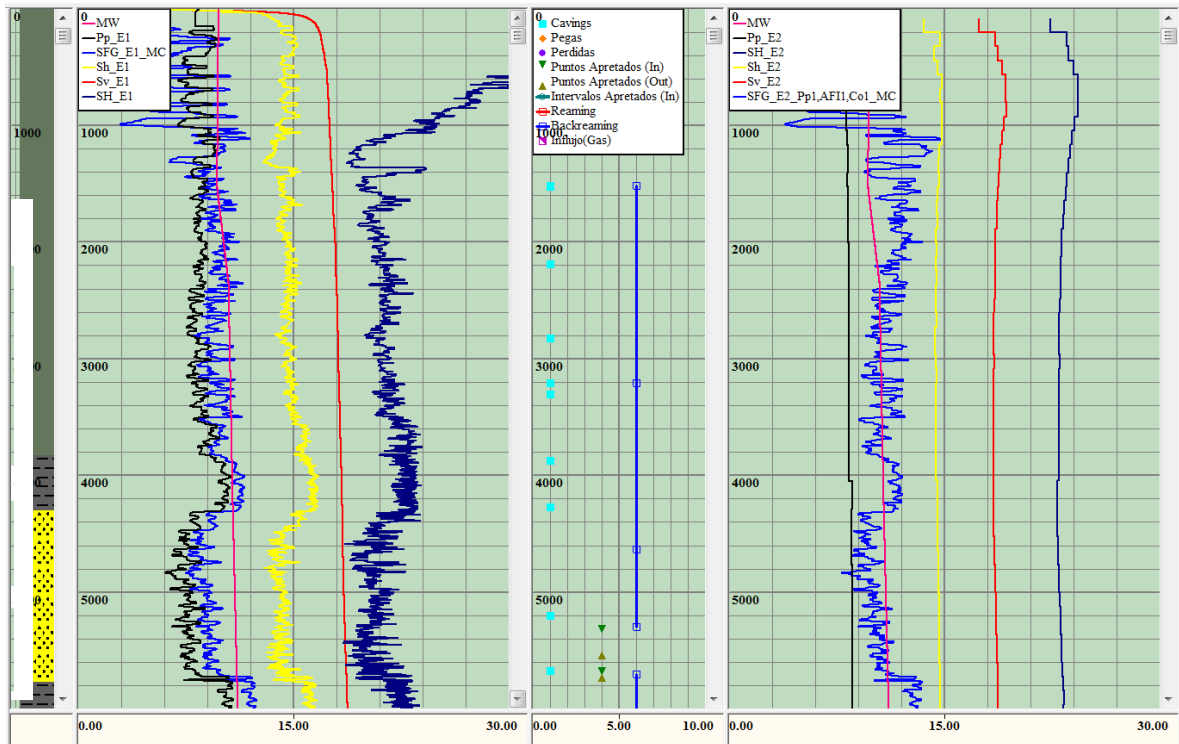
- El régimen de esfuerzos de este pozo corresponde a uno transcurrente hasta los intervalos entre 6428 y 6441 ft y 6615 y 6638 ft (unidad F3C,

formación F3). A estas profundidades el régimen cambia en el modelo E1 de transcurrente a normal, presentándose un evento de *cavings* a 6525 ft, por lo que se determinó que el modelo más válido para estos intervalos es el correspondiente a E2, debido a que la presión de colapso de este último (11.2 ppg) se encuentra por sobre el peso del lodo (11 ppg), y conllevaría a la aparición de estos *cavings*.

- Existe un intervalo entre 7030 y 7351 ft (en la unidad F3D) en el cual se presentó un cambio en el régimen del modelo E1 de transcurrente a normal. En esta ocasión no se contó con información de eventos a tales profundidades, por lo que no se determinó ninguno de los regímenes como válido por insuficiencia de datos.
- En la unidad F3E (formación F3) se presentaron cambios en el régimen de esfuerzos del modelo E1 de transcurrente a normal a 7616, 7623, 7637, 7670, 7708 y 7760 ft. Se determinó que el modelo correspondiente a estas profundidades es el E2, ya que se reportaron *cavings* (a 7701 ft) que pueden ser explicados por la cercanía entre la presión de colapso (11.1 ppg) y el peso del lodo (11.4 ppg) de este modelo.
- Aun al interior de la unidad F3E se presentan cambios en el modelo de esfuerzos de E1 de transcurrente a normal a 8613, 8640 y 8665 ft. Se determinó que el modelo E2 y sus respectivos esfuerzos ajustan mejor debido a que se presentaron *cavings* y un punto apretado a 8655 ft, siendo estos explicados por la presión de colapso (12.8 ppg) y el peso de lodo (11.6 ppg) de este modelo, que se encuentran alejados, pudiendo generar derrumbes, y estos a su vez, puntos apretados.
- En la unidad F3G (en el intervalo entre 9718 y 9761 ft) se presentaron una vez más cambios en el modelo de esfuerzos E1 (de transcurrente a

normal). Se reportó un punto apretado a 9728 ft, siendo este explicado por el modelo E2, debido a que se maneja una ventana de estabilidad más reducida en comparación con la del modelo E1 (mas critica).

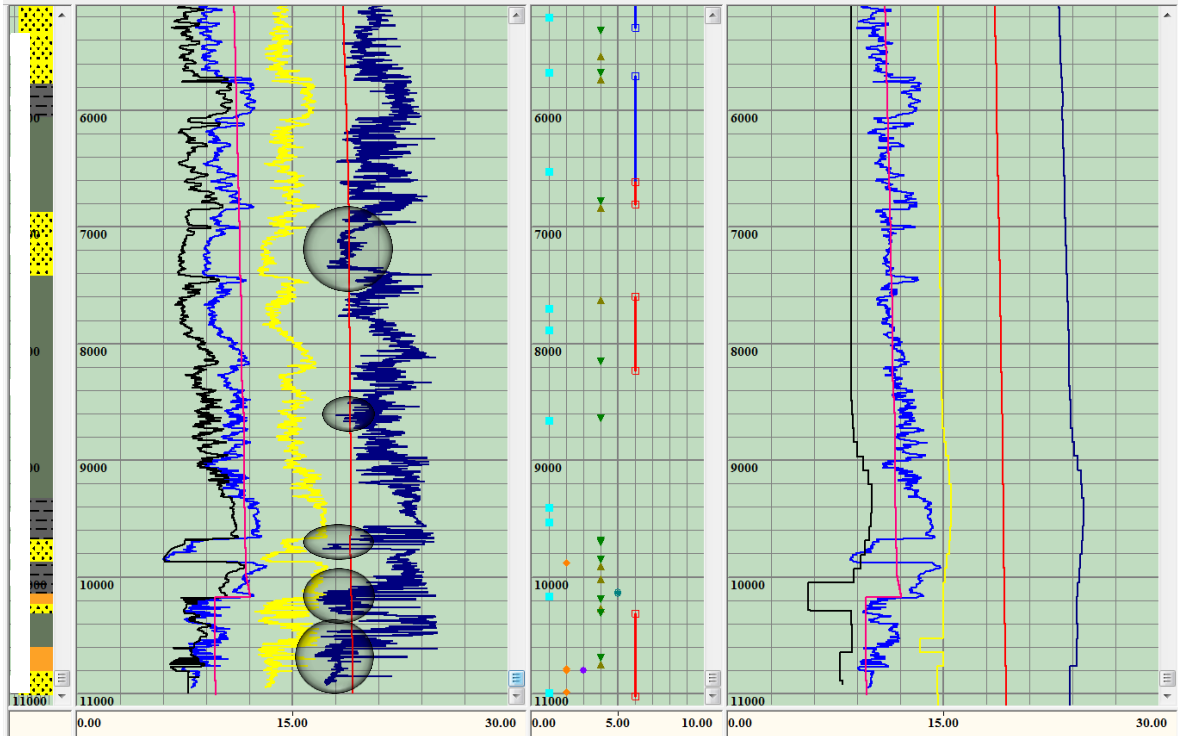
Figura 58. Sección superior del pozo D. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- Entre 10120 y 10317 ft (de la unidad F3H a la formación F5a) el modelo E1 presento cambios en su régimen de esfuerzos (de transcurrente a normal). A estas profundidades se presentaron *cavings* (a 10168 ft), puntos e intervalos apretados y el final de un *backreaming*. Se consideró que el modelo E1 ajusta mejor debido a un cambio brusco en las presiones que se ve reflejado en el cambio de peso de lodo de 11.9 a 9.6 ppg por cambio de litologías.

Figura 59. Sección inferior del pozo D. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- A nivel de la formación F5a, se presentó otro cambio en los esfuerzos del modelo E1, entre 10459 y 10475 ft. El único evento a esta profundidad era un *backreaming*, por lo que se determinó que el modelo E1 calibraba mejor con la aparición del evento, debido a que la presión de colapso (10.4 ppg) está por sobre el peso del lodo (9.6 ppg), lo cual lleva a la generación de otros eventos de perforación que requieren de la operación de *backreaming* para el acondicionamiento de las paredes del pozo.
- En la formación F6, se presentó otro cambio en el régimen de esfuerzos de E1 entre 10506 y 11013 ft. Hubo una pega de tubería a 10785 ft y otra de estas junto a pérdidas de fluido de perforación a 10803 ft, por lo que se

determinó que el modelo de mejor ajuste con estos eventos era el correspondiente a E1, debido a la gran diferencia entre la presión de poro (6.6 ppg) y el peso del lodo (9.5 ppg), generando los eventos antes mencionados.

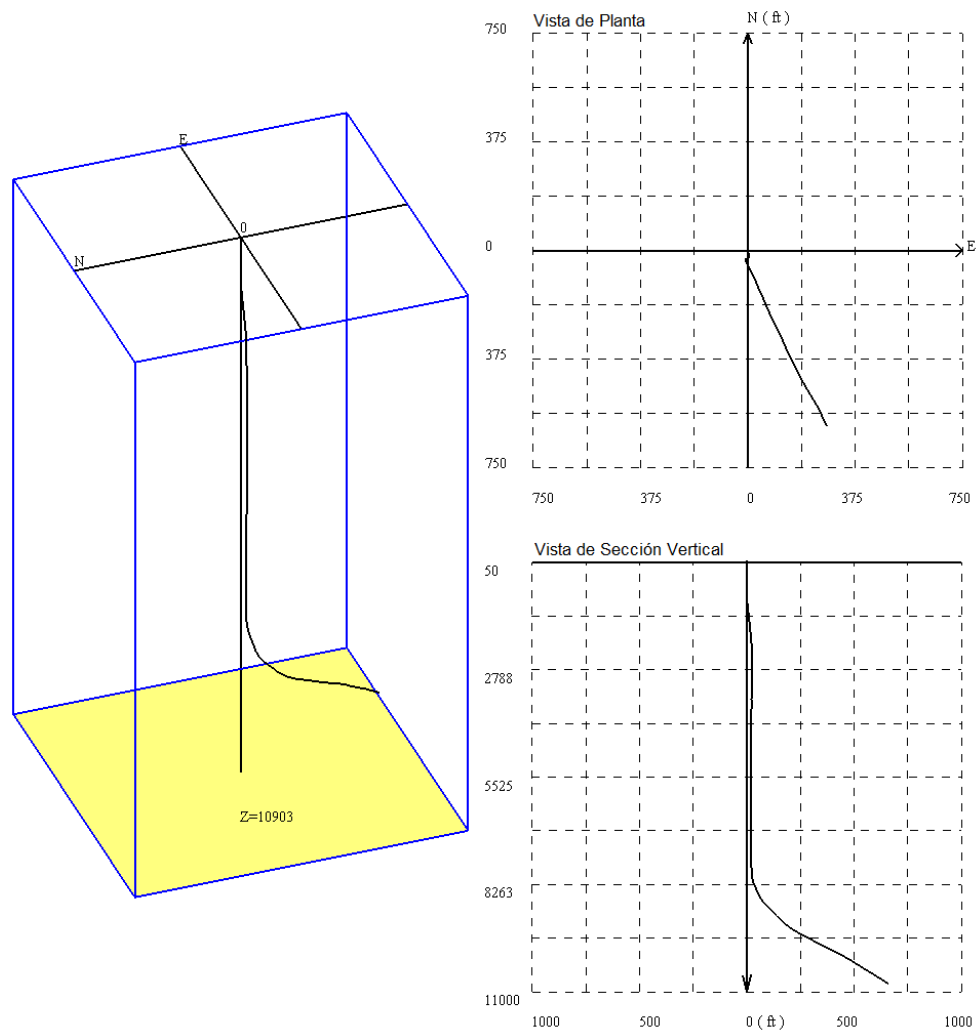
Tampoco se pudo determinar un régimen de esfuerzos único para la totalidad del pozo D puesto que en el proceso de validación se determinó la existencia de intervalos con régimen de esfuerzos normal y no únicamente transcurrente, como se planteaba en el modelo E2. Igualmente, varios intervalos no pudieron ser validados debido a la falta de eventos para ajustar en alguna de las dos ventanas de estabilidad propuestas en los modelos.

5.2.5 Apiay E

El pozo Apiay E se encuentra ubicado al oeste del campo Apiay, a 970.4 ft sobre el nivel del mar. La longitud del pozo es de 11000 ft a una profundidad máxima de 10908 ft. Su trayectoria es vertical casi en la totalidad de su profundidad, inclinándose a más de 8250 ft de profundidad (ver *Figura 60*). La orientación del pozo es sureste. A continuación se analizarán los puntos e intervalos en los cuales se presentaron variaciones en la configuración de los regímenes de esfuerzos (ver *Figura 61* y *Figura 62*):

- El régimen de esfuerzos de la superficie hasta el intervalo entre 7095 y 7417 ft fue transcurrente. Entre las profundidades mencionadas (a nivel de la unidad F3D y parcialmente en F3E) el régimen cambió de transcurrente a normal para el modelo E1, presentándose dos eventos de punto apretado (a 7245 y 7271 ft) que se sustentan de acuerdo al modelo E2, ya que este muestra una presión de colapso (11.6 ppg) mayor al peso de lodo (11.1 ppg), lo que es sinónimo de inestabilidad en las paredes del pozo.

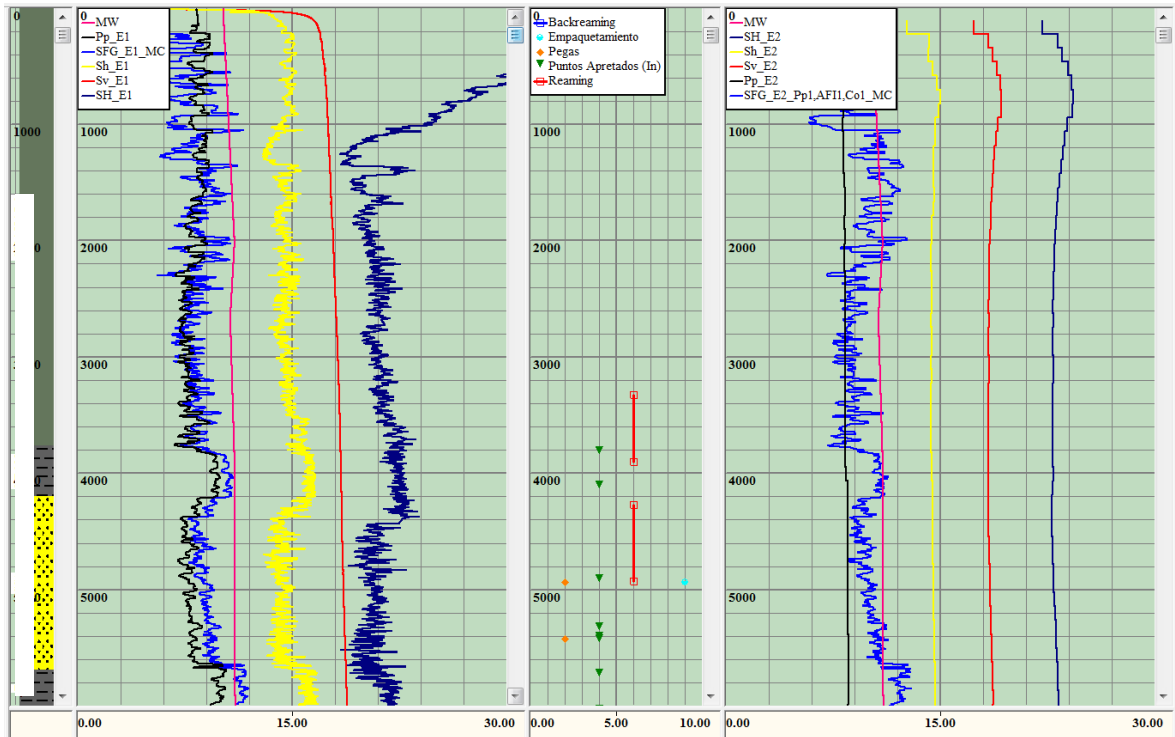
Figura 60. Esquema tridimensional del pozo E, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- En el intervalo entre 9798 y 9870 ft (a la altura de la unidad F3H, formación F3) se presentó un cambio de régimen transcurrente a normal en el modelo E1. Por sobre este intervalo se presentó una pega (a 9780 ft), la cual se explica fácilmente mediante el modelo E1, cuyo diferencial entre la presión de poro (5.1 ppg) y el peso del lodo (11.8 ppg) sustenta el evento.

Figura 61. Sección superior del pozo E. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).



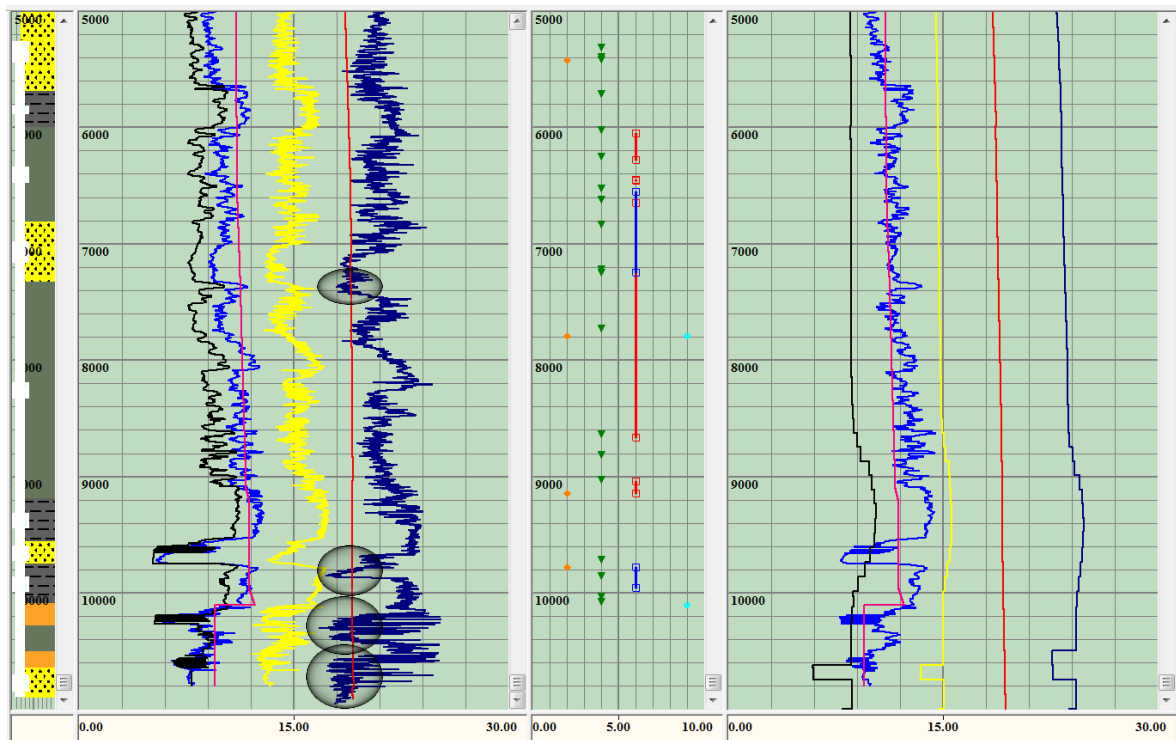
Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- Existe otro intervalo entre 10217 y 10402 ft, que inicia en la formación F4a y termina en la formación F5a en el cual el régimen de esfuerzos del modelo E1 cambia de transcurrente a normal, pero en el cual no se presentó ningún evento de perforación con el cual validar el régimen a tal profundidad.
- Finalmente, entre 10566 y 10903 ft hubo un último cambio de régimen en el modelo E1, de transcurrente a normal, en el cual tampoco se presentaron eventos de perforación mediante los cuales validar el régimen presente en el intervalo dado.

Tampoco se pudo determinar un régimen de esfuerzos único para la totalidad del pozo E.

Hubo intervalos en los cuales se validó el régimen transcurrente y un intervalo en el cual se validó el régimen normal, por ello (y aunque es una conclusión importante el haber inferido la existencia de un régimen distinto al transcurrente en un intervalo del pozo) no se puede estipular la dominancia de un régimen por sobre el otro.

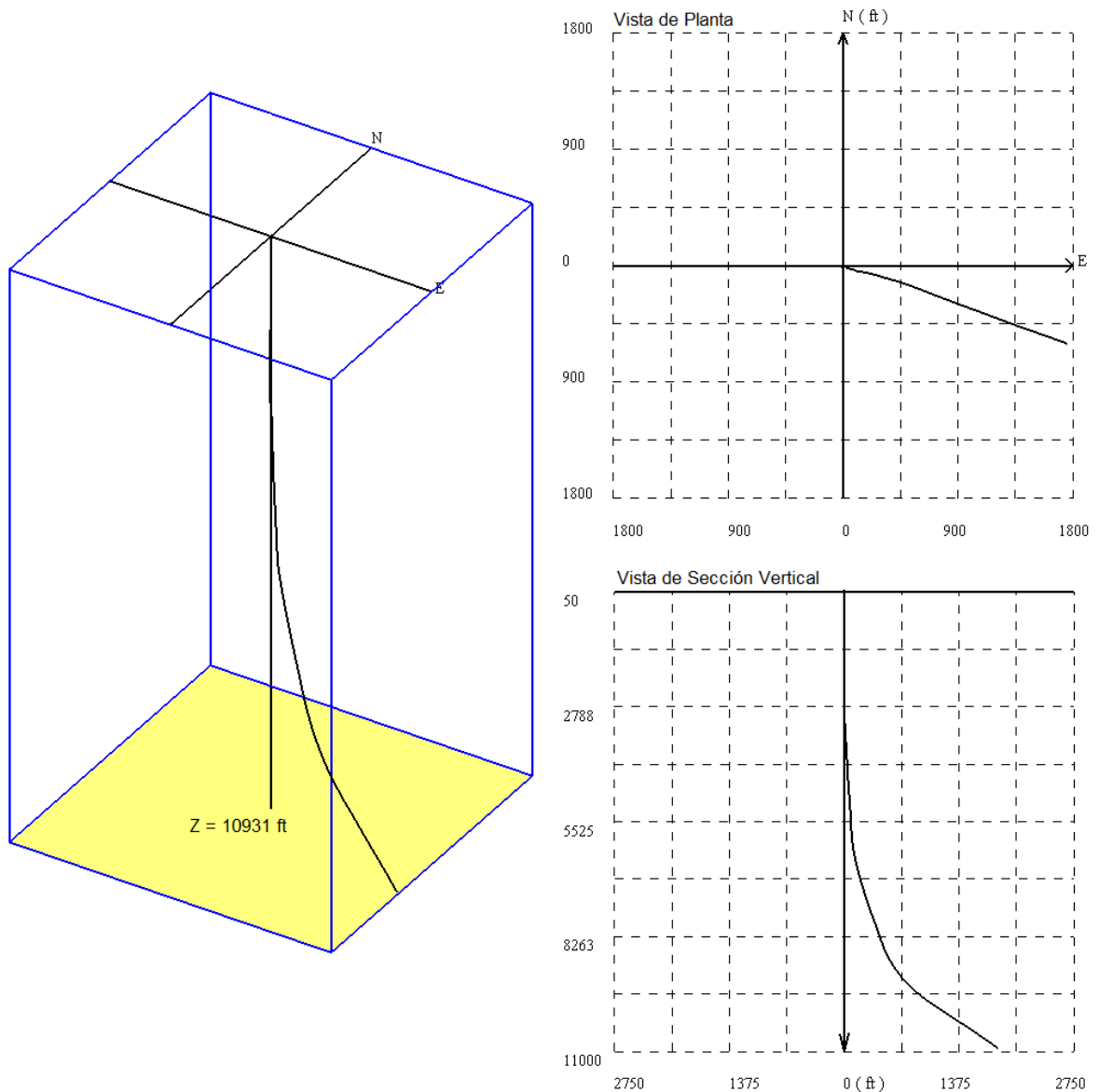
Figura 62. Sección inferior del pozo E. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

5.2.6 Apiay F

Figura 63. Esquema tridimensional del pozo E, con una vista de planta (arriba) y otra de perfil (abajo).



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

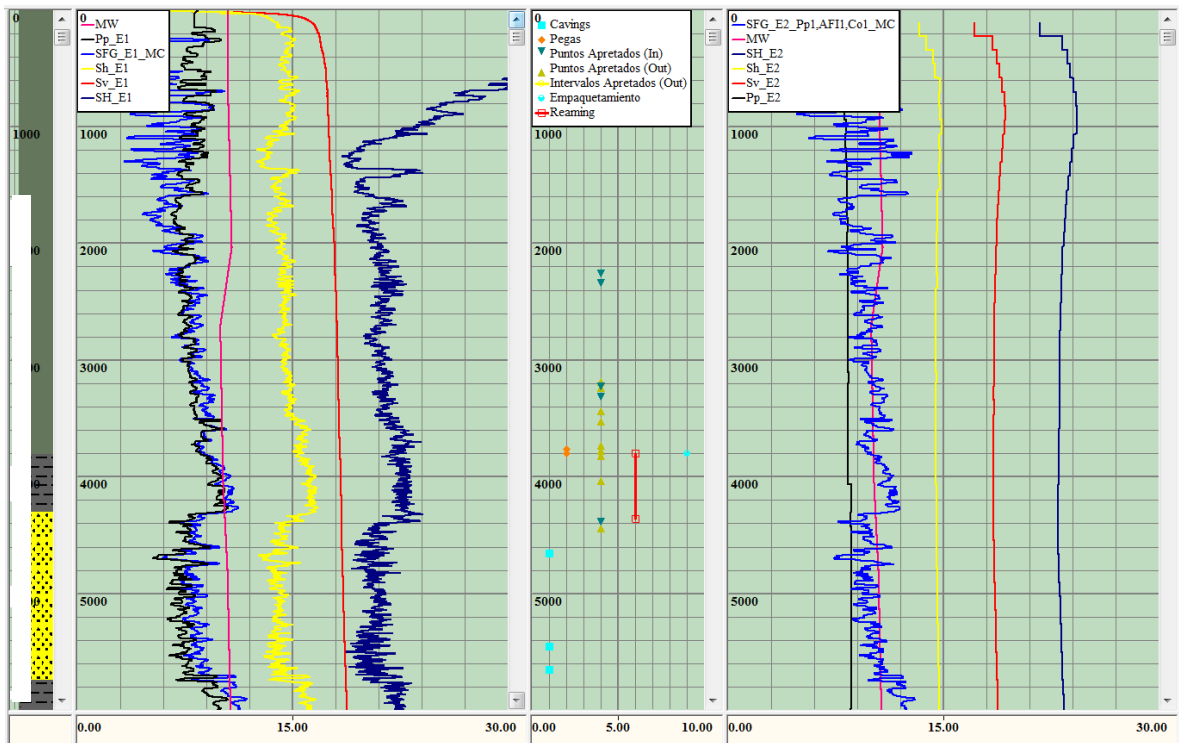
El pozo Apiay F se encuentra ubicado al noroeste del campo Apiay, a 970.44 ft sobre el nivel del mar. La longitud del pozo es de 11400 ft a una profundidad máxima de 10931 ft. Su trayectoria es bastante desviada teniendo en cuenta la diferencia entre su longitud y su profundidad máxima. La orientación del pozo es

sureste (ver *Figura 63*). A continuación se analizarán los puntos e intervalos en los cuales se presentaron variaciones en la configuración de los regímenes de esfuerzos (ver *Figura 64* y *Figura 65*):

- El régimen transcurrente domina este pozo hasta la unidad F3C de la formación F3 a 6261, 6450, 6460 y 6663 ft. En estos puntos el modelo E1 presenta un cambio de régimen de transcurrente a normal. Se presentó un punto apretado a 6446 ft, por ello se determinó que el modelo que mejor ajusta para calibrar el régimen de esfuerzos corresponde al E2. Esto debido a que se observa que la presión de colapso (11.1 ppg) está por sobre el peso del lodo (10.8 ppg), lo cual sería una causa para este punto apretado.
- Entre 7116 y 7420 ft (unidad F3D, formación F3) el modelo E1 presenta un cambio de régimen de transcurrente a normal. En este intervalo no se presentaron eventos de perforación, por lo cual no se determinó la validez de ninguno de los dos regímenes de esfuerzos posibles.
- En el intervalo entre 7828 y 7832 ft (unidad F3E, formación F3) el modelo E1 presenta una vez más un cambio de régimen de esfuerzos de transcurrente a normal. En este intervalo tampoco se presentó evento de perforación alguno con el cual calibrar el régimen de esfuerzos, por lo cual no se dio como válido ninguno.
- En el intervalo entre 9736 y 9795 ft (unidad F3G, formación F3) el modelo E1 cambia una vez más de régimen de transcurrente a normal. En este mismo intervalo se presenta un evento de intervalo apretado que se adapta fácilmente al modelo E2, debido a que maneja una ventana de estabilidad más reducida en comparación con la del modelo E1, cuya estabilidad es más crítica (con un diferencial entre presión de poro y colapso (6 ppg) y

peso de lodo (11.8 ppg) muy amplio). Una vez validado este régimen, se procedió a buscar el siguiente intervalo con variaciones.

Figura 64. Sección superior del pozo F. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro).

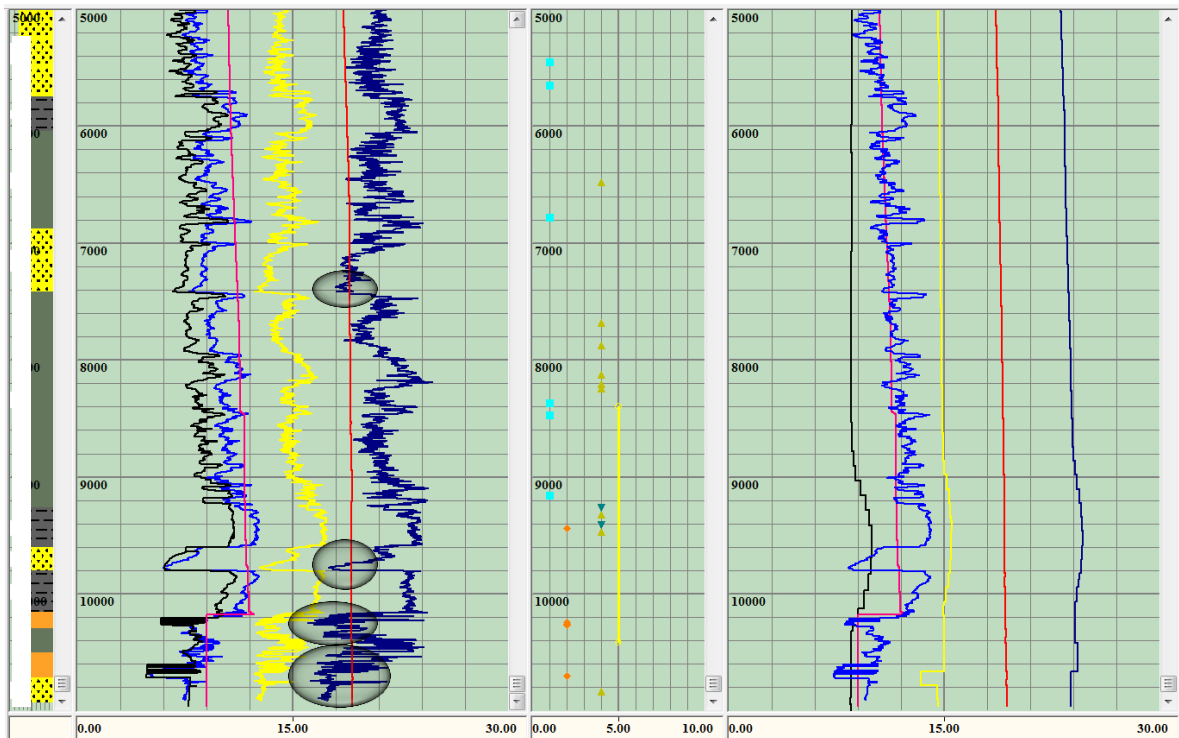


Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- En el intervalo entre 10165 y 10294 ft (formación F4a) el modelo E1 presenta un cambio de régimen de esfuerzos de transcurrente a normal. Se presentan eventos de perforación relacionados a un intervalo apretado y pegas de tubería a 10242 y 10261 ft. El modelo que mejor se adapta para calibrar el régimen de esfuerzos corresponde al modelo E1 debido a que el diferencial entre presión de poro (5.7 ppg) y peso de lodo (8.9 ppg) en este podría generar pegas de tubería.

- En el intervalo entre 10313 y 10385 ft (formación F3G Superior) el modelo E1 presenta un cambio de régimen transcurrente a normal. Estas profundidades hacen parte un intervalo apretado mencionado anteriormente. El modelo que mejor se ajusta corresponde al E2, debido a que las presiones de poro (8.4 ppg) y colapso (9.6 ppg), así como el peso del lodo (8.9 ppg) que se manejan en este modelo, podrían generar este intervalo característico.

Figura 65. Sección inferior del pozo F. Se ven los modelos E1 (izquierda), E2 (derecha) y los eventos (centro). Se resaltan las zonas con cambios más notables de régimen de esfuerzos en el modelo E1.



Fuente: Drillworks® Predict 5000.8.0 (2013).

- A 10455 ft, 10465 ft, y entre 10493 y 10536 ft (entre las formaciones F5a y F5b) el modelo E1 presenta un cambio de régimen de transcurrente a

normal. En tales puntos no se presentaron eventos de perforación con los cuales calibrar el modelo de régimen de esfuerzos.

- En el intervalo comprendido entre 10576 y 10931 ft (formaciones F5b y F6), el modelo E1 presenta un cambio de régimen de transcurrente a normal. Se presentaron dos eventos de perforación: uno relacionado a una pega de tubería (a 10698 ft) y un punto apretado (a 10807 ft). El modelo que mejor se ajusta para calibrar el régimen de esfuerzos corresponde al E1, debido a que las pegas de tubería y los puntos apretados, se relacionan más a los valores de presión de poro, colapso y peso de lodo manejados en este modelo.

Finalmente, no fue posible determinar un régimen de esfuerzos único para la totalidad del pozo F. Se presentaron dos regímenes (transcurrente y normal) en distintas secciones del pozo, sin la predominancia decisiva de alguno. Igualmente, la determinación de intervalos de régimen distinto al transcurrente en los seis (6) pozos analizados es una conclusión importante.

5.3 REGIMEN GENERAL

Debido a la naturaleza de la configuración de los esfuerzos en los seis (6) pozos analizados en el campo Apiay y a la variación de estos últimos (bastante marcada según el modelo E1 y casi nula según el modelo E2) a medida que aumenta la profundidad, se determinó que no existe un solo régimen de esfuerzos que actué en la totalidad de cada pozo y por consiguiente tampoco un régimen general de esfuerzos para la totalidad o, al menos, una parte del campo Apiay.

Este resultado, a pesar de no ser satisfactorio a primera vista, si entrega una idea general de lo que se puede encontrar en el sector estudiado a nivel de esfuerzos.

Se pudo determinar que la configuración de estos, en efecto, presenta cambios con la profundidad. Igualmente, hubo numerosos intervalos en los pozos en los cuales solo se pudo plantear una incertidumbre, mas no se logró validar un resultado por diversas limitantes en cuanto a la información trabajada (especialmente en lo referente a eventos de perforación y a las propiedades mecánicas del modelo E2).

Por todo lo expuesto anteriormente, se puede llegar a la conclusión de que en cuanto a la configuración de los esfuerzos en el campo Apiay no es posible definir un régimen único, ya sea por la extensión de la zona analizada o por las numerosas variables geológicas que intervienen en la materia y que varían notablemente de punto en punto, de intervalo en intervalo y de zona en zona.

Sin embargo, el análisis realizado permite plantear algunas ideas cuya discusión se antoja cuanto menos, interesante, ya que resulta bastante probable la existencia de cambios de régimen de esfuerzo con la profundidad en el campo Apiay, a diferencia de lo planteado por algunos estudios previos. Estas ideas serán discutidas más adelante en el apartado de discusión de resultados.

5.3.1 Implicaciones

De acuerdo a los resultados obtenidos (se validaron dos regímenes distintos a diferentes profundidades en los pozos estudiados), es posible plantearse una idea general de la configuración de los esfuerzos que se presentan en la zona analizada, con el fin de determinar posibles trayectorias de perforación de pozos en el futuro. Se puede estudiar la más recomendable en cada caso y definir en que dirección la roca se fracturaría más fácilmente debido a los esfuerzos que actúan en el campo.

Así mismo es posible establecer una ventana de estabilidad mejor calibrada en base al conocimiento previo de los esfuerzos, diseñando un programa de curva de lodo con el cual se mantenga el pozo en condiciones óptimas de estabilidad y lejos de los límites que conllevan al colapso de las paredes de roca o a la fractura de las mismas (y sus respectivos eventos de perforación indeseados).

Los cambios en el régimen de esfuerzos se presentan principalmente en zonas con cambios litológicos, en donde las presiones de poro varían notablemente y hacen que la magnitud de los esfuerzos horizontales sea mayor o menor (existe una relación de proporcionalidad entre ellas). En comparación, las zonas de litología arcillosa tienen presiones de poro más altas y las zonas de litología arenosa lo contrario. Establecida esta relación, es posible manejar un peso de lodo que controle las presiones en areniscas y otro que controle las presiones en shales.

La implicación más grande de los resultados obtenidos (la existencia de dos regímenes de esfuerzos y no uno solo dependiendo de la profundidad en el campo Apiay) está ligada a los procedimientos de perforación y extracción de hidrocarburos en la zona. El conocimiento de los esfuerzos locales brinda cierta seguridad al momento de decidir qué hacer antes, durante y después de la perforación de un pozo. Todo esto tiene sus implicaciones (generalmente monetarias), ligadas al tiempo utilizado y la calidad de los procedimientos de planeamiento y ejecución de un pozo. Por ello, es de gran importancia la validación de los esfuerzos estudiados en busca de confirmar la eficiencia de las prácticas anteriormente mencionadas.

5.3.2 Discusión de Resultados

La determinación de dos regímenes de esfuerzos distintos rigiendo el campo Apiay tiene implicaciones bastante profundas en lo relacionado a la extracción de

hidrocarburos en la zona. Actualmente no existe un modelo definitivo de esfuerzos para este campo, siendo el modelo E2 uno generalizado si se tiene en cuenta el hecho de que considera la totalidad del campo Apiay bajo un régimen transcurrente de esfuerzos.

Este acercamiento puede ser considerado como correcto o incorrecto dependiendo del objetivo que se tenga en mente. El modelo E2 cumple en cuanto a generalidad, pero adolece en su falta de detalle.

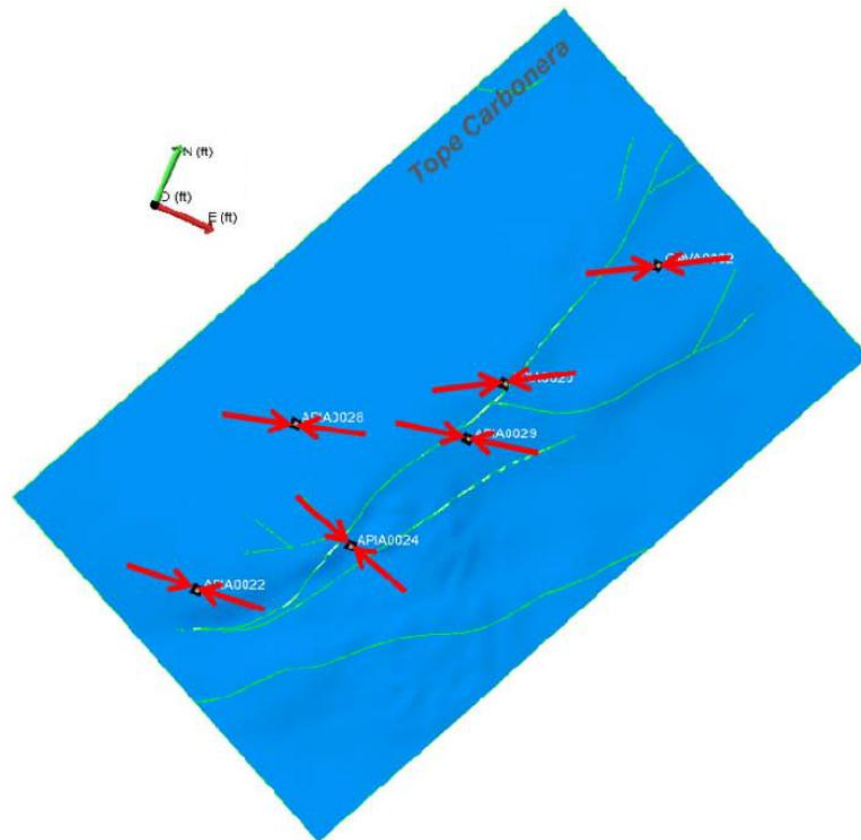
En un ámbito tan delicado como lo es el de la perforación de pozos y la mantención de su estabilidad, un tema como la configuración de los esfuerzos en la pared del pozo no debería ser tomado a la ligera. Un modelo como E1 muestra un alto nivel de detalle a nivel de litologías que calculado bajo parámetros aún más estrictos podría representar una ventaja inigualable al momento de realizar tareas a medianas y grandes profundidades en el campo Apiay.

Por ello, más allá de que los resultados de este proyecto cuenten o no con gran nivel de precisión, lo que se busca es mostrar que un modelo con cierto nivel de detalle puede ser de mayor utilidad en distintos aspectos si lo comparamos con un modelo generalizado para su comprensión y utilización. Por otra parte, la existencia de dos modelos con resultados divergentes permite un análisis que lleva a decantarse teniendo en cuenta las necesidades de cada caso.

Finalmente, los resultados del análisis mostraron evidencia de algunas zonas específicas en profundidad en las cuales el régimen de esfuerzos reinante se mantiene en duda. Estas zonas tienen características comunes propias, como la profundidad o la litología en la cual ocurrían y por ello un análisis más cuidadoso de estas sería de gran utilidad en la definición de la configuración de esfuerzos en los pozos del campo Apiay. La carencia de eventos que llevo a estas zonas de incertidumbre puede deberse a que de pozo en pozo se fue perfeccionando la

ventana de estabilidad utilizada para perforar (como parece verse reflejado en el aumento gradual en los pesos de lodo de los pozos a medida que aumenta su denominación, comenzando por la A y terminando en la F), llevando a la disminución de eventos perjudiciales para los procesos realizados.

Figura 66. Orientación inferida del esfuerzo horizontal máximo para el área de Apiay. Se toma como referencia el tope de la formación Carbonera.



Fuente: Modificado de Fernández et al. (2010).

Aun así y con las limitantes del caso, se puede inferir la existencia de por lo menos dos regímenes de esfuerzos distintos en el campo Apiay. El primero de estos, caracterizado por una configuración de esfuerzos transcurrente. El segundo régimen se caracteriza por una configuración de esfuerzos que varía entre

transcurrente y normal. Este segundo conjunto de regímenes está presente mayormente hacia la mitad inferior de los pozos analizados.

En cuanto a la orientación de los esfuerzos analizados, no se contó con información detallada al respecto ya que esta es clasificada en su mayoría. Sin embargo existe una orientación inferida del esfuerzo horizontal máximo en Apiay, de Este a Oeste con algunas variaciones locales, como enuncia Fernández et al. (2010) y se muestra en la *Figura 66* (las flechas indican la orientación del esfuerzo horizontal máximo, con la orientación del esfuerzo horizontal mínimo perpendicular a estas).

La orientación de los esfuerzos tiene sus implicaciones propias en las decisiones concernientes a la trayectoria de los pozos a perforar y algunas otras variables relacionadas a este proceso. Sin embargo, a la falta de datos precisos se evitó entrar en el tema de las orientaciones de esfuerzos y se enfocó el proyecto en la magnitud de los mismos.

CONCLUSIONES

- De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente proyecto se validaron dos regímenes de esfuerzos distintos para los pozos analizados del campo Apiay. Estos regímenes (transcurrente y normal) se presentan de forma variable dependiendo de la profundidad a la cual se midan los esfuerzos.
- De acuerdo a los resultados de los modelos de estabilidad E1 y E2 y su correspondiente régimen de esfuerzos para los seis pozos analizados del campo Apiay, se concluyó que en ningún momento se presenta el régimen inverso de esfuerzos, puesto que el esfuerzo vertical es mayor que el esfuerzo horizontal mínimo en todo momento.
- El modelo de estabilidad E1 muestra régimen de esfuerzos transcurrente con cambios a régimen normal a ciertas profundidades. Lo contrario ocurre con el modelo de estabilidad E2, que presenta régimen de esfuerzos transcurrente a cualquier profundidad.
- Existen lugares comunes en los cuales el modelo E1 muestra cambio de régimen transcurrente a normal: las unidades F3d y F3g (esta última hacia su base), las secciones inferiores de la formación F4 y la formación F5 y finalmente, la totalidad de la formación F6.
- El análisis realizado a las propiedades mecánicas de las rocas del campo Apiay según el modelo de estabilidad E1 mostro similitudes a nivel de formaciones para los seis pozos estudiados. Esto debido posiblemente a la poca diferencia entre topes y espesores de las formaciones y la cercanía entre los pozos estudiados.

BIBLIOGRAFIA

ACEVEDO Q., O. J. 2012. "Metodología para la Generación de Modelos de Presión 3D Acoplando Transferencia Dinámica de Fluidos a los Métodos Convencionales. Aplicación al Campo Cupiagua del Piedemonte Llanero". Universidad Industrial de Santander, Facultad de Fisicoquímicas, Escuela de Geología. Bucaramanga.

ADLAN, F.; SAMADYA A. May 2011. "Impact of Steam Injection on Stress Regime and Geomechanical Model at Northern Durifield". IPA 35th Annual Convention & Exhibition.

AHMAD, M. N. August 2005. "Rock Strength, Stress and Wellbore Stability in Telisa Formation, South Sumatera Basin". Proceedings, 13th Annual Convention & Exhibition. Indonesian Petroleum Association.

ANDERSON, E. M. 1951. "The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Application to Britain". 2nd Ed. Oliver & Boyd, Edinburgh.

ARAUJO, E. et al. December 2010. "Drilling Optimization Using 3D Geomechanical Modeling in the Llanos Basin, Colombia". SPE Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference. SPE International. Lima, Peru.

BELL, J. S.; BABCOCK, E. A. September 1986. "The Stress Regime of the Western Canadian Basin and Implications for Hydrocarbon Production". Bulletin of Canadian Petroleum Geology, Vol. 34, No. 3, p. 364-378.

BLASIO, F.V. 2011. "Introduction to the Physics of Landslides, Lecture Notes on the Dynamics of Mass Wasting". ISBN: 978-94-007-1121-1. 408 p.

BRESSE, M. 1859. "Cours de Mecanique Applique" Paris, pp. 323-338.

CALDERON, J. E. Septiembre de 2006. "El Papel de la Sísmica en la Delineación de Yacimientos en 2 Campos de la Cuenca de los Llanos Orientales – Colombia". Ecopetrol. Bogotá, Colombia.

CASTILLO, D. A.; MOOS, D. October 2001. "Reservoir Geomechanics Applied to Drilling and Completion Programmes in Hostile and Complex Environments: North West Shelf, Timor Sea, North Sea and Colombia". Proceedings, Twenty-Eight Annual Convention & Exhibition. IPA.

CASTRO A., E.; PUERTO M., Y. Agosto de 1985. "Desarrollo Campo Apiay". II Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Ecopetrol (Divisiones de Exploración y Yacimientos). Bogotá, Colombia.

CHARLEZ, P. H.; DESPAX, D. October 1985. "The State of Stress in the Earth Crust – Its Importance in Petroleum Engineering". Proceedings, 14th Annual Convention. IPA.

CHEN, X. et al. October 1996. "Wellbore Stability Analysis Guidelines for Practical Well Design". SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference. SPE. Adelaide, Australia.

CHEN, X. et al. December 2002. "A Comprehensive, Practical Approach for Wellbore Instability Management". SPE Drilling & Completion.

CHIRINOS, R. Junio de 2012. "Problemas Especiales Asociados con el Control de Presiones". Universidad de Zulia, Programa de Ingeniería de Petróleo. Catedra: Presiones Anormales y Control de Pozos. Venezuela.

FAJARDO B., S. Febrero de 2010. "Monitoreo Arqueológico para Mitigar el Impacto al Patrimonio Material en la Construcción del Oleoducto Apiay – El Porvenir". Ecopetrol, Informe Final. Bogotá.

FERNANDEZ, A., ALVARELLOS, J. Noviembre de 2011. "Modelos Geomecánicos 3D y su Creciente Aplicación en la Industria Petrolera". Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 12.

FERNANDEZ I., F. et al. December 2010. "3D Geomechanical Modeling for the Apiay and Suria Oil Fields (Llanos Orientales Basin, Colombia): Insights on the Stability of Reservoir-Bounding Faults". SPE Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference. SPE International. Lima, Peru.

FLOREZ, A. 2003. "Colombia: Evolución de sus Relieves y Modelados". Universidad Nacional de Colombia, Unibiblos. ISBN: 958-701-312-3. 240 p. Bogotá.

GARCIA F., M. A. 2006. "Determinación de la Orientación y Magnitud del Esfuerzo Máximo Horizontal a Partir del Modelamiento de *Breakouts* en la Zona del Piedemonte Llanero Colombiano". Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga.

GONZALEZ de V., L. G. 2002. "Ingeniería Geológica". Pearson Education. ISBN: 9788420531045. 744 p.

GUTIERREZ, M. et al. 1996. "Impact of Seismic 3-D Interpretation on Reservoir Management in the Apiay-Ariari Oil Fields, Llanos Basin, Colombia". AAPG Studies in Geology No. 42, SEG Geophysical Developments Series No. 5 p. 57-68. AAPG/SEG. Tulsa, Oklahoma.

HALLIBURTON. 2013. "Wellbore Integrity for Maximum Long-Term Production". <http://www.halliburton.com/ps/default.aspx?pageid=2879> (Consultado el martes 23 de abril de 2013).

HEMPHILL, T. 2008. "Wellbore Stability for Drilling Fluids Engineers". Halliburton Energy Services. Baroid High Impact Technology. Houston, Texas.

HOLBROOK, P. W. et al. December 1995. "Real-Time Pore Pressure and Fracture-Pressure Determination in All Sedimentary Lithologies". SPE Formation Evaluation.

HUDSON, J. A. 2005. "Engineering Properties of Rocks". Elsevier, Amsterdam.

ILLIDGE A., E. J. 2008. "Predicción de Presión de Poro a Partir de Velocidades Sísmicas 2D, Aplicación en el Campo Cusiana del Piedemonte Llanero Colombiano". Universidad Industrial de Santander, Facultad de Fisicoquímicas, Escuela de Geología.

IMP. 2013. "Estudios de Geomecánica y Estabilidad de Pozos". <http://www.imp.mx/productos/?imp=&%20esp=0108&%20cs=4> (Consultado el lunes 8 de abril de 2013).

INGEOMINAS. 2007. "Atlas Geológico de Colombia". Planchas 5-09 y 5-14. Escala 1:500000. Servicio Geológico. Bogotá.

INGEOMINAS. 2006 "Mapa Geológico de Colombia". Escala 1:2500000. Dirección Técnica Servicio Geológico. República de Colombia.

IUPAC. 1993. "Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry". Second Edition, Blackwell Scientific Publications. ISBN: 0-632-03583-8. Oxford, England.

KARACAN, C. O. Diciembre de 2009. "Elastic and Shear Moduli of Coal Measure Rocks Derived from Basic Well Logs Using Fractal Statistics and Radial Basis Functions". National Institute for Occupational Safety Health.

KELESSIDIS, V. C. Junio de 2011. "Rock Drillability Prediction from In Situ Determined Unconfined Compressive Strength of Rock". The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 111.

KIRSCH, E. G. 1898. "Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre". Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Vol. 42, pp. 797–807.

LAST, N. C. et al. October 1997. "Case History: Integration of Rock Mechanics, Structural Interpretation and Drilling Performance to Achieve Optimum Horizontal Well Planning in the Llanos Basin, Colombia, South America". SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas.

MALAGON, C. Septiembre de 1997. "Análisis Facial, Arquitectura Estratigráfica y Caracterización de las Areniscas F3G, Formación Carbonera, Campo Apiay, Colombia". Ecopetrol. Bogotá, Colombia.

MITCHELL, J. K. 1962. "Components of Pore Water Pressure and Their Engineering Significance". Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California.

MOOS, D.; ZOBACK, M. D. 1990. "Utilization of Observations of Wellbore Failure to Constrain the Orientation and Magnitude of Crustal Stresses: Applications to Continental, Deep Sea Drilling Project, and Ocean Drilling Program Boreholes". Journal of Geophysical Research, Vol. 95.

NIMICK, F. B. 1988. "Empirical Relationships Between Porosity and the Mechanical Properties of Tuff". Key Questions in Rock Mechanics. ISBN: 90-6191-835-9.

NORDGARD B., H. M. et al. 2005. "The Influence of Stress Regimes on Hydrocarbon Leakage". AAPG Hedberg Series, No 2.

ORTIZ B., L. 1998. "Elasticidad". McGraw-Hill. ISBN: 84-481-2046-9.

PAEZ L., R. H. 2007. "Apuntes de Mecánica de Rocas". Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería, Minas y Metalurgia. Pág. 3.

PÉREZ H., V. E; BOLÍVAR B., A. L. Agosto de 1985. "Cuenca Llanos Orientales – Exploración Petrolera en la Subcuenca Apiay-Ariari (Trabajo Integrado)". II Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Ecopetrol (División de Exploración). Bogotá, Colombia.

PÉREZ H., V. E; BOLÍVAR B., A. L. 1984. "Exploración Sísmica y Geológica del Bloque Apiay (Llanos Orientales)". Primer Congreso Colombiano del Petróleo. El Centro Santander, Colombia.

PEREZ, Z. et al. Octubre de 2009. "Estimación de Presión de Poro a Partir de Velocidades Sísmicas". Ecopetrol S.A.

PEREZ, V. E. Agosto 1985. "The Apiay Block – Llanos Orientales Basin". II Bolivarian Symposium – Oil Exploration in Subandean Basins (Part Two). Ecopetrol. Bogotá, Colombia.

PISTRE, V. et al. June 2009. "Determining Stress Regime and Q Factor from Sonic Data". SPWLA 50th Annual Logging Symposium. Woodlands, Texas.

RABIA, H. Septiembre de 2001. "Well Engineering & Construction". Entrac Consulting, Gulf Publishing. 789 p., ISBN: 0954108701.

REYES S., J. P. et al. 1992. "Objetivos Estratigráficos en la Subcuenca Apiay-Ariari". Ecopetrol.

RODRIGUEZ O., A. E. Julio de 2008. "Estudios de Control de Pozos Durante las Operaciones de Mantenimiento y Workover en el Campo Apiay y Castilla la Nueva". Escuela de Fisicoquímicas, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

SALAMANCA, G. C. Agosto de 2010. "Optimización de Producción Conjunta de Petróleo de las Arenas F5 y K2 del Campo Apiay". Escuela de Fisicoquímicas, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

SANCHEZ G., E. 2007. "Cálculo de Geopresiones y Diseño de Tubería de Revestimiento".

SCHLUMBERGER. 1989. "Log Interpretation Principles/Applications". Schlumberger Wireline & Testing, 225 Schlumberger Drive, Sugar Land, Texas.

SCHLUMBERGER. 2011. "Presiones de Formación". Programa de Entrenamiento Acelerado para Ingenieros Supervisores de Pozo.

SCHOWALTER, T., HESS, P. 1982. "Interpretation of Subsurface Hydrocarbon Shows". AAPG, Vol. 66.

SOROUGH, H. 2007. "Importance of Petrophysical Logging Data to Geomechanical Analysis". Well Engineering Centre of Excellence (WECO), Weatherford Oil Tool, Dubai.

STATE OF CALIFORNIA – BUSINESS, TRANSPORTATION AND HOUSING AGENCY. March 2000. "Unconfined Compressive Strength of Soil". Department of Transportation, Engineering Service Center, Transportation Laboratory. 5900 Folsom Blvd. Sacramento, California 95819.

TAN, C. P. et al. 1999. "Wellbore Stability Analysis and Guidelines for Efficient Shale Instability Management". Rock Mechanics for Industry. ISBN: 90-5809-052-3. CSIRO Petroleum. Melbourne, Australia.

TARBUCK, E. J.; LUTGENS, F. K. 2005. "Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física". Editorial Pearson, Prentice Hall. 736 p. ISBN: 8420549983.

TASSINARI, C. C. G. et al. 1996. "Geochronological Systematics on Basement Rocks from the Rio Negro - Juruena Province (Amazonian Craton), and Tectonic Implications". Int. Geol. Rev. 38.

TORRES, M. E.; GONZALEZ, A. J. April 2003. "In-situ Stress State Eastern Cordillera (Colombia)". SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Port of Spain, Trinidad.

TRINDADE, L. A. et al. 1997. "Petroleum Systems of the Piedemonte Oriental, Cusiana-APIAY Area, Colombia". Petrobras, Ecopetrol.

VARGAS P., J. G. Noviembre de 2009. "Geomecánica y Estabilidad de Pozo". Advanced Cementing Training, Baroid. Halliburton.

VASQUEZ H., A. R. 2001. "Introducción a la Geomecánica Petrolera". Cap. 1, Pág. 1.

ZHOU, S. et al. June 1996. "On the Mechanical Stability of Inclined Wellbores". University of Adelaide (Australia), SPE Drilling & Completion.

ZOBACK, M. D. et al. 2003. "Determination of Stress Orientation and Magnitude in Deep Wells". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 40, Issues 7-8, Pages 1049-1076.