

**DETERMINACIÓN DE LA MEJOR TRAYECTORIA DE PERFORACIÓN
BASADA EN UN ANÁLISIS GEOMECÁNICO, APLICADO A CAMPO
ESCUELA COLORADO.**

PEDRO FERNANDO QUIROGA NOVOA

DIEGO RAÚL VILLAVECES SUAREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2013

**DETERMINACIÓN DE LA MEJOR TRAYECTORIA DE PERFORACIÓN
BASADA EN UN ANÁLISIS GEOMECÁNICO, APLICADO A CAMPO
ESCUELA COLORADO.**

**PEDRO FERNANDO QUIROGA NOVOA
DIEGO RAÚL VILLAVECES SUAREZ**

**Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título
de ingeniero de petróleos**

**Dr. Zuly Himelda Calderón
Director**

**M. Sc. Carlos Bacca
Codirector**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2013**

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, una familia, la fuerza diaria para seguir luchando, las capacidades y la oportunidad de estudiar.

A mi familia por su apoyo incondicional durante todo este proceso, especialmente a mis padres Pedro Antonio y María Elisa por darme la vida, por sus enseñanzas y por brindarme todo lo que necesite, a mi hermana Natalí por siempre preocuparse por mi bienestar y felicidad y a mi abuelita Elisa por todas sus oraciones.

A mis amigos y compañeros de estudio por acompañarme en este proceso y ayudarme a crecer como persona y como profesional, por convertirse en una segunda familia durante estos cinco años.

A los que nos apoyaron para realizar este trabajo de grado, especialmente a la Dr. Zulý Calderón y al M. Sc. Carlos Bacca por compartir sus conocimientos, guiarnos y enseñarnos durante el desarrollo del trabajo.

Agradecimientos también a todas las instituciones que me educaron especialmente a la Universidad Industrial de Santander y a sus profesores que nos compartieron sus conocimientos y experiencias para ayudarnos a formar como profesionales.

Gracias a la vida, por entregarme tanto.

PEDRO FERNANDO QUIROGA NOVOA

DEDICATORIA

A Dios por siempre cuidarme y llenarme de salud, en sus manos pongo mi vida, la de mi familia y amigos.

A mis padres, Jorge y Francelina por brindarme ese amor y apoyo incondicional, ustedes son el MOTOR de mi vida y mi ejemplo a seguir

A mis hermanas por todo el apoyo incondicional y el cariño que me brindan día a día.

A mi compañero de tesis, amigo y hermano Pedro Fernando Quiroga Novoa por todo su apoyo incondicional a lo largo de estos 5 años.

A mis amigos de carrera, que hicieron de mi estadía en la universidad una experiencia inolvidable, les deseo el mejor de los éxitos.

A todas las personas, familiares y amigos que me han apoyado y ayudado a crecer espiritual, familiar y académicamente.

DIEGO RAÚL VILLAVECES SUAREZ.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primero a Dios por su misericordia y su amor que siempre está acompañándonos y protegiéndonos y por darnos la oportunidad de emprender cada día nuevos proyectos de vida.

A José Julián Guerra por haber creído en la realización de este proyecto y brindarnos su apoyo incondicional.

Al M.sc. Carlos Bacca por toda la colaboración y orientación técnica en el desarrollo de este proyecto, a todo el grupo de Geomecánica de Schlumberger por el conocimiento compartido, por todas sus enseñanzas las cuales fueron clave no solo para realizar este proyecto si no para crecer como personas y como profesionales.

A la Dr. Zully Calderón por su ayuda y sugerencias al desarrollo de este libro.

A Jhon Acosta por su colaboración en el desarrollo de este proyecto y su amistad.

A todos nuestros compañeros de estudio por el apoyo, a los docentes por el conocimiento compartido y a la Universidad Industrial de Santander y su Escuela de Ingeniería de petróleos por brindarnos la oportunidad de ser profesionales.

DIEGO RAÚL VILLAVECES SUAREZ

PEDRO FERNANDO QUIROGA NOVOA

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE GEOMECÁNICA.....	20
1.1 DEFINICIÓN DE GEOMECÁNICA	20
1.1.1 Definición de geomecánica aplicada a yacimientos	20
1.2 ESFUERZOS IN SITU	21
1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS	22
1.3.1 Introducción	22
1.3.2 Teoría de elasticidad lineal	23
1.3.3 Esfuerzo.....	23
1.3.4 Deformación.....	26
1.3.5 Ley de Hooke.....	27
1.3.6 Modulo de Young.....	28
1.3.7 Relación de Poisson	28
1.3.8 Circulo de Mohr.....	29
1.3.9 Resistencia a la compresión no confinada (UCS).....	30
1.4 MECANISMOS DE FALLA DE LA ROCA.....	31
1.4.1 Fallas por tensión.....	31
1.4.2 Fallas por cizalladura	32
1.5 ESTABILIDAD DE LA FORMACIÓN	33
1.6 REGISTROS DE POZO.....	34
1.6.1 Registros sínicos.....	34
1.6.2 Registros de densidad de la formación	35
1.6.3 Registro Gamma Ray	36
1.6.4 Registro caliper	38
1.7 Flujo de trabajo para la construcción de un MEM	39
1.7.1 Auditoria de la información.....	40

1.7.2 Modelo estructural y análisis de eventos de perforación.	42
1.7.3 Mecánica estratigráfica	43
1.7.4 Esfuerzo de sobrecarga	44
1.7.5 Presión de poro.....	44
1.7.6 Propiedades elásticas y resistencia de la roca.	46
1.7.7 Dirección de esfuerzos horizontales	47
1.7.8 Magnitud de los esfuerzos horizontales	51
1.7.9 Análisis de falla	56
2. AUDITORIA DE DATOS	59
2.1. INFORMACIÓN DE CAMPO	59
2.1.1 Localización	59
2.1.2 Campo de esfuerzos	62
2.1.3 Modelos del campo.....	63
2.2. INFORMACIÓN DE POZO	68
2.2.1 Registros de pozo	68
2.2.2 Reportes de perforación y geología	75
2.2.3 Petrofísica	77
2.2.4 Propiedades mecánicas.....	80
3. ANÁLISIS DE EVENTOS DE PERFORACIÓN.....	82
4. MEM CAMPO COLORADO	108
4.1 Mecánica Estratigráfica.....	108
4.2 Calculo de propiedades elásticas	117
4.2.1 Propiedades dinámicas de la roca	117
4.2.2 Propiedades estáticas de la roca	119
4.3 Propiedades de resistencia de la roca	121
4.3.1 UCS	121
4.3.2 Angulo de fricción interna.....	121
4.3.3 Resistencia a la tracción (TSTR)	122
4.4 Esfuerzo vertical	124
4.5 Presión de poro.....	125

4.6 Esfuerzos horizontales máximo y mínimo.....	126
4.7 Análisis de estabilidad de pozo.....	129
5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	132
RECOMENDACIONES.....	149
BIBLIOGRAFÍA.....	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración de fuerzas y esfuerzo	24
Figura 2. Descomposición de una fuerza	24
Figura 3. Elemento infinitesimal	25
Figura 4. Deformación longitudinal	26
Figura 5. Deformación de cizalladura	27
Figura 6. Relación de Poisson	29
Figura 7. Circulo de Mohr	30
Figura 8. Grafica esfuerzo-deformación	31
Figura 9. Fallas por tensión (izq.) y cizalla (der.)	32
Figura 10. Esfuerzos horizontales máximo y mínimo	39
Figura 11. Flujo de trabajo para la construcción de un MEM	40
Figura 12. Coeficiente de Biot	47
Figura 13. Mapa Mundial de Esfuerzos	48
Figura 14. Breakout y fracturas en el wellbore	49
Figura 15. Mecanismos de falla en el wellbore	50
Figura 16. Identificación de breakouts y fracturas	51
Figura 17. modelo Andersoniano de falla	52
Figura 18. Leak Off Test	55
Figura 19. Análisis de estabilidad de pozo	56
Figura 20. Localización del campo Colorado	60
Figura 21. Estado actual pozos Campo Colorado	61
Figura 22. Estado de esfuerzos campo Colorado	62
Figura 23. Columna estratigráfica Generalizada Cuenca VMM	63
Figura 24. Localización Líneas Sísmicas cercanas al Campo Colorado.	65
Figura 25. Línea Sísmica DM-89-1440. Sentido NW-SE	65
Figura 26. Línea Sísmica PMS 981700. Sentido SW-NE.	66
Figura 27. Línea Sísmica -PMS 98-1700. Sentido SW-NE	66
Figura 28. Línea Sísmica -DM 87-1470 E. Sentido NW-SE.	67
Figura 29. Registro sónico compresional de los pozos por bloque.	69
Figura 30. Log Montage pozos off set Campo Colorado	71
Figura 31. Ejemplo tipo resumen diario de perforación	75
Figura 32. Ejemplo tipo resumen de NPT	76
Figura 33. Topes de formación	76
Figura 34. Sección y estado mecánico del pozo	76
Figura 35. Survey del pozo	77
Figura 36. Petrofísica entregada por Campo colorado, Pozos offset	78
Figura 37. Eventos durante la perforación	82

Figura 38. Curva de avance de la perforación pozo 38	85
Figura 39. Curva de avance de la perforación pozo 66	89
Figura 40. Curva de avance de la perforación pozo 67	91
Figura 41. Curva de avance de la perforación pozo 70	94
Figura 42. Curva de avance de la perforación pozo 71	97
Figura 43. Curva de avance de la perforación pozo 72	100
Figura 44. Curva de avance de la perforación pozo 75	103
Figura 45. Petrofísica a partir de los registros GR y Sónico compresional	110
Figura 46. Petrofísica a partir de los registros GR y Densidad	111
Figura 47. Comparación de registro DTCO de pozos off se	113
Figura 48. Vista de planta de la superficie del subsuelo	114
Figura 49. Superficies del subsuelo mediante método geoestadístico	115
Figura 50. Vista de planta del pozo Infill 5 y pozos offset	116
Figura 51. Log montage pozo Infill 5	116
Figura 52. Propiedades elásticas de la roca pozo Infill 5	120
Figura 53. Propiedades de resistencia de la roca pozo Infill 5	123
Figura 54. Esfuerzo vertical pozo Infill 5	124
Figura 55. Presión de poro pozo Infill 5	125
Figura 56. Esfuerzos horizontales máximo y mínimo pozo Infill 5	128
Figura 57. Análisis de estabilidad del pozo Infill 5.	130
Figura 58. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 1.3$ y $\epsilon_y = 2.1$	134
Figura 59. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 0.4$ y $\epsilon_y = 0.7$	135
Figura 60. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 1$ y $\epsilon_y = 1.4$	136
Figura 61. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 1$ y $\epsilon_y = 1.5$	137
Figura 62. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 0.5$ y $\epsilon_y = 0.8$	138
Figura 63. Modelo estabilidad pozo Infill 5 con $\epsilon_x = 0.5$ y $\epsilon_y = 0.8$	140
Figura 64. Análisis de sensibilidad breakout y breakdown @ 889'	141
Figura 65. Análisis de sensibilidad breakout y breakdown @ 2306'	142
Figura 66. Análisis de sensibilidad breakout y breakdown @ 3511'	143
Figura 67. Análisis de sensibilidad breakout y breakdown @ 4020'	143
Figura 68. Trayectoria vertical del pozo Infill 5	145
Figura 69. Trayectoria desviada del pozo Infill 5	145

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información necesaria para realizar un MEM	41
Tabla 2. magnitud de los esfuerzos y régimen de esfuerzos	52
Tabla 3. Datos para determinar la ventana de lodo	57
Tabla 4. Características de las formaciones de Campo Colorado	64
Tabla 5. Pozos con registro sísmico compresional	69
Tabla 6. Clasificación de los eventos durante la perforación	83
Tabla 7. Resumen de eventos de perforación colorado 38	86
Tabla 8. NPT de colorado 38	87
Tabla 9. Resumen de eventos de perforación colorado 66	90
Tabla 10. NPT de Colorado 66	90
Tabla 11. Resumen de eventos de perforación colorado 67	92
Tabla 12. NPT de Colorado 67	93
Tabla 13. Resumen de eventos de perforación colorado 70	95
Tabla 14. NPT de Colorado 70	95
Tabla 15. Resumen de eventos de perforación colorado 71	98
Tabla 16. NPT de Colorado 71	98
Tabla 17. Resumen de eventos de perforación colorado 72	101
Tabla 18. NPT de Colorado 72	101
Tabla 19. Resumen de eventos de perforación colorado 75	104
Tabla 20. NPT de Colorado 75	105
Tabla 21. Evaluación de los eventos	107
Tabla 22. Deformaciones máxima y mínima	133
Tabla 23. Survey del pozo Infill 5	144
Tabla 24. Survey del pozo Infill 5 desviado	144

RESUMEN

TITULO: DETERMINACIÓN DE LA MEJOR TRAYECTORIA DE PERFORACIÓN BASADA EN UN ANÁLISIS GEOMECÁNICO, APLICADO A CAMPO ESCUELA COLORADO.*

AUTORES: Pedro Fernando Quiroga Novoa, Diego Raúl Villaveces Suarez**

PALABRAS CLAVES: MEM, modelo de estabilidad de pozo, propiedades mecánicas de la roca, esfuerzos in situ, presión de poro

DESCRIPCIÓN:

Determinar la mejor trayectoria de perforación para el prospecto de perforación, Colorado Infill 5, de Campo Colorado se puede lograr a partir de la realización de un modelo geomecánico, el cual permite definir la condición de inclinación y azimut del pozo bajo las cuales se genera el menor diferencial de esfuerzos en el wellbore, con el fin de evitar los problemas de estabilidad de la formación y optimizar el rendimiento de la operación.

Para lograr ese objetivo se debe construir un modelo de estabilidad de pozo, el cual requiere de la recopilación de la información disponible de Campo Colorado (registros y reportes de perforación) con el fin de crear modelos 1D, para pozos de correlación cercanos al Colorado Infill 5. Estos modelos comprenden los cálculos de propiedades elásticas y de resistencia de la roca, el cálculo de la petrofísica, de los esfuerzos in situ y de la presión de poro. El modelo de estabilidad que se obtiene de estos cálculos debe modelar los eventos reales sucedidos durante la perforación de todos los pozos de correlación y por lo tanto ser representativo para el campo.

La registros de los pozos offset servirán para alimentar al Colorado Infill 5 a fin de realizar los cálculos de las propiedades geomecánicas del modelo usando las correlaciones que resultaron representativas para el campo, por lo que se logra definir un modelo de estabilidad de pozo para el Infill 5, que permite definir la densidad de lodo apropiada, los puntos de casing y la trayectoria bajo las cual se puede perforar de manera segura el pozo.

* Trabajo de Grado

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director Dr. Zuly Himelda Calderón Codirector M. Sc. Carlos Bacca

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF THE BEST DRILLING TRAJECTORY BASED ON GEOMECHANICAL ANALYSIS, APPLIED TO COLORADO FIELD. *

AUTHORS: Pedro Fernando Quiroga Novoa, Diego Raúl Villaveces Suarez **

KEYWORDS: MEM, wellbore stability model, mechanical rock properties, stresses in situ, pore pressure

ABSTRACT:

Determining the best drilling trajectory for the future drilling, Colorado Infill 5, of Colorado field can be achieved performing a geomechanical model, which allows defining the condition of the well's azimuth and well's inclination, under which there is a minimum differential stresses at the wellbore, in order to avoid the formation stability problems and improve the drilling performance.

To achieve this objective a wellbore stability model has to be made, that model needs a recompilation of information available in Colorado field (well logs and drilling reports) in order to make 1D model, to offset wells close to Colorado Infill 5. This model includes calculations of elastic properties and rock strength, petrophysics, in situ stresses and pore pressure. The wellbore stability model has to represent the real events during drilling of all offset wells and has to be representative to the field.

The offset well's logs will be useful to feed the Colorado Infill 5 with the purpose of make the calculation of geomechanical properties of the model with the representative correlations of the field, then a wellbore stability model for Infill 5 is achieved, this model allows to define the proper mud density, the casing points and the drilling trajectory that make safe the operation.

* Degree project

** Faculty physic chemical engineering, petroleum engineering school. Dirs. Dr. Zuly Calderón M.Sc. Carlos Bacca

INTRODUCCIÓN

Hoy en día la industria petrolera se está enfrentando a nuevos prospectos hidrocarburíferos mucho más complejos, de difícil acceso y desarrollo, los cuales están asociados a mayores problemas de estabilidad de la formación durante las operaciones de perforación y producción, en ese sentido se debe entender que para enfrentar adecuadamente los nuevos retos de la industria se requiere del desarrollo de modelos geomecánicos del subsuelo, que permitan optimizar las operaciones de perforación identificando y anticipando los riesgos potenciales, minimizando los tiempos no productivos y los costos.

El objetivo de este libro es desarrollar una metodología que permita realizar un modelo geomecánico del subsuelo (MEM), con el fin de definir la mejor trayectoria de perforación para el pozo Infill 5 y como soporte para los prospectos de perforación del Campo Colorado.

La metodología para el desarrollo del MEM se explica en los cinco capítulos del libro de la siguiente manera, capítulo 1 tiene como objetivo familiarizar al lector con los conceptos geomecánicos, y establecer el flujo de trabajo adecuado que permita abarcar todos los pasos necesarios para la construcción del modelo.

En el capítulo 2 se realiza una auditoria de la información que dispone Campo Escuela Colorado con el fin de disponer de un inventario general de la información de cada pozo y del campo en general, para facilitar la selección de los pozos off set, que serán usados para la construcción del MEM. Adicionalmente se evalúa y analiza la calidad de los datos, lo que permite definir la incertidumbre y las limitaciones del modelo.

En el capítulo 3 se identifican los eventos de perforación y los tiempos no productivos (NPT), teniendo en cuenta la profundidad perforada, el tamaño de broca y el peso del lodo usado, lo cual representa un resumen de los sucesos diarios de perforación, esta identificación se realiza con el fin de poder calibrar el modelo con eventos reales del campo.

En el capítulo 4 se calcula una nueva petrofísica para el Campo Colorado y se definen los topes de formación del pozo Infill 5 usando el software Petrel mediante un método geoestadístico, permitiendo así la construcción del modelo geomecánico. En el desarrollo del capítulo se presentan detalladamente los cálculos de las propiedades de resistencia de la roca, propiedades elásticas, esfuerzo de sobrecarga, presión de poro, esfuerzos horizontales, con el fin de determinar la ventana de lodo, los puntos de casing, la curva de densidad y un análisis que permita proponer una trayectoria de perforación recomendada con el fin de minimizar el costo de perforación del pozo Infill 5.

Finalmente en el capítulo 5 se hace uso del cálculo de los esfuerzos para el pozo Infill 5, para identificar las zonas donde se debe realizar un análisis de sensibilidad de la trayectoria que permita minimizar el diferencial de esfuerzos en el pozo y garantizar la estabilidad en la perforación del pozo.

El desarrollo de esta tesis permitirá a Campo Escuela Colorado tener una preliminar de la planeación del pozo Infill 5, a partir de un modelo que optimiza enormemente el performance de la perforación, con el fin de reducir los costos de la operación.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE GEOMECÁNICA

1.1 DEFINICIÓN DE GEOMECÁNICA

La geomecánica es la disciplina que se encarga de estudiar los esfuerzos y características mecánicas de los materiales geológicos que conforman las rocas y entender los procesos de deformación a los que se ven sometido debido a las actividades de perforación, completamiento y producción de pozos.

En lo que concierne a la industria del petróleo la geomecánica es la disciplina que integra la mecánica de rocas, la geofísica, geología, petrofísica, perforación y la producción, para cuantificar la respuesta del subsuelo a cambios en:

- Los esfuerzos
- La presión del yacimiento
- La temperatura de la formación.

A fin de obtener un entendimiento del comportamiento mecánico de las formaciones para evitar los problemas de inestabilidad en el pozo. Mientras que en un ámbito más general, por ejemplo el de la ingeniería civil de donde surge esta disciplina la define como: “el campo de estudio dedicado al entendimiento de los procesos básicos de deformación de la roca y su significancia tecnológica”.¹² La base de la geomecánica es la relación entre esfuerzo y deformación.¹⁰

1.1.1 Definición de geomecánica aplicada a yacimientos Cuando se habla de la geomecánica aplicada al desarrollo de los yacimientos de petróleo, esta tiene como fin crear modelos mecánicos del subsuelo (MEM) que permita integrar las condiciones geológicas de la formación con las prácticas de la ingeniería como perforación y producción de pozos a fin de predecir el comportamiento tanto del

yacimiento como de los pozos, de esta forma mitigar los problemas relacionados con estabilidad de la formación durante la perforación, y compactación y subsidencia del yacimiento durante la vida productiva de este.

Los parámetros principales que controlan estas interacciones son el estado de esfuerzos in situ, la resistencia de la roca, propiedades y orientación de los estratos, presión de poro, distribución de fracturas y fallas, trayectoria de pozo y el peso del lodo⁴.

Un modelo mecánico del subsuelo es una compilación lógica de información relevante acerca de los esfuerzos a que está sometido el subsuelo y las propiedades mecánicas de la roca que conforman un área determinada.¹

Un MEM utiliza como datos de entrada los modelos estructurales, estratigráficos, sedimentológicos, petrofísicos y de fluidos, para caracterizar las estructuras geológicas del subsuelo, además de involucrar la geofísica para determinar litologías, propiedades mecánicas de la roca y estados de esfuerzo a partir de registros, y de ingeniería de yacimientos para considerar los balances de masa dinámicos que suceden en el yacimiento, por lo que no es un modelo estático puesto en una cuadrícula con atributos asignados a cada celda. Lo crítico del modelo es que provee una vista unificada de las propiedades mecánicas de la roca para el área en cuestión.¹

1.2 ESFUERZOS IN SITU

Sobre los estratos del subsuelo actúan tres esfuerzos principales: un esfuerzo vertical, un esfuerzo horizontal mayor y un esfuerzo horizontal menor, estos varían en su origen, magnitud y dirección. Los esfuerzos locales verticales son originados

fundamentalmente por el peso de los estratos suprayacentes que generan una sobrecarga sobre los estratos inferiores.

Los esfuerzos horizontales poseen además un componente gravitacional que puede ser intensificado por la tectónica, los efectos térmicos y la estructura geológica, no obstante, otros factores tales como la litología, la presión de poro y la temperatura, incide en la magnitud y la orientación de los esfuerzos, además del grado en que la roca responde a los esfuerzos.⁵

El esfuerzo, es una medida de la fuerza que actúa sobre un área determinada, está compuesto por componentes normales y componentes de corte.

El esfuerzo normal (σ): Es el que se aplica en forma perpendicular a un plano o la superficie de la roca.

El esfuerzo de corte (τ): Se aplica a lo largo de la cara del plano. Matemáticamente, existe una orientación de ejes ortogonales que define las direcciones de los esfuerzos para las cuales los esfuerzos de corte son nulos. Esa orientación define los ejes de los esfuerzos principales, en los que los esfuerzos aplicados son estrictamente normales.⁵

1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

1.3.1 Introducción ^{9,14} “La mecánica de rocas es la ciencia teórica y aplicada del comportamiento mecánico de las rocas; esta rama de la mecánica está interesada en la respuesta de las rocas a los campos de esfuerzo de su ambiente físico.” (Judd, 1964)⁹. La mayoría de los materiales son capaces de resistir y recuperarse de deformaciones producidas por los esfuerzos, cuando este no supera el límite de elasticidad del material, a esta capacidad se le conoce como

elasticidad. La elasticidad puede considerarse como el aspecto fundamental de la mecánica de rocas.

1.3.2 Teoría de elasticidad lineal La teoría de elasticidad lineal es una idealización y simplificación del comportamiento de un cuerpo al esfuerzo-deformación. El tipo más simple de respuesta de un material es aquel en el cual hay una relación lineal entre las fuerzas externas y la deformación correspondiente, por lo tanto esta teoría considera que el tensor de deformación es una función lineal del tensor de esfuerzos. Cuando los cambios en las fuerzas son suficientemente pequeños, la respuesta es siempre lineal.

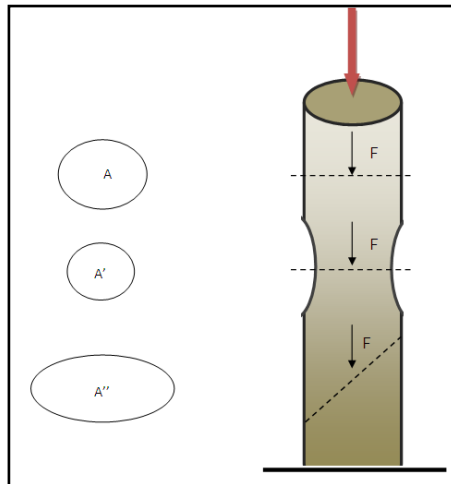
La teoría de elasticidad se fundamenta en dos conceptos **el esfuerzo y la deformación.**

1.3.3 Esfuerzo^{7, 13} El esfuerzo es definido como la fuerza que actúa sobre la superficie de un cuerpo, por lo tanto el esfuerzo se puede representar así:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Por convención en la mecánica de rocas el esfuerzo se considera positivo cuando es compresivo, la razón es que los esfuerzos tratados en la mecánica de rocas son mayormente compresivos. Por lo tanto cuando la roca se somete a tensión el esfuerzo será negativo.

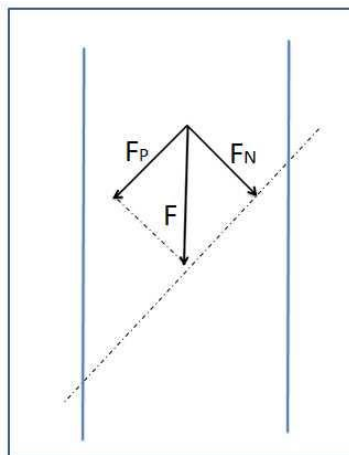
Figura 1. Ilustración de fuerzas y esfuerzo



Fuente: Modificado de SANTA CRUZ (2007)

De acuerdo a la imagen anterior y a la definición de esfuerzo se observa que en el punto b el esfuerzo es mayor porque la superficie sobre la que actúa la fuerza F es menor. Pero al considerar la situación en el punto c observamos que la fuerza no actúa perpendicular a la superficie:

Figura 2. Descomposición de una fuerza



Fuente: FJÆR E (2008)

Esta fuerza puede ser descompuesta en una componente normal a la superficie (F_n) y en un componente paralelo a la superficie (F_p). Por lo tanto hay dos tipos de esfuerzo que pueden actuar sobre una superficie, y la magnitud de cada uno depende de la orientación de la superficie. Estos esfuerzos son

Esfuerzo normal también llamado esfuerzo compresivo que está dado por:

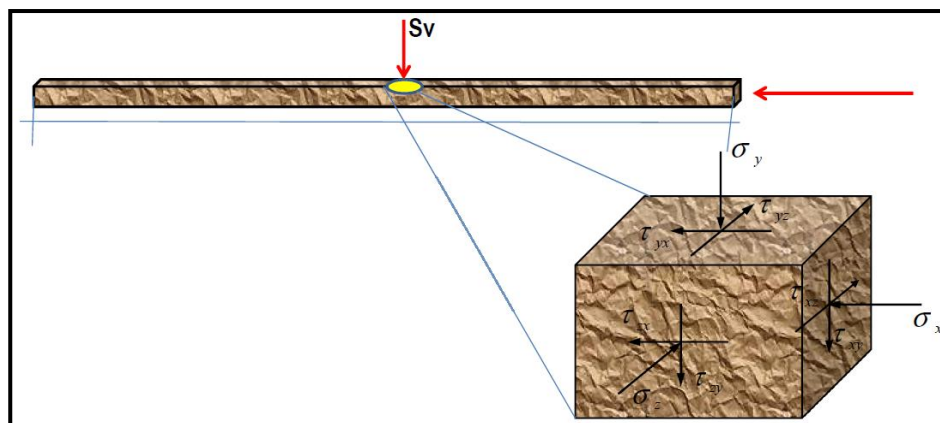
$$\sigma = \frac{F_n}{A''} \quad (2)$$

Esfuerzo cizallante o de corte que está dado por:

$$\tau = \frac{F_p}{A''} \quad (3)$$

Cuando una superficie está sometida a una serie de esfuerzo, estos se distribuyen como una función continuamente variable dentro de esta.

Figura 3. Elemento infinitesimal



Fuente: Schlumberger

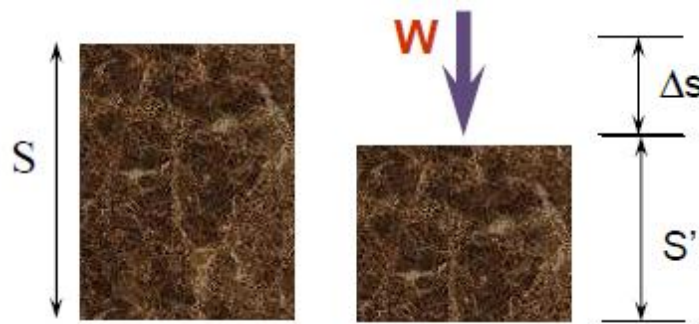
Cada elemento infinitesimal en el material puede experimentar esfuerzos distintos al mismo tiempo, por lo que debemos considerar que los esfuerzos actúan sobre los elementos infinitesimales. ^{schlumberger}

1.3.4 Deformación ^{7,13} La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a la acción de una fuerza externa. Si la posición relativa de las partículas dentro de una muestra han cambiado, y las nuevas posiciones no pueden ser obtenidas simplemente por una translación rígida o una rotación de la muestra se dice que el cuerpo se ha deformado. Pueden presentarse dos tipos de deformación:

La elongación que consiste en una deformación longitudinal y está dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{S-S'}{S} = \frac{\Delta S}{S} \quad (4)$$

Figura 4. Defromacion longitudinal



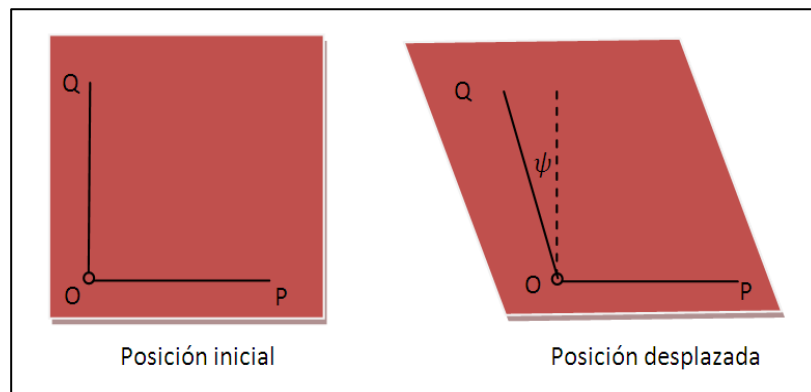
Fuente: Schlumberger

La elongación se considera positiva cuando es el resultado de la acción de una fuerza compresiva, de modo que se cumple la convención de signos para los esfuerzos.

La deformación de cizalladura es el otro tipo de deformación que puede ocurrir, y se puede expresar por el cambio ψ del ángulo entre dos direcciones inicialmente ortogonales.⁶ Por lo tanto en este tipo de deformación no hay un cambio de volumen pero si de forma. La deformación de cizalladura se define como:

$$\Gamma = \frac{1}{2} \tan(\psi) \quad (5)$$

Figura 5. Deformación de cizalladura



Fuente: Modificado de FJÆR E (2008)

1.3.5 Ley de Hooke La ley de Hooke establece que la deformación que experimenta un cuerpo que se comporta elásticamente es directamente proporcional a la fuerza aplicada. Si se considera una muestra de longitud L y de sección transversal A sobre la cual actúa una fuerza compresiva F , la longitud de la muestra se reducirá a L' , por lo tanto el esfuerzo estará dado por $\sigma_x = \frac{F}{A}$ y la correspondiente elongación es $\epsilon_x = \frac{L-L'}{L}$. Si la muestra se comporta de

acuerdo a la teoría elástica lineal, **hay una relación lineal entre σ_x y ε_x , la cual está dada por la ecuación**

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \sigma_x = \frac{F}{E \cdot A} \quad (6)$$

Esta ecuación es conocida como la ley de Hooke donde E es el modulo de Young.⁶

1.3.6 Modulo de Young También conocido como modulo de elasticidad, es una medida de la rigidez del material, es decir de la resistencia a la deformación cuando el material es sometido a esfuerzos uniaxiales.

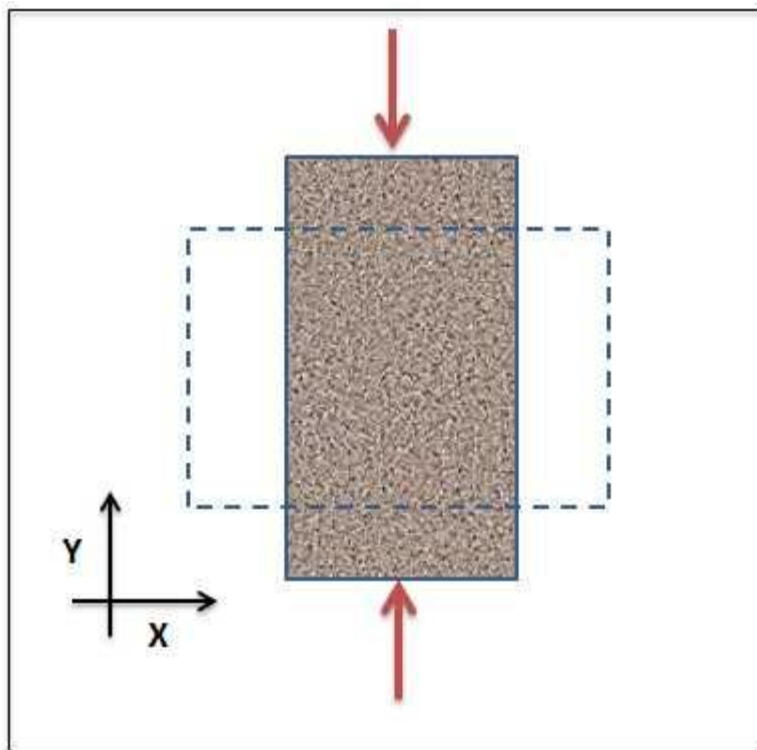
El modulo de Young puede determinarse a partir de las velocidades de las ondas compresionales y de corte registradas por los registros acústicos. Se debe tener en cuenta que existe una diferencia entre el modulo de Young dinámico obtenido a partir de registros y el modulo de Young estático obtenido a partir de pruebas realizadas a núcleos,¹ como las deformaciones de una prueba estática son mucho más grandes que las causadas por las ondas acústicas de un registro, los módulos dinámicos son siempre menores que los estáticos.

1.3.7 Relación de Poisson (ν) Si se considera un esfuerzo compresivo σ_x actuando sobre un cuerpo, el cuerpo reducirá su longitud pero consecuentemente el material experimentara un ensanchamiento, el cual se definirá como una elongación lateral que está dada por: $\varepsilon_y = \frac{D-D'}{D}$, por lo que ε_y tendrá un valor negativo (Ver figura 6)⁷. La relación de Poisson es entonces una medida de la deformación lateral respecto a la deformación longitudinal, es decir si sobre la

muestra actúa una fuerza compresiva será la relación de la elongación lateral respecto a la contracción longitudinal.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (7)$$

Figura 6. Relación de Poisson

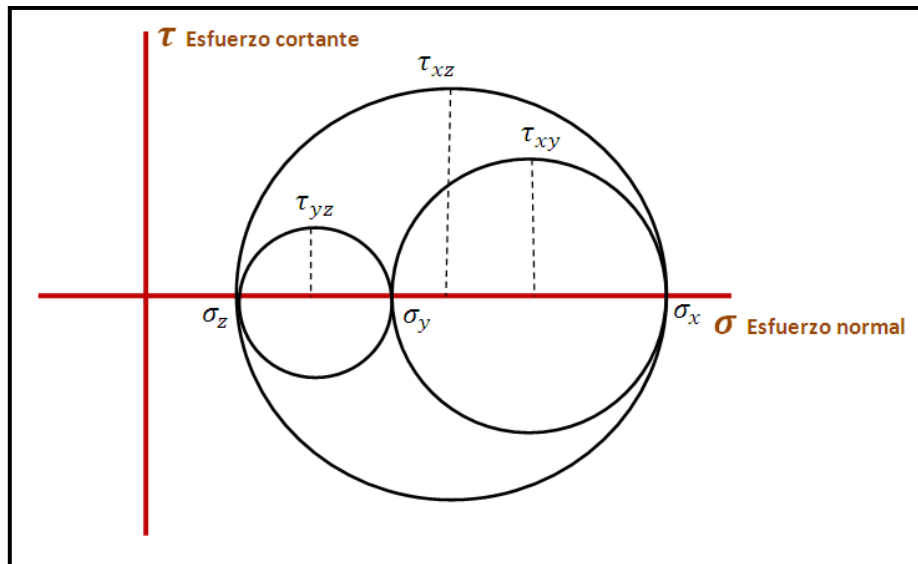


Fuente: Los autores

1.3.8 Círculo de Mohr El círculo de Mohr es un método para representar gráficamente el estado tensional que tiene un punto de un sólido a un instante determinado. Los círculos de Mohr son usados para determina las magnitudes de

los esfuerzos normal y cortante en un plano específico dentro de un elemento.
Schlumberger

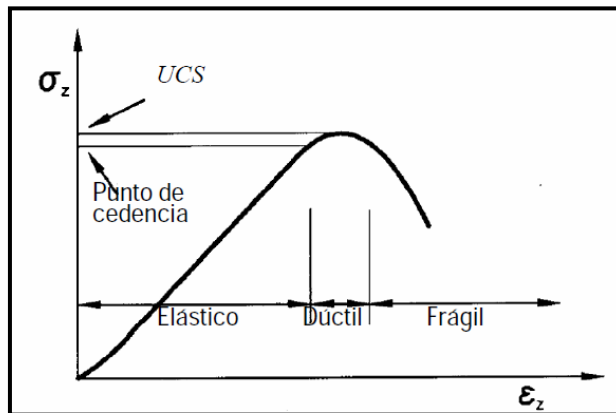
Figura 7. Circulo de Mohr



Fuente: Los autores

1.3.9 Resistencia a la compresión no confinada (UCS) La resistencia a la compresión no confinada (UCS) también denominado resistencia compresiva uniaxial es uno de los parámetros más básicos de la resistencia de la roca. Se determina a partir de pruebas a núcleos, donde la muestra es comprimida uniaxialmente hasta la ruptura, donde el valor máximo de esfuerzo será el UCS. ¹⁴

Figura 8. Grafica esfuerzo-deformación



Fuente: Santa Cruz (2007)

1.4 MECANISMOS DE FALLA DE LA ROCA

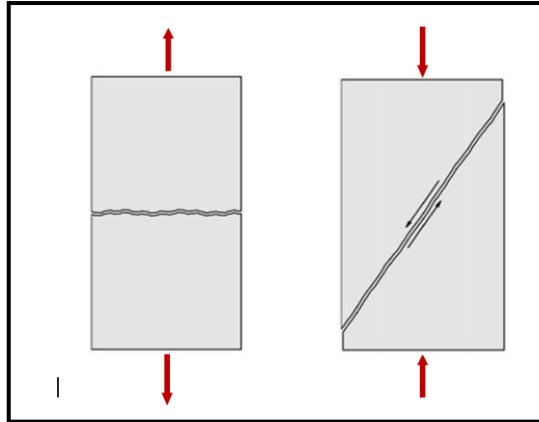
Las fallas en las rocas se generan cuando estas son sometidas a esfuerzos lo suficientemente largos, este importante fenómeno es el que origina problemas severos en la industria del petróleo tales como la inestabilidad de la formación y la producción de sólidos, por lo que su estudio permite predecir bajo qué condiciones de esfuerzos la roca fácilmente fallara.

1.4.1 Fallas por tensión^{7,14} Este tipo de fallas ocurren cuando el esfuerzo de tensión efectivo a través de un plano en la roca excede su límite crítico. Este límite es llamado la resistencia a la tensión, está dada por el símbolo T_o y tiene las mismas unidades del esfuerzo. La resistencia a la tensión es una propiedad característica de cada roca.

Una muestra que sufre una falla por tensión típicamente se divide a lo largo de uno o unos pocos planos de fractura, como se observa en la figura 9. El criterio de falla que explica para que condición de esfuerzo la falla por tensión ocurrirá está dada por:

$$\sigma' \leq -T_o$$

Figura 9. Fallas por tensión (izq.) y cizalla (der.)



Fuente: FJÆR E (2008)

1.4.2 Fallas por cizalladura ^{7,14} Las fallas por cizalladura o por esfuerzo cortante ocurren cuando un esfuerzo de corte a lo largo de algún plano de la muestra es suficientemente alto, eventualmente la zona de falla se desarrollara a lo largo del plano de falla, y los dos lados del plano se moverán uno respecto al otro en un proceso de fricción como se observa en la figura 9.

El criterio de falla para esfuerzos cortantes es más complejo que para esfuerzos de tensión, ya que la resistencia de la roca depende de los esfuerzos confinantes aplicados. Los esfuerzos confinantes proporcionan resistencia a la roca, por lo que las fallas ocurren debido a los esfuerzos desviadores, es decir a la diferencia entre ellos. El criterio de falla establece que el material cederá cuando se alcanza un nivel crítico de esfuerzos de corte, está dado por la expresión:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1' - \sigma_3') = S_o \quad (8)$$

Donde S_0 es la resistencia inherente a la cizalladura también llamada cohesión del material. Para que se genere la falla se deben superar dos componentes de la roca el componente de cohesión y el de fricción.

1.5 ESTABILIDAD DE LA FORMACIÓN

El fin de realizar un modelo geomecánico para un prospecto es predecir y reducir los problemas de estabilidad de la formación, estos problemas se pueden generar por efectos mecánicos cuando están relacionados con los esfuerzos in situ y los esfuerzos inducidos durante la perforación. Cuando son de origen químico se relacionan con las propiedades químicas del lodo de perforación y de la interacción de este con la formación.

Existe una serie de factores que influyen la estabilidad de la formación, por lo que su adecuado conocimiento permite disminuir los NPT, riesgos operacionales y consecuentemente los costos de perforación; estos factores son:

- Esfuerzos in situ
- Dirección de los esfuerzos horizontales
- Presión de poro
- Resistencia de la roca
- Inclinación y azimut del pozo (relacionado con la magnitud y dirección de los esfuerzos horizontales)
- Peso del lodo
- Mecánica de rocas

Algunas de las consecuencias directas que traen los problemas de estabilidad en la formación son:¹⁵

- Incremento del diámetro del agujero debido a derrumbes
- Disminución en el diámetro del agujero debido al hinchamiento
- Volumen excesivo de recortes debido a derrumbes
- Dificultad de circular derrumbes a superficie

- Excesivo volumen de cemento y baja calidad de la cementación en las zonas derrumbadas

Las principales consecuencias indirectas son: ¹⁵

- Altos torques y arrastres
- Pega de tubería
- Incremento de la presión de circulación
- Baja calidad de los registros eléctricos
- Imposibilidad de correr registros
- Problemas para el control de la desviación del pozo
- Fallas en la sarta de perforación

1.6 REGISTROS DE POZO

Los registros de pozos son herramientas geofísicas in situ que se basan en principios eléctricos, acústicos, nucleares y electromagnéticos, que son usadas con el fin de tener información de parámetros físicos y geológicos de la formación tales como: porosidad de la formación, saturaciones de fluidos en formación, resistividad de las rocas, radioactividad de las rocas, cantidad del petróleo móvil, descripción de la litología, entre otras.

La importancia que tienen los registros para la construcción de un modelo geomecánico, se basa en un análisis en conjunto de los perfiles generados por las herramientas de registro, junto con datos de campo, sísmica, núcleos entre otros, que permita conocer detalladamente el yacimiento y los pozos, a modo de poblar y extrapolar las propiedades para un campo.

1.6.1 Registros sínicos¹⁶ Una herramienta sónica consta de un trasmisor que emite impulsos sínicos y un receptor que capta y registra los impulsos. El registro

sónico es simplemente un registro que mide el tiempo de tránsito de las ondas en la roca, las lecturas que se obtienen son el tiempo que requiere la onda para atravesar un pie de formación. Este es conocido como tiempo de tránsito (Δt); el tiempo de tránsito para una formación determinada depende de su litología y la porosidad¹¹. Como las ondas viajan más rápido por un medio sólido que por un fluido, las velocidades de tránsito generalmente incrementan con la profundidad debido a que las rocas están más compactadas. Se pueden identificar zonas subcompactadas, presiones anormales o geopresiones, altas porosidades y esfuerzos verticales cuando se grafica el tiempo de tránsito contra la profundidad.

Cuando se conoce la litología, esta dependencia hace que el registro sónico sea muy útil como registro de porosidad.

$$\phi_{TOTAL} = \frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{matriz}}{\Delta t_{fluido} - \Delta t_{matriz}} \quad (9)$$

Donde

ϕ_{TOTAL} es la porosidad total

Δt_{log} es el tiempo de tránsito de ondas compresionales

Δt_{matriz} es el tiempo de tránsito de la matriz

Δt_{fluido} es el tiempo de tránsito en el fluido

1.6.2 Registros de densidad de la formación^{16,11,7} Esta herramienta usa rayos gamma para medir la densidad de electrones en la formación, con correcciones según la litología se pueden convertir estas lecturas a densidad de masa de las formaciones y ayudar a la geofísica a corregir las mediciones gravimétricas mediante las variaciones de la densidad con la profundidad.

Los registros LDT (“Litho-Density-Tool”) mide la densidad media de la formación (ρ_b) en gr/cc. Para ello, la radioactividad que la formación emite llega a dos detectores ubicados a pocas pulgadas de la fuente, en la herramienta de registro.

Los registros de densidad son útiles ya que permiten determinar propiedades mecánicas, primero porque es necesario para determinar el modulo de elasticidad dinámico a partir de velocidades acústicas y segundo permite obtener una buena aproximación del esfuerzo vertical o de sobrecarga mediante la integración numérica de la densidad respecto a la profundidad, lo que resulta en una buena aproximación para campos de baja actividad tectónica.

El registro de densidad normalmente no está disponible en los primeros cien pies de profundidad del pozo, por lo que se deben asumir valores de densidad para calcular el esfuerzo vertical total. Por ejemplo en zonas que no han sido sometidas a actividad tectónica se pueden asumir densidades del orden de 1.8 – 2.0 gr/cc.

Usando la correlación de Gardner es posible determinar la densidad de la formación a partir de la velocidad de las ondas compresionales y consecuentemente determinar la porosidad de la formación de manera más aproximada.

$$\rho_b = 0.23 \left(\frac{10^6}{\Delta t_{log}} \right)^{0.25} \quad (10)$$

Donde

ρ_b es la densidad total de la formación (fluido y matriz)

$$\phi_{TOTAL} = \frac{(\rho_{matriz} - \rho_b)}{(\rho_{matriz} - \rho_{fluido})} \quad (11)$$

1.6.3 Registro Gamma Ray¹⁶ El registro de Rayos Gamma (GR) es una herramienta para la medición de la radioactividad natural de las formaciones. La

emisión de los rayos gamma se produce por tres series radioactivas que son Potasio (K40), Uranio y Torio. En las formaciones sedimentarias el registro normalmente refleja el contenido de arcilla de las formaciones porque los elementos radioactivos tienden a concentrarse en arcillas y lutitas, las lecturas típicas son del orden de 80-300 API.

Las formaciones limpias generalmente tienen un nivel muy bajo de radioactividad, valores menores a 30 API, a menos que contaminantes radioactivos como cenizas volcánicas o residuos de granitos estén presentes o que las aguas de formación contengan sales radioactivas disueltas. Valores altos de GR representan lutitas o arcillas a esa profundidad mientras que valores bajos indican arenas limpias, donde potencialmente se podrían encontrar hidrocarburos, de modo que la herramienta permite definir los estratos de interés y aquellos donde podrían existir problemas operacionales relacionados con las lutitas durante la perforación.

El registro de GR puede ser corrido en pozo entubado lo que hace muy útil como una curva de correlación en operaciones de cañoneo. Con frecuencia se usa para complementar el registro del SP y como sustituto para la curva SP en pozos perforados con lodo salado, aire o lodos base aceite.

Otras de las aplicaciones del registro Gamma Ray son:

- Identificación de la litología
- Definir y evaluar los minerales radioactivos.
- Estudiar los ambientes deposicionales
- Evaluar el contenido de arcilla
- Detectar capas permeables.
- Correlación pozo a pozo.
- Correlación con registros a pozo revestido.

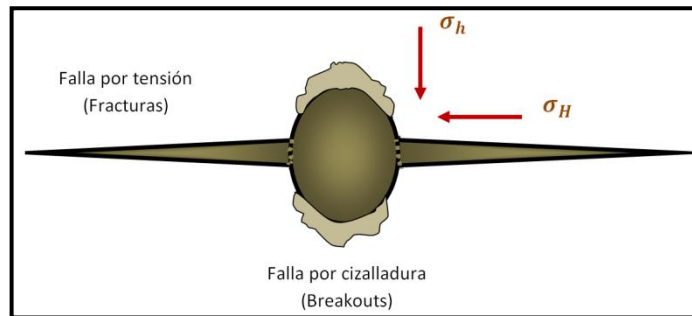
- Determinar la arcillosidad de las capas.

1.6.4 Registro caliper¹¹ El registro Caliper efectúa un conjunto de mediciones del tamaño y la forma de un pozo que ha sido perforado. La herramienta mide la variación del diámetro del pozo con respecto al eje del mismo, es decir modela la forma de la rugosidad de las paredes. Es construido con dos o más brazos articulados que se empujan contra la pared del pozo para efectuar mediciones. Este tipo de registro también ayuda en la determinación de la inclinación y dirección del pozo usando magnetómetros que miden la orientación de la herramienta respecto al campo magnético de la tierra.

La forma de representar las mediciones del registro es realmente sencilla, ya que muestra un perfil del diámetro del agujero (in) vs profundidad del pozo (ft), algunas veces va acompañada de imágenes acústicas del pozo. Los registros Caliper son comúnmente usados para estimar la dirección de los esfuerzos horizontales a partir de la orientación de los breakouts. Los breakouts o derrumbes ocurren en dirección del esfuerzo mínimo horizontal (S_h), mientras que las fallas por tensión o fracturas se generan en dirección del esfuerzo máximo horizontal (S_H), estos dos esfuerzos son ortogonales entre sí. Para poder identificar esfuerzos inducidos en los breakouts del pozo se deben llevar a cabo ciertos criterios de identificación: ⁷

- La herramienta debe rotar por debajo y por encima del breakout del pozo
- La rotación debe detenerse en la zona de breakout
- La elongación en el pozo es claramente vista en el registro. Un par de brazos debe mostrar un brusco incremento o disminución del diámetro del pozo

Figura 10: Esfuerzos horizontales máximo y mínimo



Fuente: Modificado de FJÆR E (2008)

1.7 Flujo de trabajo para la construcción de un MEM

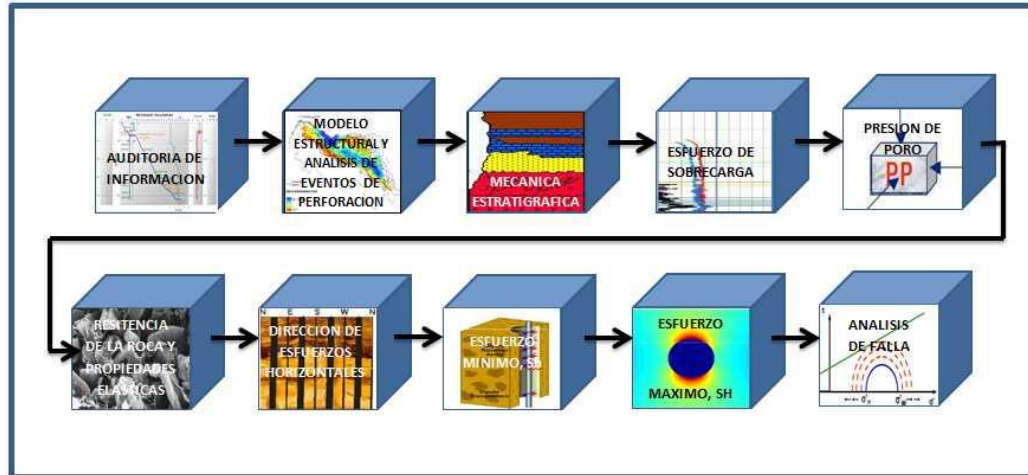
La construcción adecuada de un modelo mecánico del subsuelo requiere la compilación de toda la información disponible de un campo, como la mecánica de rocas, geología, geofísica, petrofísica, perforación y producción, la cual permite la determinación de propiedades geomecánicas. El objetivo es representar numéricamente el conocimiento geomecánico que se tiene del campo para anticipar los problemas operacionales, garantizando la estabilidad de los prospectos de perforación que se desarrollen en el campo.

El modelo debe ser suficientemente representativo, como para modelar la mecánica del campo, por lo tanto debe establecerse una metodología adecuada que permita abarcar todos los pasos necesarios para la construcción del modelo. Esta metodología se presenta a continuación en diez pasos:

1. Auditoria de información.
2. Modelo estructural y análisis de eventos de perforación.
3. Mecánica estratigráfica.
4. Esfuerzos de sobrecarga.
5. Presión de poro.
6. Propiedades elásticas y resistencia de la roca.

7. Dirección de esfuerzos horizontales.
8. Esfuerzo horizontal mínimo.
9. Esfuerzo horizontal máximo.
10. Análisis de falla.

Figura 11. Flujo de trabajo para la construcción de un MEM



Fuente: Modificado de Schlumberger

1.7.1 Auditoria de la información Las razones para realizar una auditoría de datos es localizar y evaluar los datos disponibles del campo e identificar los problemas que ocurrieron durante la perforación de los pozos existentes, para la construcción del modelo geomecánico. Una previa auditoria de datos dará una idea general del grado de incertidumbre y limitaciones del modelo, basado en la información que no está disponible para la construcción del mismo.

A continuación se muestra una tabla con los datos requeridos para la construcción de un MEM.

Tabla 1. Información necesaria para realizar un MEM

Información	Datos necesarios
Geológica	Columna litoestratigráfica de los pozos de correlación
	Columna geológica de la localización
	Sección sísmica entre la localización y sus pozos de correlación
	Superficies y fallas en profundidad para modelo estructural
	Pruebas y descripciones de núcleos
	Análisis de cuencas
Sísmica	DTCO de los pozos de correlación
	Curva T-Z de los pozos de correlación
	Curva T-Z de la localización
	Cubo de velocidad intervalica
Perforación	Perfiles sísmicos
	Reportes diarios de perforación
	Informe final de los pozos
	Perfil del peso del lodo
	Eventos de los pozos de correlación
	Análisis causa-raíz de los eventos de perforación.
	Leak off test, Extended Leak off test, pruebas de integridad de la formación, operaciones de mini fracturamiento.
	Fotografías de recortes /derrumbes de los pozos de correlación
	Registros mecánicos (ROP, WOB, DEC)

Petrofísica	Registros básicos: Gamma Ray (GR), Densidad (RHOB), Sónico (DTCO, DTSM), Neutrón (NPHI), Resistividad, SP y Caliper
	Interpretación petrofísica (VSH, PHIT, PHIE)
	Sónico Scanner
Geomecánica	Imágenes eléctricas, acústicas (FMI, UBI)
	Reportes de interpretación de ensayos geomecánicos
Terminación	Estudio previo de geomecánica
	Presión inicial y final del yacimiento
	Historia de producción de sólidos

Fuente: Modificado de “Las rocas importan: Realidades de la geomecánica”, Oilfield Review.

Luego de realizar la auditoria de datos del campo se pueden seleccionar los pozos de correlación, que para propósitos geomecánicos son los que estén más cercanos a la localización de los prospectos de perforación, para garantizar que fueron perforados en la misma secuencia geológica, además los pozos de correlación deben contar con un buen set de registros, buenos reportes de perforación y ensayos de núcleos para la calibración del modelo.

1.7.2 Modelo estructural y análisis de eventos de perforación. Este modelo es una representación tridimensional de las estructuras geológicas del subsuelo, el cual permite modelar fallas, zonas fracturadas, zonas depletadas, domos salinos entre otros. La mayoría de los problemas de perforación y NPT geomecánicos están relacionados con estructuras complejas en el subsuelo por lo que la incorporación de esta parte del modelo es indispensable para entender la

correlación entre los problemas de perforación y estabilidad de pozos con las características de la geología estructural. La presencia de estructuras complejas requiere de modelos más robustos en 2 y 3 dimensiones, que permitan analizar la estabilidad de cualquier trayectoria futura de perforación, análisis de estabilidad de fallas para minimizar el riesgo de su reactivación y modelos de presión inicial de fractura.

1.7.3 Mecánica estratigráfica Es un modelo físico de la columna estratigráfica que representa cómo se deforma una roca en particular, la idea de este modelo es establecer una relación entre la resistencia de la roca (mecánica de la roca) con las propiedades intrínsecas como porosidad, mineralogía, tamaño de grano etc. para poblar el modelo con propiedades como la resistencia de la roca, a partir de la sísmica y los registros geofísicos. Considera características de la roca como:

- Quebradiza o dúctil
- Químicamente reactiva o inerte
- Resistencia relativa
- Micro mecanismos de deformación – fractura de grano, deslizamiento del límite del grano.
- Deformación homogénea o falla ayudada por planos pre-existentes de debilidad-estratificación, hendidura o fisura, fracturas. ^{Schlumberger}

Los datos de entrada para la construcción de la estratigrafía mecánica son:

- Columna estratigráfica
- Geología estructural
- Registros de lodo y descripción de los recortes
- Muestra de recortes y análisis
- Descripción de los núcleos y recortes

- Registros geofísicos: SP, GR, resistividad, sónico y densidad.
- Interpretación Petrofísica

1.7.4 Esfuerzo de sobrecarga La presión de sobrecarga es la presión ejercida por el peso de los estratos suprayacentes, incluyendo la roca, los fluidos de los poros y el peso correspondiente al tirante de agua si es offshore. Si se integra el registro de densidad respecto a la profundidad se obtiene el esfuerzo de sobrecarga.

$$S_v = g \int_0^z \rho_b dz \quad (13)$$

Cuando no se dispone de registro de densidad (RHOB), se deben usar métodos para estimar esta propiedad a partir de los registros disponibles en el pozo, existen por ejemplo la correlación de Miller, donde la densidad depende de la porosidad y las correlaciones de Gardner (ver ecuación 10) y Belloti, en el cual la densidad es una función del tiempo de transito de las ondas en la formación. La ecuación de Gardner es la más comúnmente usada en la industria del petróleo debido a que ha demostrado tener buenos resultados, por lo tanto será la ecuación usada para el desarrollo de este estudio, ya que el Campo Colorado no dispone de registros de densidad.

1.7.5 Presión de poro Las rocas son materiales porosos, que tienen la capacidad de almacenar fluidos en esos espacios vacíos. Dichos fluidos están confinados en el medio poroso debido a los procesos de depositación y compactación de sedimentos que se dan sucesivamente sobre la roca, la presión de confinamiento de los fluidos se conoce como la presión de poro. La presión de poro es un parámetro importante en el estudio de la mecánica de rocas, ya que la deformación del medio poroso es tanto consecuencia de los esfuerzos sobre la roca como de la presión de de los fluidos.

Terzaghi definió entonces un esfuerzo efectivo, debido a que según la teoría de la poroelasticidad el fluido de los poros ejerce una presión en todas las direcciones, por lo tanto debe atenuar parte de los esfuerzos totales aplicados al sistema y será el que gobierne el mecanismo de falla de la roca.

$$\sigma' = \sigma - P_p \quad (14)$$

Biot incorporo a este concepto, del coeficiente de Biot, donde el esfuerzo efectivo es el esfuerzo total menos la presión de poro la cual esta multiplicada por la constante de Biot (α), ya que realmente un porcentaje de la presión del fluido es responsable de reducir el esfuerzo que actúa sobre la matriz. La ecuación que relaciona los efectos de la presión de poro es la siguiente.

$$\sigma' = \sigma - \alpha P_p \quad (15)$$

Una de las razones más importantes para realizar un estudio de la presión de poro, es determinar la mínima densidad de lodo que se debería usar durante la perforación de un pozo, ya que del peso de la columna de fluido depende el control de las presiones en el yacimiento y por tanto la prevención de inlfujos y patadas. Los métodos comúnmente usados para estimar la presión de poro son el método de Eaton y el método de Bowers.

El método de Eaton es uno de los más usados en la industria, en este método la presión de poro es función del esfuerzo de sobrecarga y de la relación entre la porosidad y la tendencia de compactación de la formación, ya que el método considera que la tendencia del esfuerzo efectivo no es constante y se ve afectado por la variación de los registros en zonas de presiones anormales. Los registros que permiten observar el cambio de tendencia son el sónico y resistivo, las ecuaciones del método de Eaton a partir de estos registros son:

$$PP = S_v - (S_v - PP_n) \left(\frac{R_0}{R_n} \right)^{1.2} \quad (16)$$

$$PP = S_v - (S_v - PP_n) \left(\frac{\Delta t_o}{\Delta t_n} \right)^{1.2} \quad (17)$$

1.7.6 Propiedades elásticas y resistencia de la roca. Esta parte del modelo busca integrar conceptos de la mecánica de rocas para lograr un entendimiento de los esfuerzos, su distribución, cómo se fracturan las rocas, y de cómo obtener propiedades de las rocas a partir de pruebas y correlaciones. Las propiedades que debe considerar el modelo se pueden clasificar en:

Propiedades Elásticas

- Módulo de Young
- Relación de Poisson
- Coeficiente de Biot

Propiedades de resistencia de la roca

- Resistencia a la compresión no confinada (UCS)
- Resistencia a la Tracción
- Ángulo de Fricción

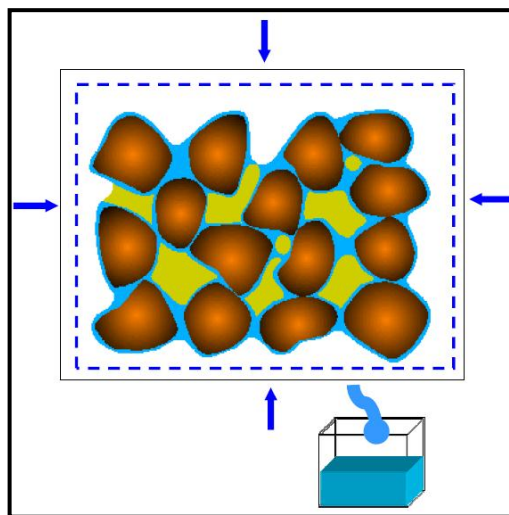
Como se mencionó al inicio del capítulo los conceptos de la geomecánica se fundamentan en la teoría de la elasticidad lineal, ya que la mayoría de los materiales son capaces de recuperarse de deformaciones producidas por esfuerzos, pero esta teoría no describe el comportamiento real de materiales con porosidad y permeabilidad como son las rocas.

La particularidad que tienen las rocas y los materiales porosos respecto a cualquier otro material es que estas responden a la presión de poro y a los

esfuerzos aplicados, este fenómeno es representado mediante el coeficiente de Biot (α).

De acuerdo con Biot, α mide la proporción entre el volumen de fluido movilizado respecto al cambio de volumen de la roca, si esta última es comprimida mientras se permite el flujo del fluido.

Figura 12. Coeficiente de Biot



Fuente: Schlumberger

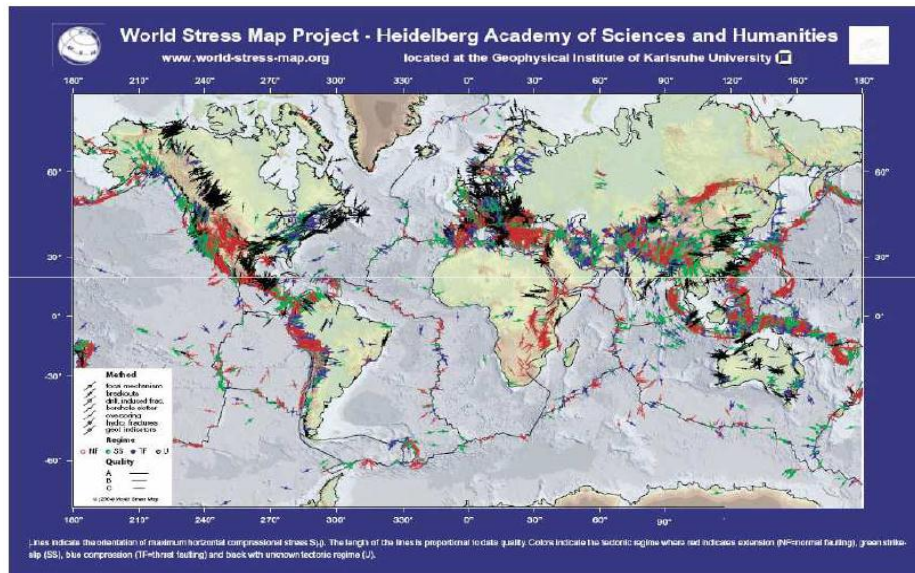
La constante elástica de Biot de una roca es un parámetro importante, ya que relaciona esfuerzo y la presión de poro, describe que tan compresible es el esqueleto mineral seco, respecto de la matriz, esto implica que α debe ser función de la permeabilidad y la compresibilidad de la roca. Schlumberger

1.7.7 Dirección de esfuerzos horizontales La orientación de los esfuerzos horizontales está gobernada por las fuentes que generan los mismos, estas fuentes se pueden clasificar por:

- Esfuerzos controlados por las placas
 - Fuerza de empuje de las cadenas montañosas
 - Movimientos de las placas
 - Fuerzas de succión cercanas a zonas de subducción
- Topografía:
 - Las cadenas montañosas generan esfuerzos importantes en profundidad
- Pliegues o flexiones litoesfericas
 - El plegamiento en la litosfera es el resultado de las cargas localizadas.

El Mapa mundial de Dirección de Esfuerzos, el cual está determinado en gran medida por la interacción de placas y los sistemas montañosos, presenta los principales esfuerzos a los que está sometido una determinada región del planeta, por lo que resulta en una primera aproximación para determinar la dirección de los esfuerzos horizontales.

Figura 13. Mapa Mundial de Esfuerzos

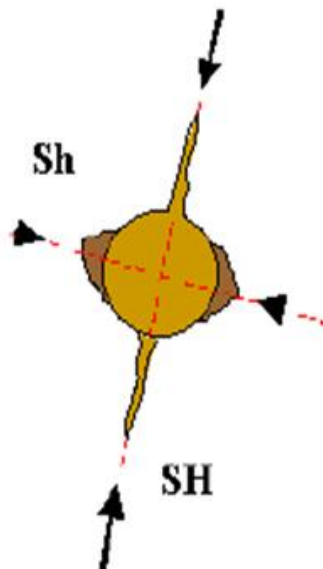


Fuente: www.world-stress-map.org/

Una forma de determinar la dirección de los esfuerzos horizontales a una escala local, es a partir de los registros, Caliper orientado, imágenes de pared de pozo o el sonic scanner.

La dirección de los esfuerzos a partir de los Breakouts, se basa en el hecho que el esfuerzo horizontal mínimo (S_h) está en dirección de los breakouts mientras que el esfuerzo horizontal máximo (S_H) sigue la dirección de las fracturas inducidas por la perforación.

Figura 14. Breakout y fracturas en el wellbore

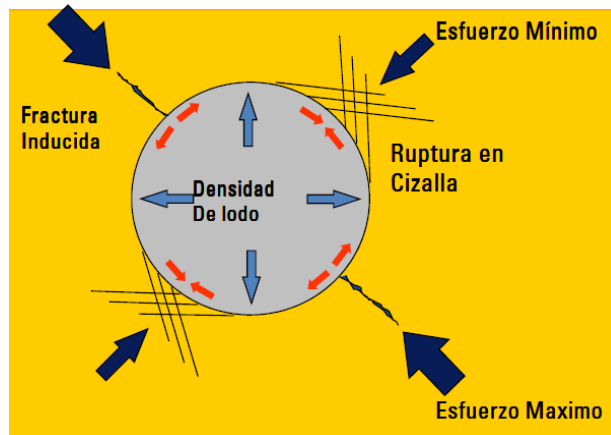


Fuente: Schlumberger

El efecto que tiene los esfuerzos en la deformación del agujero, se puede explicar por dos mecanismos básicos por los cuales las rocas fallan. Las fallas por tensión que están asociadas a las fracturas y pérdidas de circulación, típicamente son causadas por un alto peso de lodo, ya que el esfuerzo horizontal mayor tiende a superar los esfuerzos tangenciales que existen alrededor de la cara del pozo. Los breakouts se asocian a fallas por cizallamiento, este mecanismo de falla se da cuando el esfuerzo cizallante es superior a la resistencia de la roca al

cizallamiento y a las fuerzas de fricción, es consecuencia de bajas densidades de lodo y genera una ovalización del agujero.

Figura 15. Mecanismos de falla en el wellbore

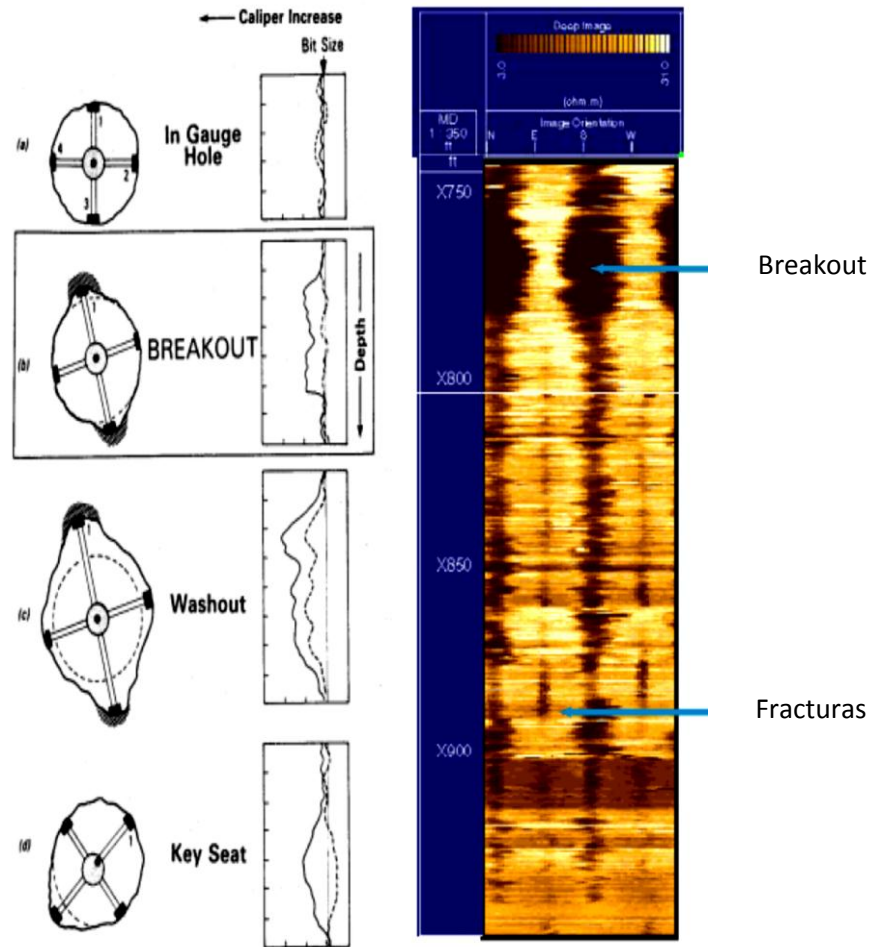


Fuente: Schlumberger

Cuando un breakout ocurre en el mismo azimuth del pozo, es probablemente debido a la acción del proceso de perforación y no de esfuerzos. Adicionalmente, los breakouts pueden ocurrir por efecto de un plano de debilidad, o asociado a esfuerzos de cizalla de las fracturas o de los planos de estratificación.

El perfil creado por la herramienta de registro Caliper permite identificar los breakout, mostrando intervalos donde existe un drástico incremento en el diámetro del agujero, mientras que las menores lecturas del registro deberían ser cercanas al diámetro de la broca con la que se perforo el pozo. Los registros de imagen de la cara del pozo permiten identificar tanto breakouts como fracturas inducidas. Cuando se dispone de estas imágenes se puede hacer una buena correlación con el Caliper para identificar la dirección de los esfuerzos horizontales.

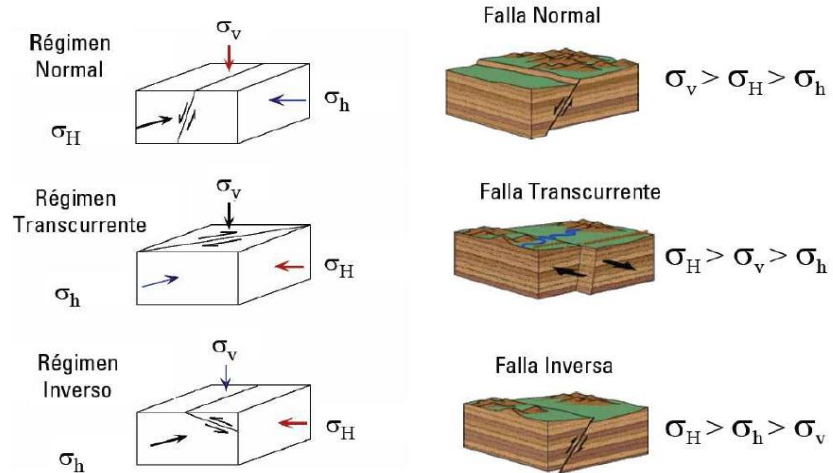
Figura 16. Identificación de breakouts y fracturas



Fuente: Modificado de Faeger(2008)

1.7.8 Magnitud de los esfuerzos horizontales En algunas formaciones los esfuerzos horizontales son iguales, sin embargo cuando se estudian estructuras masivas, cercanas a domos salinos o fallas, se puede observar que los esfuerzos horizontales pueden ser diferentes. Según el tectonismo que predomine en la formación se puede observar cuál de los tres esfuerzos es mayor, a continuación se presenta el modelo Andersoniano de falla:

Figura 17. Modelo Andersoniano de falla

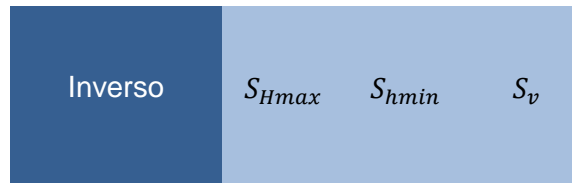


Fuente: “Dirección de esfuerzos magnitud y calibración”, Schlumberger

Este cuadro presenta un resumen de las magnitudes relativas de los esfuerzos según el régimen de esfuerzos

Tabla 2. Magnitud de los esfuerzos y régimen de esfuerzos

REGIMEN	S1	S2	S3
Normal	S_v	S_{Hmax}	S_{hmin}
Transcurrente	S_{Hmax}	S_v	S_{hmin}



Fuente: Los autores.

Para determinar la magnitud de los esfuerzos horizontales mínimos y máximos se pueden usar pruebas y correlaciones como se muestra a continuación:

Esfuerzo horizontal mínimo

- Mediciones Directas
 - Extended Leak off Test (ELOT)
 - APWD (Annular Pressure While Drilling)
 - Presión de cierre
 - Datos de Minifrac
- Mediciones Indirectas
 - Eventos de Pérdida de circulación
 - Presión de cierre en un fracturamiento hidráulico.

Esfuerzo horizontal máximo

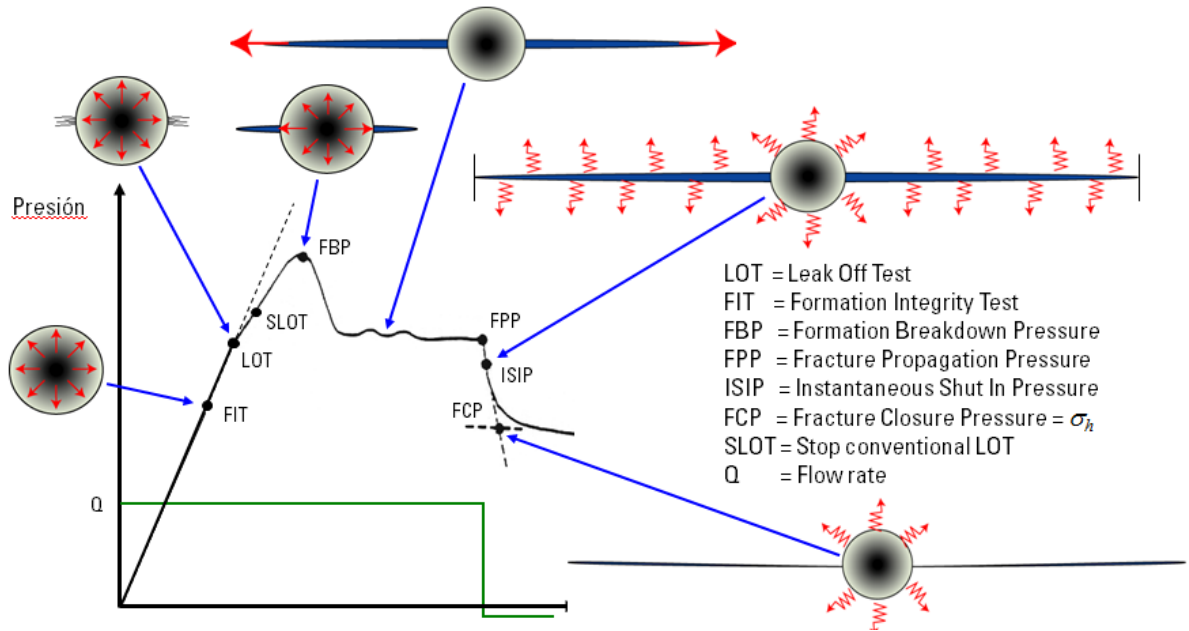
- No hay mediciones directas
- Mediciones Indirectas
 - Modelado Geomecánico a través del esfuerzo horizontal mínimo, presión de fractura y presión de colapso

El propósito de una **Leak off test** es determinar la máxima presión que puede soportar el pozo en la nueva sección que se va a perforar sin causar fracturas y pérdidas de circulación, sin embargo esta prueba no permite determinar el esfuerzo horizontal mínimo, sino la densidad de lodo adecuada para la nueva

sección del pozo. La prueba se lleva a cabo luego de que el casing ha sido cementado, se perfora el zapato y adicionalmente de 10-20ft de formación. La prueba se realiza presurizando esta sección de open hole, la presión es incrementada en el pozo mientras se bombea un volumen a tasa constante, esto produce una línea recta en una gráfica de presión vs volumen. El punto donde la respuesta de la presión empieza a desviarse de la línea recta es definido como el punto de leak off. Este es el punto donde la fractura empieza a iniciarse, una leak off test es interrumpida lentamente después de este punto, incluso si la presión continua incrementando por encima de la presión de leak off.⁷

Para hacer una Leak off test aplicable para la determinación del esfuerzo horizontal mínimo, se debe hacer una extensión de la prueba estándar, es decir una extended Leak off test (XLOT o ELOT). La diferencia respecto a la prueba tradicional es que el bombeo se continúa más allá del punto de Leak off y más allá de la presión de ruptura. Para obtener una estimación confiable de los esfuerzos, el bombeo debe continuar hasta tener un crecimiento estable de la fractura.⁶ En la siguiente grafica se muestra como obtener el esfuerzo horizontal mínimo (S_h) a partir de una Extended Leak Off Test (para formaciones sin fracturas), donde el esfuerzo horizontal mínimo será equivalente a la presión de cierre de fractura (FCP).

Figura 18. Leak Off Test



Fuente: Edwards, S.T., Bratton, T.R., and Standifird, W.B.; *Accidental Geomechanics – Capturing in-situ stress from mud losses encountered while drilling*, SPE/ISRM 78205, 2002.

El esfuerzo horizontal mínimo y máximo pueden ser también determinados usando la ecuación poroelástica como se muestra a continuación.

Ecuación Poroelástica

$$\sigma_h = \alpha P_p + \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_h + \frac{E \cdot \nu}{1-\nu^2} \epsilon_H \quad (18)$$

$$\sigma_H = \alpha P_p + \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-\nu^2} \epsilon_H + \frac{E \cdot \nu}{1-\nu^2} \epsilon_h \quad (19)$$

Dónde:

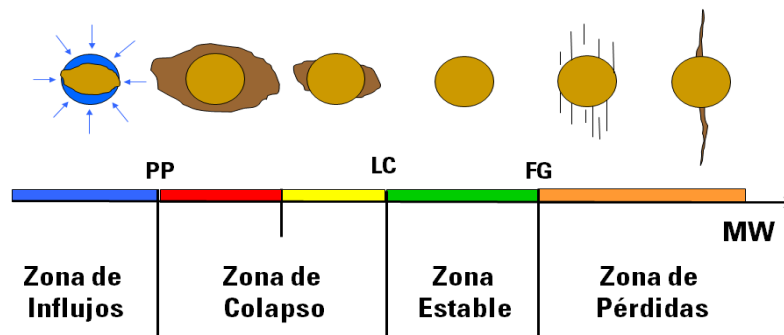
σ_h Esfuerzo horizontal mínimo

- σ_H Esfuerzo horizontal máximo
- α Coeficiente de Biot
- p_p Presión de poro
- σ_v Esfuerzo vertical o Sobrecarga
- E Módulo de Young
- ν Relación de Poisson

Deformaciones tectónicas mínima y máxima (factores ε_h y ε_H).

1.7.9 Análisis de falla El análisis de falla es el último paso de un modelo geomecánico, el cual busca garantizar la estabilidad de los pozos que serán perforados, la idea es encontrar una ventana de lodo segura. La siguiente figura es una descripción esquemática de los estados de estabilidad de pozo según la densidad de lodo, en la imagen la densidad incrementa de izquierda a derecha.

Figura 19. Análisis de estabilidad de pozo



Fuente: Schlumberger

Cuando se tiene una baja densidad de lodo, menor a la presión de poro el principal riesgo es un influjo (o una patada dependiendo de la severidad del evento). El segundo estado corresponde a la zona de colapso también asociado a bajas densidades de lodo, incapaces de soportar las paredes del pozo, en términos de perforación las consecuencias son washouts y breakouts. Teóricamente la densidad de lodo debería estar entre el colapso controlado y el

gradiente de fractura, esta corresponde a la zona estable, pero incluso durante la perforación son aceptables densidades de lodo ligeramente inferiores al colapso controlado, ya que permite incrementar la tasa de penetración (ROP) y disminuye los riesgos de una pega de la sarta de perforación, debido a que durante la operación el agujero no estará todo el tiempo en calibre con el BHA. Por encima del gradiente de fractura existe el riesgo de pérdidas de circulación debido a fracturas inducidas por la alta densidad de lodo.

En la siguiente tabla se indican los datos necesarios para determinar una ventana de lodo segura.

Tabla 3. Datos para determinar la ventana de lodo

	Datos de Calibración	Datos de entrada
Presión de poro	Influjos, quiebre de velocidad, recortes astillados	DTCO, Resistividad, RHOB, Sv
Presión de colapso	Derrumbes en imágenes (UBI, FMI), Caliper Orientado, y reportes de perforación.	DTCO, E, UCS, S_H, S_h, S_V, P_p , orientación de esfuerzos, azimut.
Esfuerzo mínimo, Gradiente de fractura	LOT, ELOT, MiniFrac, Fracturamiento hidráulico, pérdidas de circulación, fractura inducida en imágenes.	E, S_V, P_p , Coeficiente de Biot
Limite de rompimiento	Fractura inducida en imágenes, LOT, ELOT, Perdida total de circulación	DTCO, E, S_H, S_h, S_V, P_p , orientación de esfuerzos, azimut.

Fuente: Schlumberger

Este flujo de trabajo da como resultado un modelo geomecánico de estabilidad de pozo que tiene como fin mejorar considerablemente el rendimiento de las

operaciones de perforación y hacer una previsión de la estabilidad del pozo, el modelo entrega toda la información relevante para planificar la perforación, como lo es: un estado mecánico, una ventana de lodo segura, una columna geológica para correlacionar con los eventos de perforación, la evaluación de riesgos para una trayectoria de perforación dada y las acciones y procedimientos aconsejados.

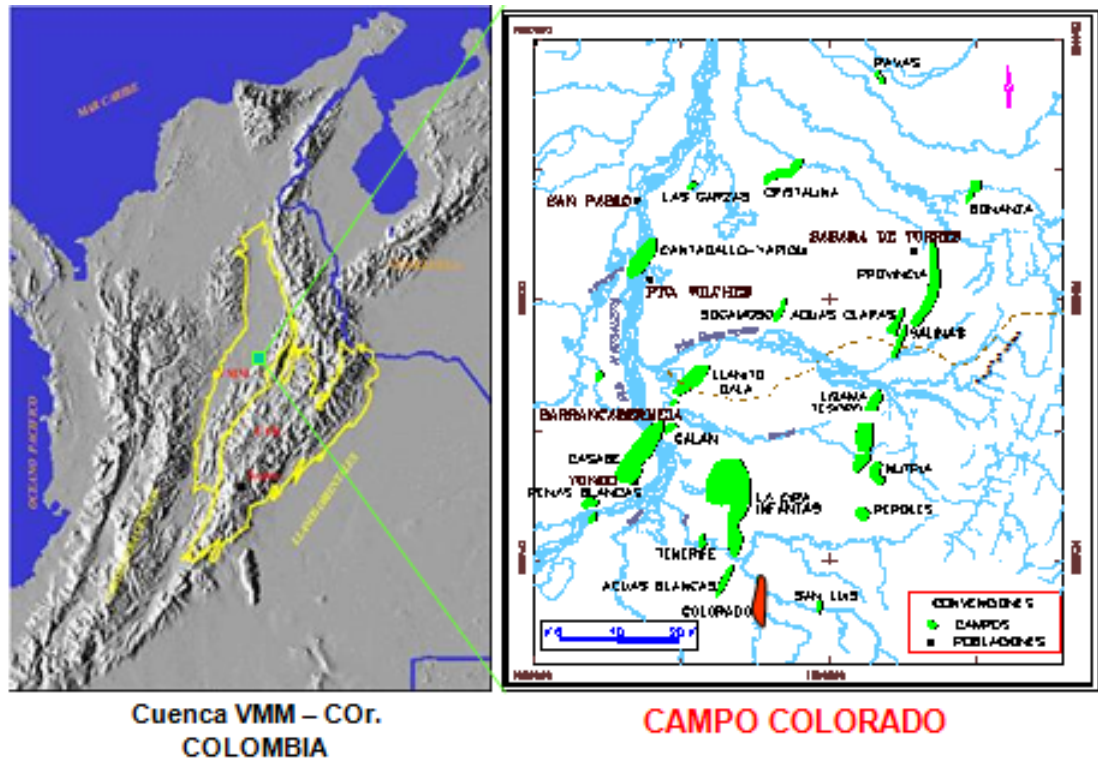
2. AUDITORIA DE DATOS

En esta etapa se reúne, organiza, evalúa y analiza la información disponible del campo, la cual incluye los datos de localización, geología, geofísica, perforación, registros de pozo, petrofísica, estados mecánicos, corazones, completamiento, historias de pozo, etc. Toda esta auditoría se realiza con el fin de tener un inventario general de la información disponible por pozo, para facilitar la selección de los pozos off set, que serán usados para la construcción del MEM. La auditoría se estructura en dos escalas de estudio que son: la información de campo (modelos geológicos, petrofísicos, sísmica, etc.) y la información disponible por pozo (registros, reportes de perforación, topes, etc.).

2.1. INFORMACIÓN DE CAMPO

2.1.1 Localización El campo Colorado se localiza en el corregimiento de Yarima, en el departamento de Santander, lo que comprende geológicamente a la Cuenca del Valle Medio del Magdalena, en la provincia Estructural del piedemonte Occidental de la Cordillera Oriental, al sureste del municipio de Barrancabermeja (Santander), y del sur del Campo La Cira-Infantas. La Figura 20 permite apreciar la localización geográfica y los campos cercanos al campo Colorado.

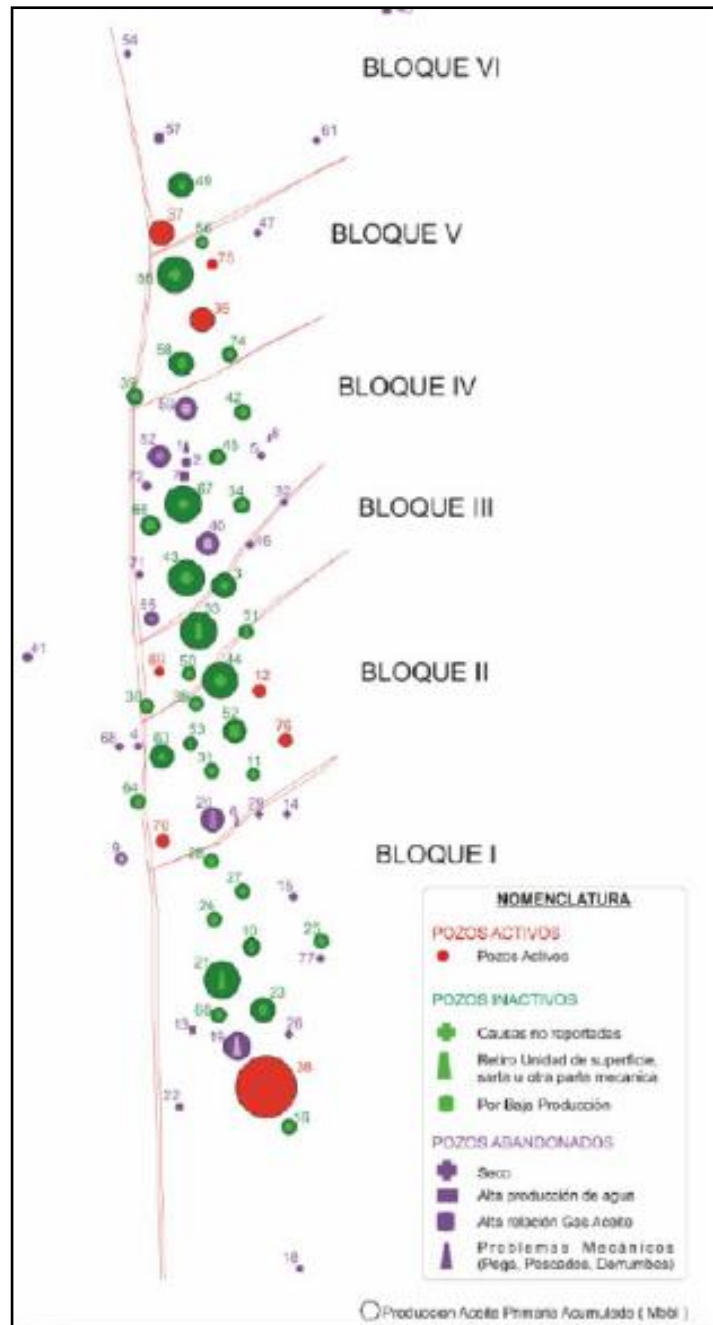
Figura 20. Localización del campo Colorado



Fuente: Informe Geología Final Campo Colorado (2003)

Una vista general de los pozos pertenecientes al Campo Colorado se muestra en la Figura 21 en la que se presenta el estado actual de cada pozo.

Figura 21. Estado actual pozos Campo Colorado



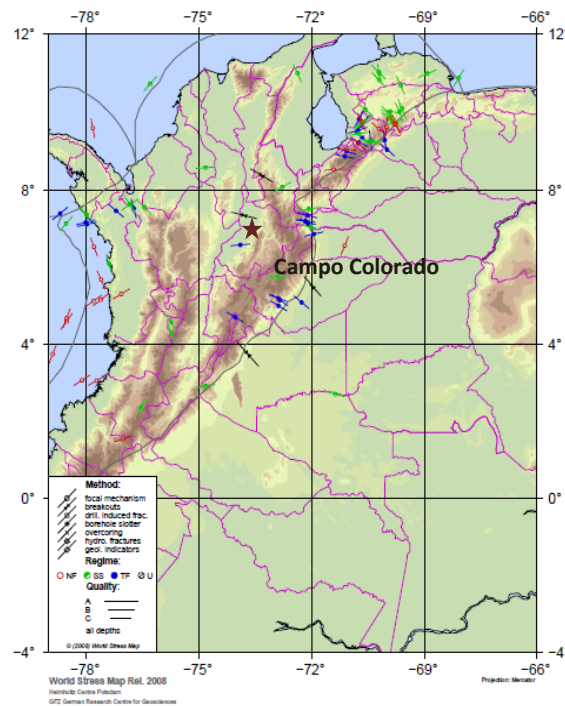
Fuente: GONZALES, M., GÓMEZ, M

2.1.2 Campo de esfuerzos

- **Dirección de esfuerzos**

La primera revisión de la dirección de esfuerzos fue el mapa mundial de dirección de esfuerzos. Como se ve en la figura 22, el campo no se encuentra en una zona que presente un régimen activo de esfuerzos. Del mapa se puede determinar el azimut del esfuerzo mínimo y máximo, a partir de la orientación del breakout, se puede decir que el esfuerzo mínimo es de 5 grados con respecto al norte.

Figura 22. Estado de esfuerzos campo Colorado



Fuente: www.world-stress-map.org/

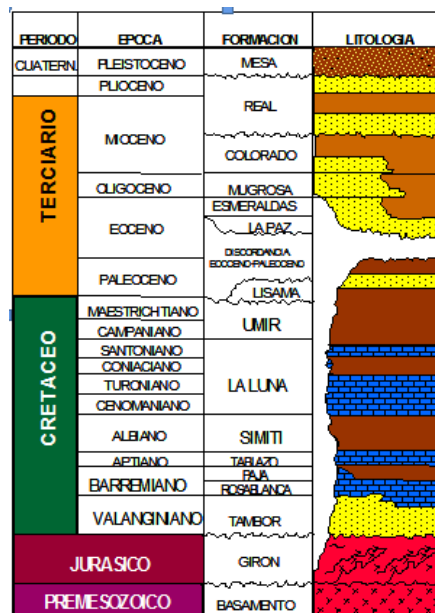
También se revisó la disponibilidad de información adquirida de CALIBAN e imágenes de FMI para la identificación de ovalizaciones del hueco, fracturas inducidas y breakouts, pero no se cuenta con dicha información.

2.1.3 Modelos del campo Campo escuela colorado suministro un informe geológico realizado por Ecopetrol en el que se presenta un modelo estático, que está compuesto por los modelos estructural, petrofísico y estratigráfico para el campo. Estos modelos son el resultado de estudios geológicos y análisis ingenieril basado en información sísmica, registro de pozos, propiedades de los fluidos e historia de producción. Esta información es útil a la hora de entender la estructura del campo, las fallas y la petrofísica.

- **Modelo Estratigráfico**

El estudio de este modelo permite tener una idea general de la composición y la secuencia geológica que presentan las formaciones del campo, lo que resulta útil para la construcción de la litología del modelo geomecánico, ya que es posible correlacionar la petrofísica de cada pozo con la estratigrafía del reporte.

Figura 23. Columna estratigráfica Generalizada Cuenca VMM



Fuente: DUQUE, C.

La siguiente tabla presenta una descripción general de las formaciones que atraviesa los pozos del campo colorado.

Tabla 4. Características de las formaciones de Campo Colorado

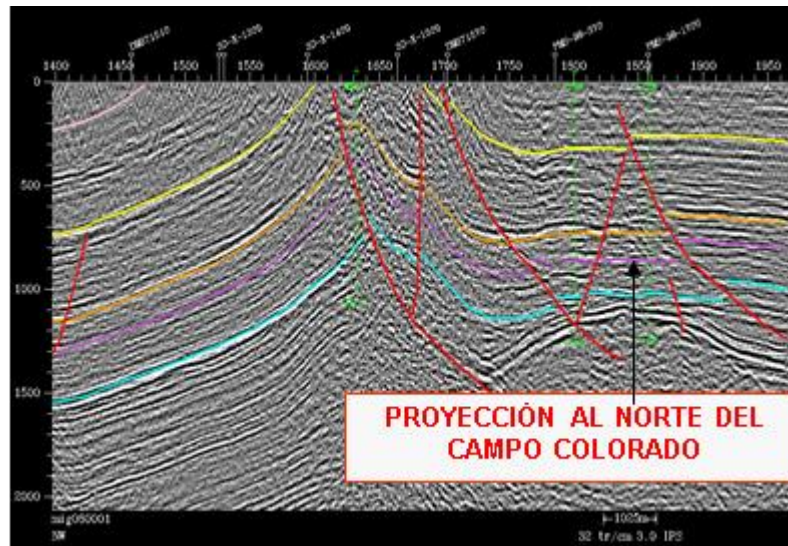
Formación Colorado <i>(Mioceno inferior a Mioceno medio)</i>	Formación Mugrosa <i>(Oligoceno – Mioceno inferior)</i>
<p>La Formación Colorado presenta un espesor de hasta 3.200 pies en el sector de los pozos Sogamoso–1 y El Dorado–1 (Campo Sogamoso hacia el norte del Campo Colorado). Está conformada por una serie de lodolitas masivas con intercalaciones de areniscas de grano fino a grueso de origen aparentemente fluvial.</p>	<p>La Formación Mugrosa tiene un espesor que varía desde 1.900 a 2.400 pies y está compuesta por intercalaciones de areniscas de grano fino y lodolitas varicoloreadas, acumuladas dentro de un ambiente de sistemas de ríos meándricos</p>
Formación Esmeraldas <i>(Eoceno tardío)</i>	Formación La Paz <i>(Eoceno medio)</i>
<p>La Formación Esmeraldas se encuentra suprayaciendo la Formación La Paz, con un espesor que puede alcanzar unos 1.500 pies. Litológicamente está compuesta de espesos intervalos de lodolitas y limolitas oscuras con delgados mantos de carbón depositados en ríos meándricos</p>	<p>La Formación La Paz está constituida por areniscas de grano grueso a conglomeráticas y su espesor puede alcanzar hasta los 2.000 pies.</p>

Fuente: Autores

- **Modelo Estructural**

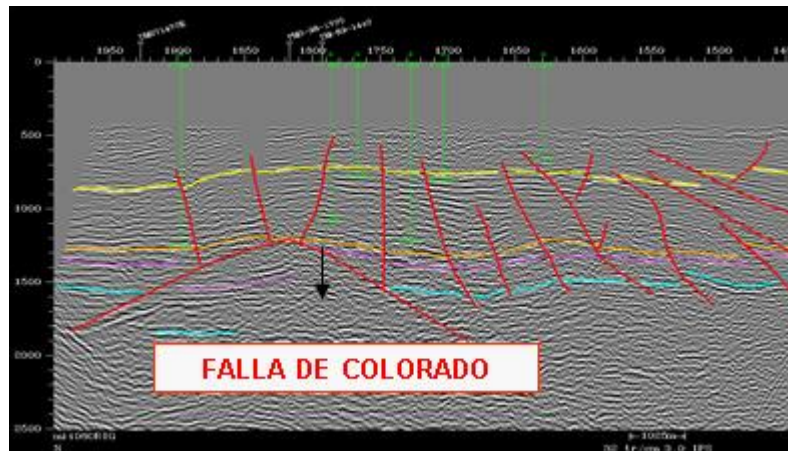
En este modelo se presenta la sísmica existente en el campo, la cual permitir modelar la estructura geológica del subsuelo y de esta forma entender la correlación entre las estructuras complejas (como las fallas que presenta el campo) y los problemas de perforación. Un modelo estructural permite la adecuada construcción de un esquema de perforación de los pozos en el campo.

Figura 26. Línea Sísmica PMS 981700. Sentido SW-NE.



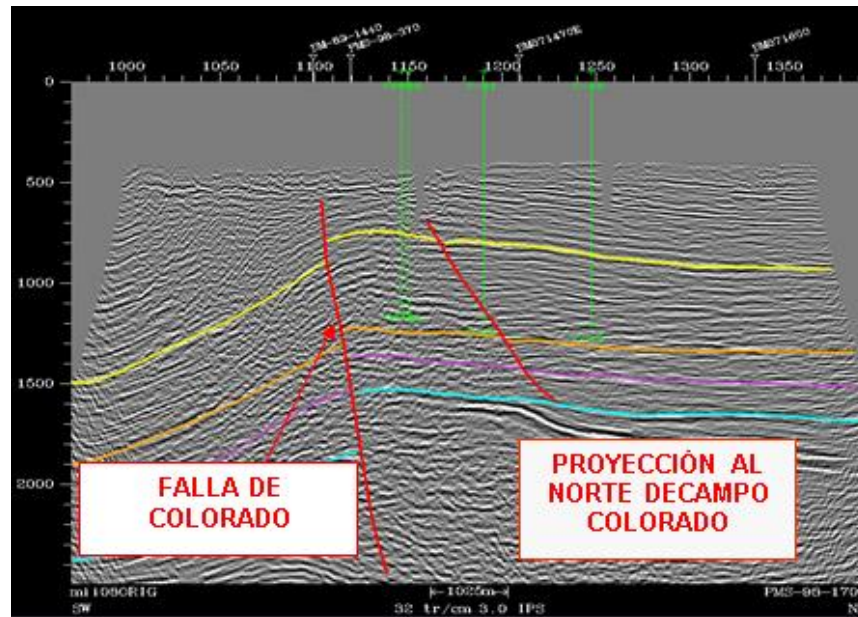
Fuente: DUQUE, C.

Figura 27. Línea Sísmica -PMS 98-1700. Sentido SW-NE



Fuente: DUQUE, C.

Figura 28. Línea Sísmica –DM 87-1470 E. Sentido NW-SE.



Fuente: DUQUE, C.

- **Modelo Petrofísico**

En este modelo se propuso una metodología para el cálculo de VSH y PHIT a partir del registro SP (potencial espontáneo).

La ecuación empleada para la normalización del SP es:

$$SPN = \frac{(SP_{log} - SP_{min})}{(SP_{max} - SP_{min})} * 100 \quad (20)$$

Donde

SPN: Curva de SP normalizada

SP log: Valor del perfil de SP, mv

SP min: Valor del SP mínimo, mv

SP máx.: Valor del SP máximo, mv

Para el cálculo del VSH se emplearon las siguientes correlaciones:

$$ISH = \frac{(SPN - SPN_{cl})}{(SPN_{sh} - SPN_{cl})} \quad (21)$$

$$VSH = 1.7 - (3.38 - (ISH + 0.7)^2)^{1/2} \quad (22)$$

Donde:

ISH: Índice de arcillosidad V/V

SPN_{cl}: Valor de SP normalizado en arenas

SPN_{sn}: Valor de SP normalizado en arcillas

VSH: Fracción de Arcilla

Esta metodología no se decidió usar para el cálculo del VSH, ya que las lecturas del SP son muy sensibles a las características del lodo que se encuentra en el pozo mientras se corre la herramienta, como no se conoce una descripción de las características del lodo no es confiable determinar una petrofísica con los valores de este perfil.

2.2. INFORMACIÓN DE POZO

2.2.1 Registros de pozo Para el desarrollo del modelo geomecánico es necesario la determinación de propiedades elásticas de la roca, las cuales incluyen módulos dinámico, estáticos y la constante poro-elástica, el flujo de trabajo para determinar estas propiedades está basado en los registros sísmico (DT) y densidad (RHOB). Teniendo en cuenta la importancia de disponer de los registros acústicos y de densidad para la realización de un modelo geomecánico, y una vez realizada la primera revisión de los registros corridos en los pozos, se encontró que ninguno de ellos cuenta con el registro de densidad haciendo que el primer filtro de la información sea establecer los pozos que tiene registro sísmico

compresional. La siguiente tabla presenta los pozos por bloque que cuentan con dicho registro.

Tabla 5. Pozos con registro sónico compresional

Pozos con Registro Sónico por Bloque para el C. Colorado				
Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4	Bloque 5
Col 38	Col 70	No hay	Col 66, 67, 71,72	Col 75

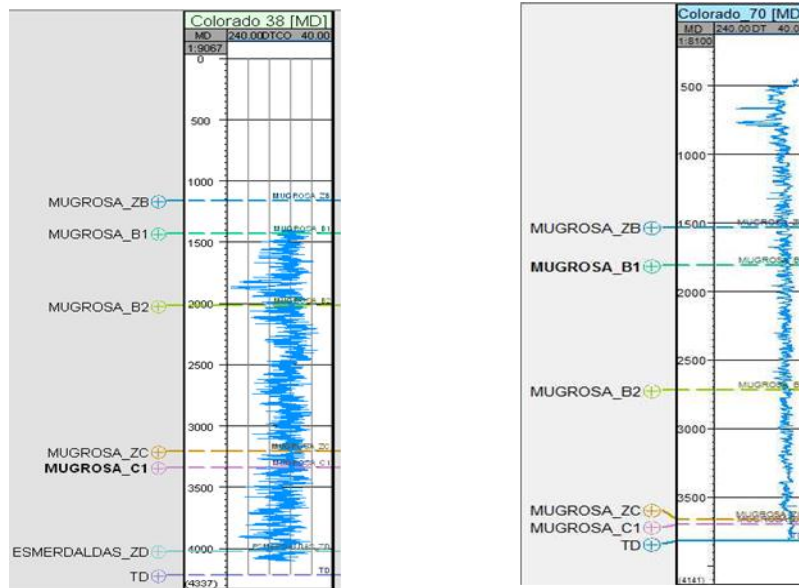
Fuente: Los autores

A continuación se presenta un montaje de registros sónicos por Bloques que fue útil para definir los pozos para el modelamiento unidimensional.

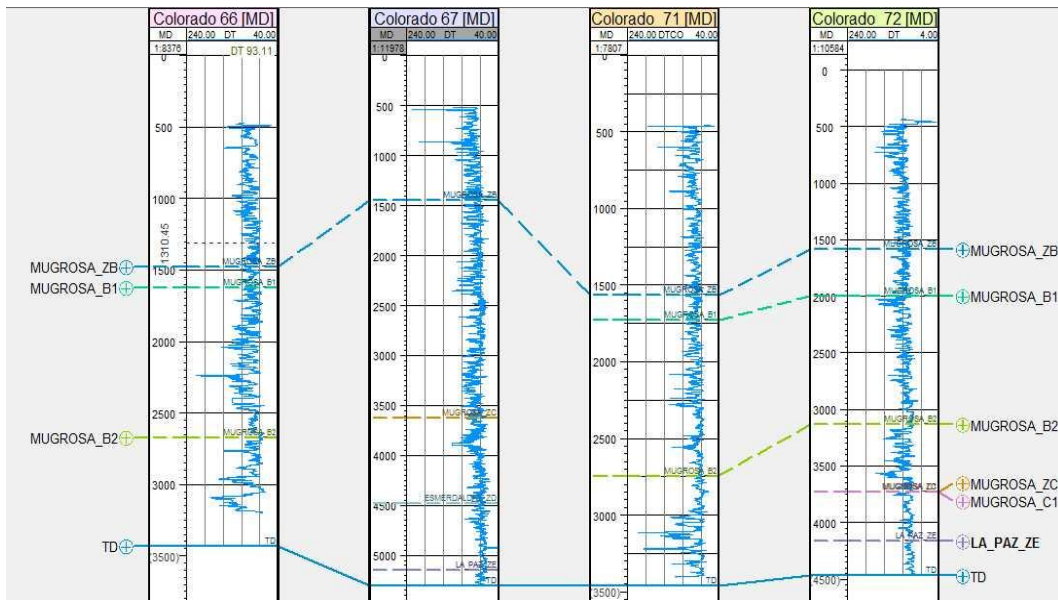
Figura 29. Registro sónico compresional de los pozos por bloque.

Bloque 1: Colorado 38

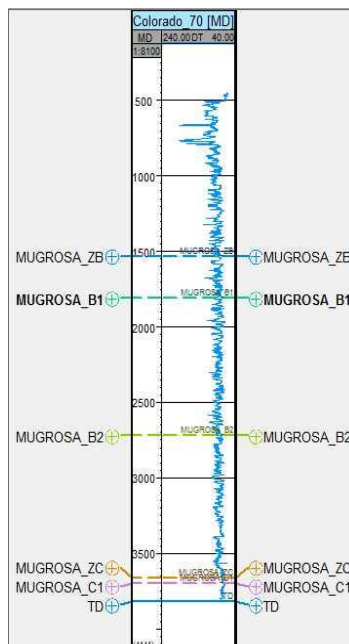
Bloque 2: Colorado 70



Bloque 4: Colorado 66, 67, 71 y 72.



Bloque 5: Colorado 75

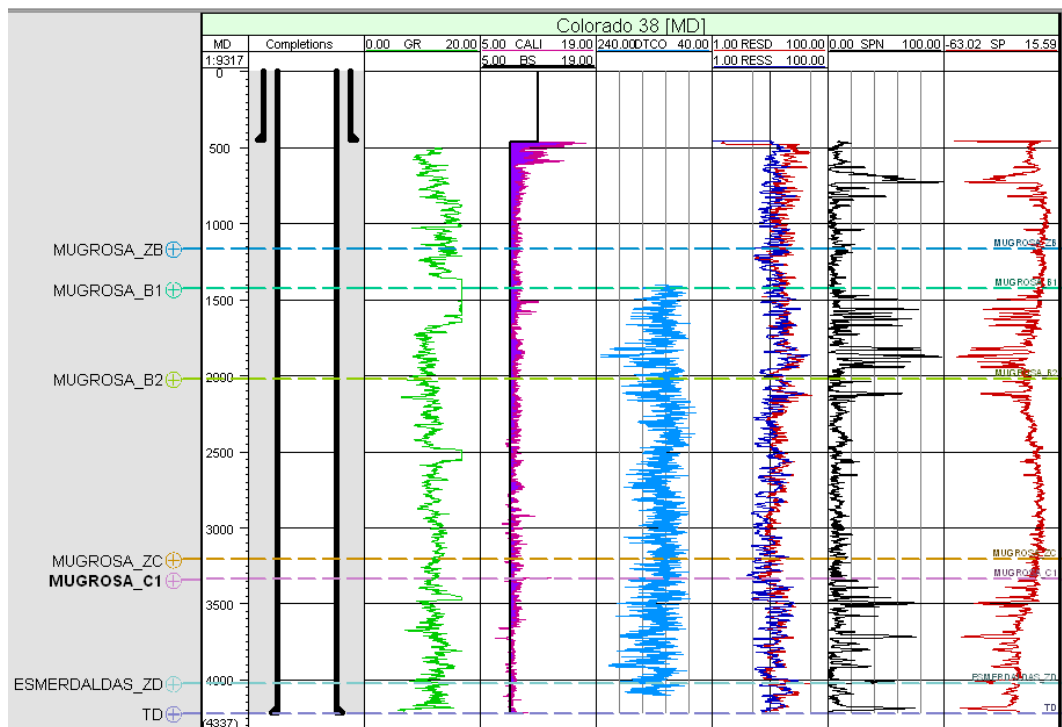


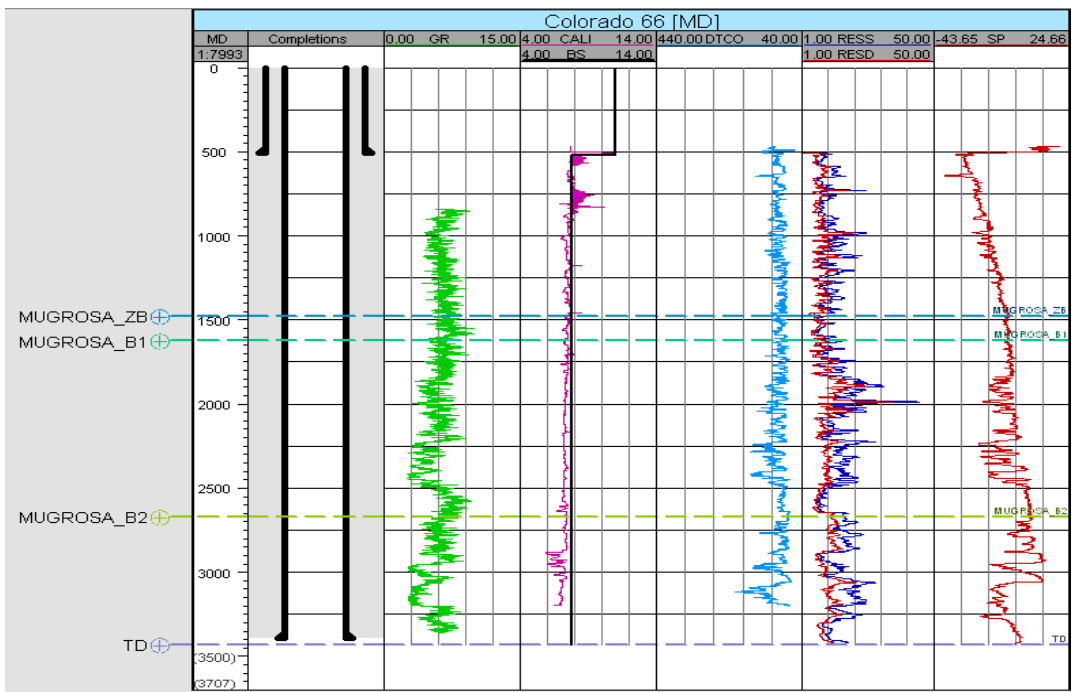
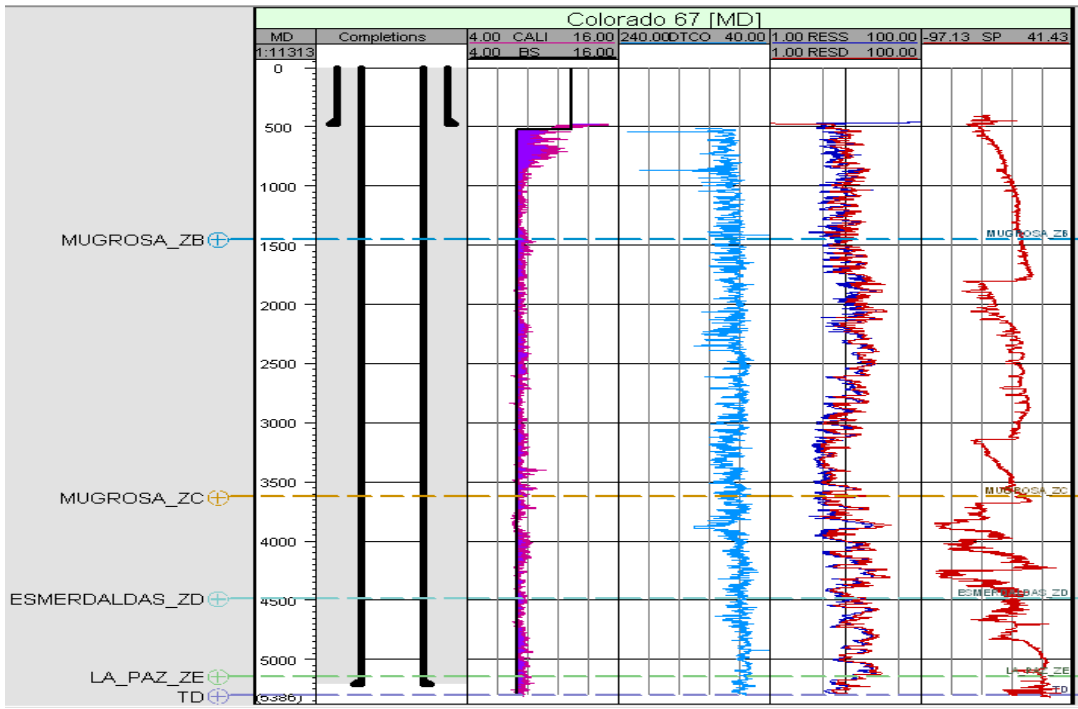
Fuente: Los autores

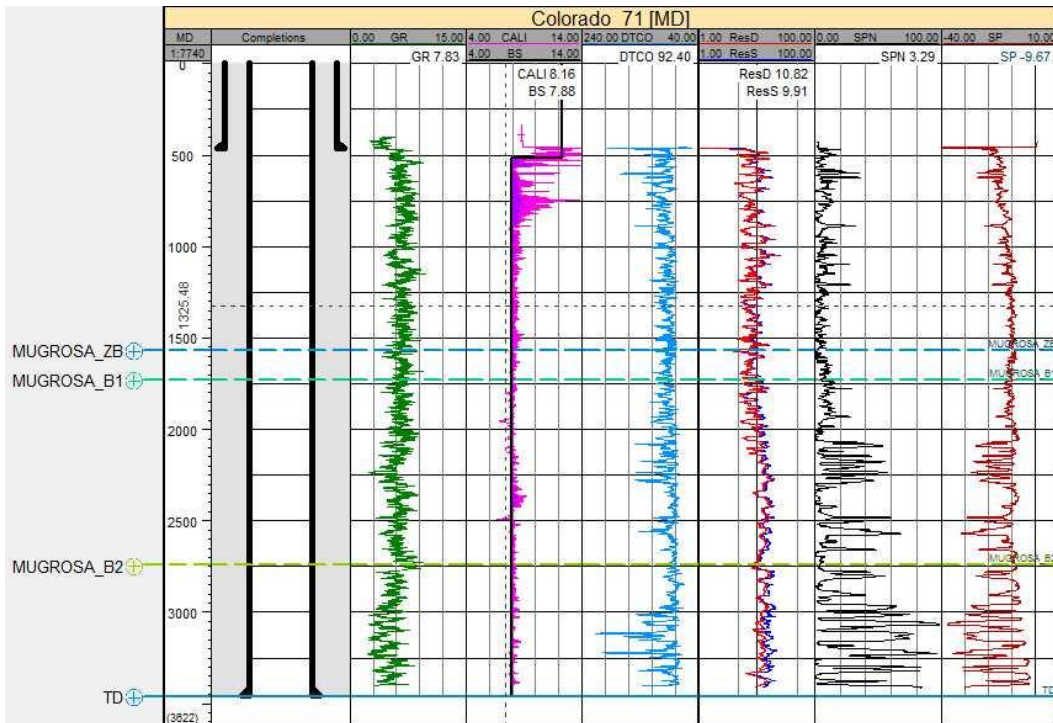
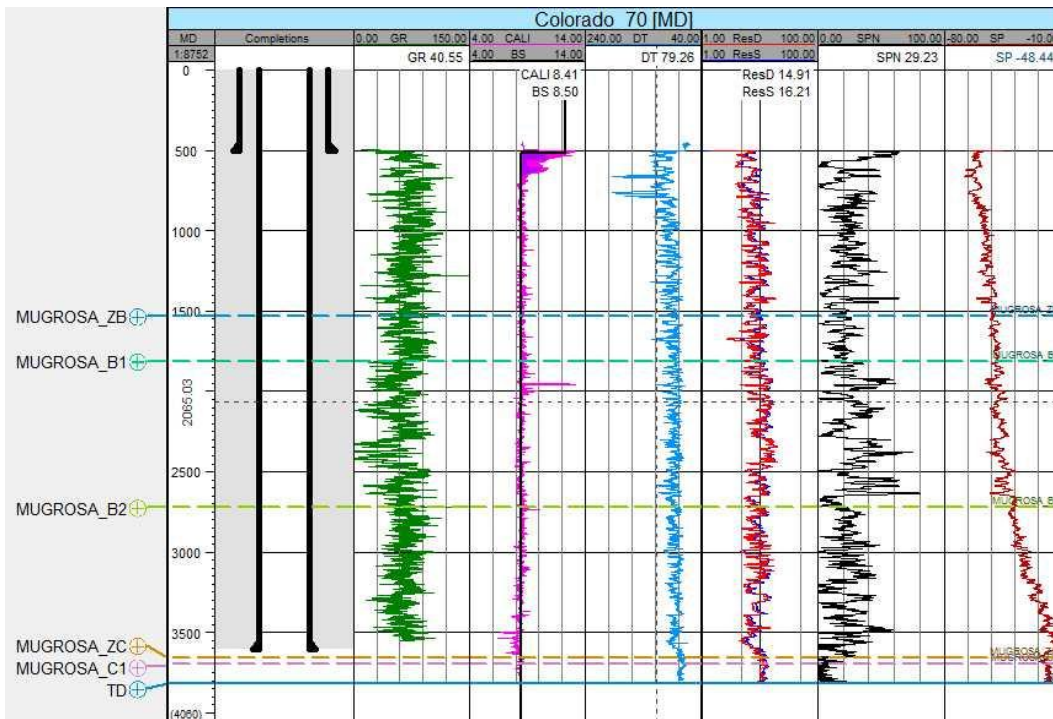
Teniendo seleccionado los pozos candidatos para la construcción del MEM se realiza un montaje de los registros para cada uno de ellos haciendo uso de software Petrel. En este montaje se presenta 8 tracks en el siguiente orden de

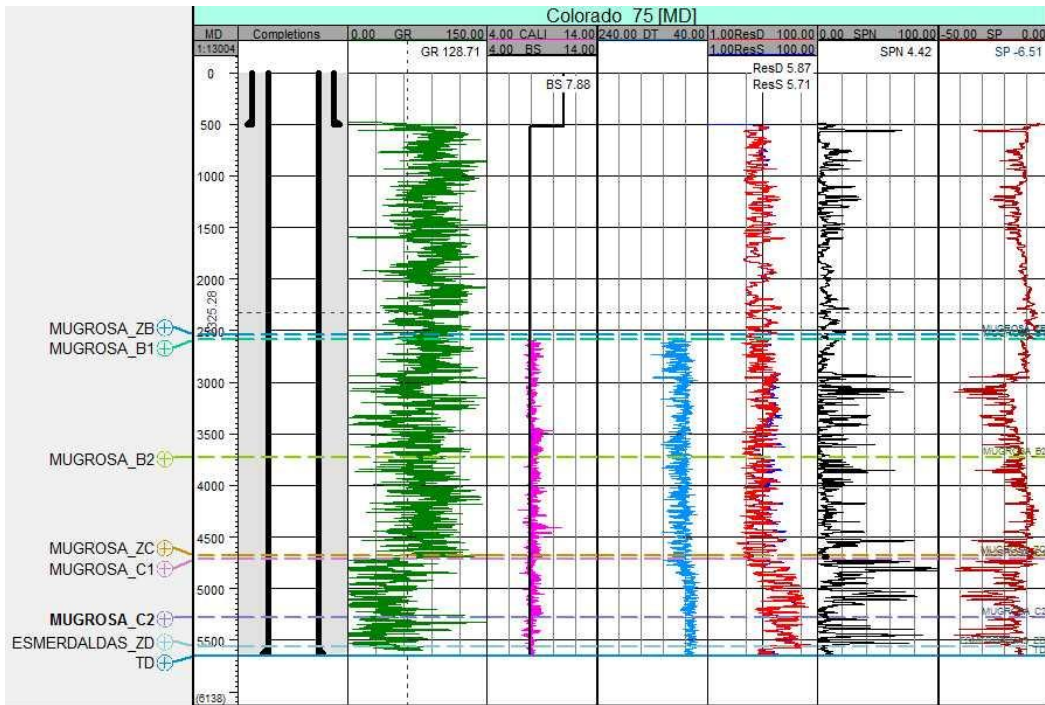
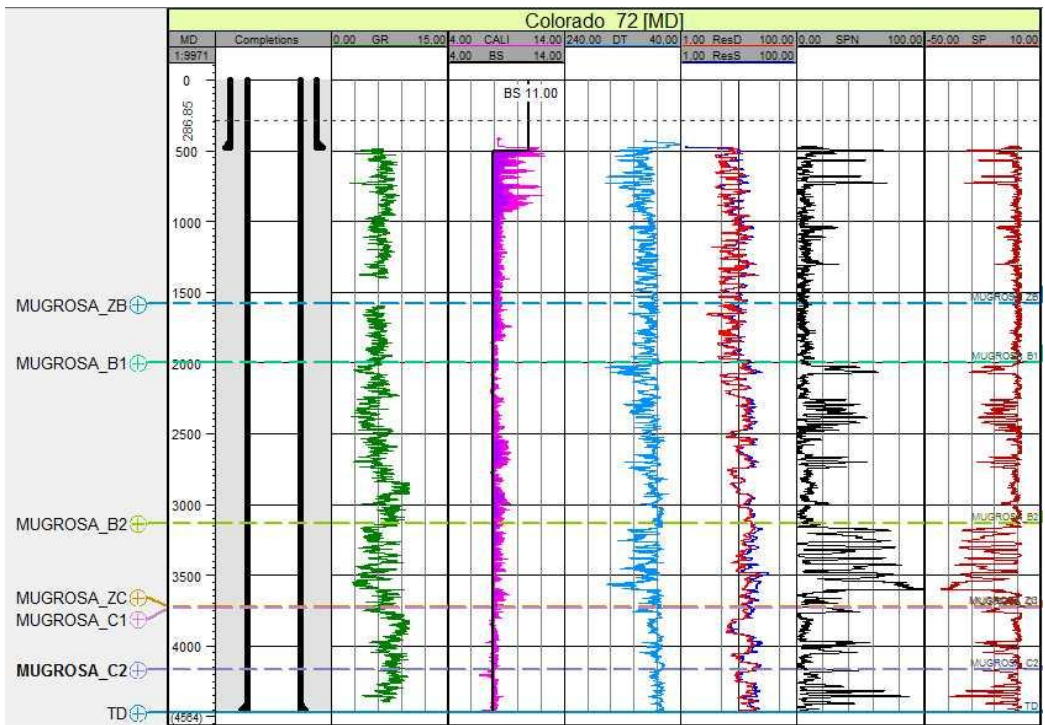
izquierda a derecha: MD, Completamiento, GR, Caliper y Bit size, sónico compresional (DTCO), resistividad, SPN, SP. Cada pozo cuenta con sus respectivos topes de formación. Este montaje nos permite tener una idea de la calidad de los registros y conocer el intervalo de profundidad en que fueron corridos cada uno de ellos.

Figura 30. Log Montage pozos off set Campo Colorado









Fuente: Los autores

De los 7 pozos seleccionados solo dos pozos que son el Colorado 70 y 75 cuentan con una lectura de GR correcta, los pozos Colorado 66, 71 y 72 presentan valores muy bajos en la lectura, posiblemente la herramienta del registro fue corrida con el pozo revestido, en los pozos Colorado 38 y 67 no se corrió este registro. También se observa que en todos los pozos los registros fueron corridos en la segunda sección.

2.2.2 Reportes de perforación y geología

Campo escuela Colorado (Ecopetrol) suministró la información de perforación existente en el campo Colorado. Se contó con los reportes diarios de perforación (DDR) y reporte final de geología, se hizo una revisión detallada donde se obtuvo los principales eventos durante la perforación, los NPT, el estado mecánico de los pozos, el survey, el perfil de la densidad del lodo usado y los topes de formación. Las siguientes imágenes representan la metodología usada para adquirir la información de los reportes de perforación y geología, necesaria para el desarrollo del modelo geomecánico.

Figura 31. Ejemplo tipo resumen diario de perforación

WELL TIME SUMMARY						
Col70	Date	(ft) MD	(in) Section	(ppg) MW	Colorado70 Summary	fday Daily
0		0				
1	30/10/1961	520	12 1/4	9.8	Perforo desde Superficie hasta 520'.	520
2	31/10/1961	520	8 1/2	9.8	Corrida de Casing de 9 5/8", zapato @503'. Tighthole @503' .	0
3	01/11/1961	838	8 1/2	9.9	Perforo desde 520' hasta 838'	318
4	02/11/1961	1,157	8 1/2	10.0	Perforo desde 838' hasta 1157'	319
5	03/11/1961	1,488	8 1/2	9.9	Perforo desde 1157' hasta 1488'	331
6	04/11/1961	1,730	8 1/2	9.9	Perforo desde 1488' hasta 1730'. breakout @ 1487', Washout 1557' .	242
7	05/11/1961	1,943	8 1/2	10.7	Perforo desde 1730' hasta 1943'. Washout @1183, 1845' .	213
8	06/11/1961	1,991	8 1/2	10.8	Perforo desde 1943' hasta 1991'. Tighthole @1687'-1991' .	48
9	07/11/1961	2,007	8 1/2	10.8	Corazono dese 1999'-1999'. Se recuperaron 7'. Corazono desde 1999'-2007' se recupero 8'.	16
10	08/11/1961	2,104	8 1/2	10.8	Perforo desde 2012' hasta 2104'. Corazono desde 2007'-2012'. Recupero 1'.	97
11	09/11/1961	2,267	8 1/2	11.0	Perforo desde 2104' hasta 2267'. Tighthole @1827' .	163
12	10/11/1961	2,436	8 1/2	11.2	Perforo desde 2267' hasta 2436'. Breakout @1863' .	169
13	11/11/1961	2,566	8 1/2	11.2	Perforo desde 2436' hasta 2566'. Breakout @ 2346' .	130
14	12/11/1961	2,769	8 1/2	11.4	Perforo desde 2566' hasta 2769'. Tighthole @ 2185'- 2706' .	203
15	13/11/1961	2,929	8 1/2	11.4	Perforo desde 2769' hasta 2929'. Breakout @1831' .	160
16	14/11/1961	3,062	8 1/2	11.8	Perforo desde 2929' hasta 3062'. Breakout @2466' .	133
17	15/11/1961	3,131	8 1/2	11.9	Perforo desde 3062' hasta 3131'.	69
18	16/11/1961	3,196	8 1/2	11.6	Perforo desde 3131' hasta 3196'.	65
19	17/11/1961	3,318	8 1/2	11.8	Perforo desde 3196' hasta 3318'.	122
20	18/11/1961	3,410	8 1/2	11.8	Perforo desde 3318' hasta 3410'. Tighthole @2956' .	92
21	19/11/1961	3,535	8 1/2	11.8	Perforo desde 3410' hasta 3535'	125
22	20/11/1961	3,650	8 1/2	11.8	Perforo desde 3535' hasta 3650'. Stuck pipe @3100' .	115
23	21/11/1961	3,716	8 1/2	11.8	Perforo desde 3650' hasta 3716'.	66
24	22/11/1961	3,811	8 1/2	11.8	Perforo desde 3716' hasta 3811'. Run Logs (Induccion, Sonico)	95
25	23/11/1961	3,811	8 1/2	11.8	Correo Casing de 5 1/2", zapato@3603'. Cemento.	0
26	24/11/1961	3,811	8 1/2	11.8	Run Logs (Temperatura, Gamma Ray)	0

Fuente: Los autores

Figura 32. Ejemplo tipo resumen de NPT

Colorado 70						
	(ft)	NPT (Horas)				
Date	MD	STABILITY	LOSS	NGR	OPERATIONAL	INFLUX
31/10/1961	520				3.5	
06/11/1961	1991			4	3	
09/11/1961	2267			1.5		
14/11/1961	3062	3				
15/11/1961	3131	1		4.5		
	TOTAL	4		10	6.5	

Fuente: Los autores

Figura 33. Topes de formación

TOPS/MARKERS		
Tops for Graphics		
Color	Formation/Top/Marker	MD
	MUGROSA_ZB	1531
	MUGROSA_B1	1811
	MUGROSA_B2	2721.02
	MUGROSA_ZC	3660.4
	MUGROSA_C1	3698.02

Fuente: Los autores

Figura 34. Sección y estado mecánico del pozo

MECHANICAL STATUS			
(ft)	(in)	(ft)	(in)
MD	BS	MD	CS
0	12.25	0	9 5/8
520	12.25	503	9 5/8
520.0001	8.5	503.0001	5 1/2
3811	8.5	3603	5 1/2

Fuente: Los autores

Figura 35. Survey del pozo

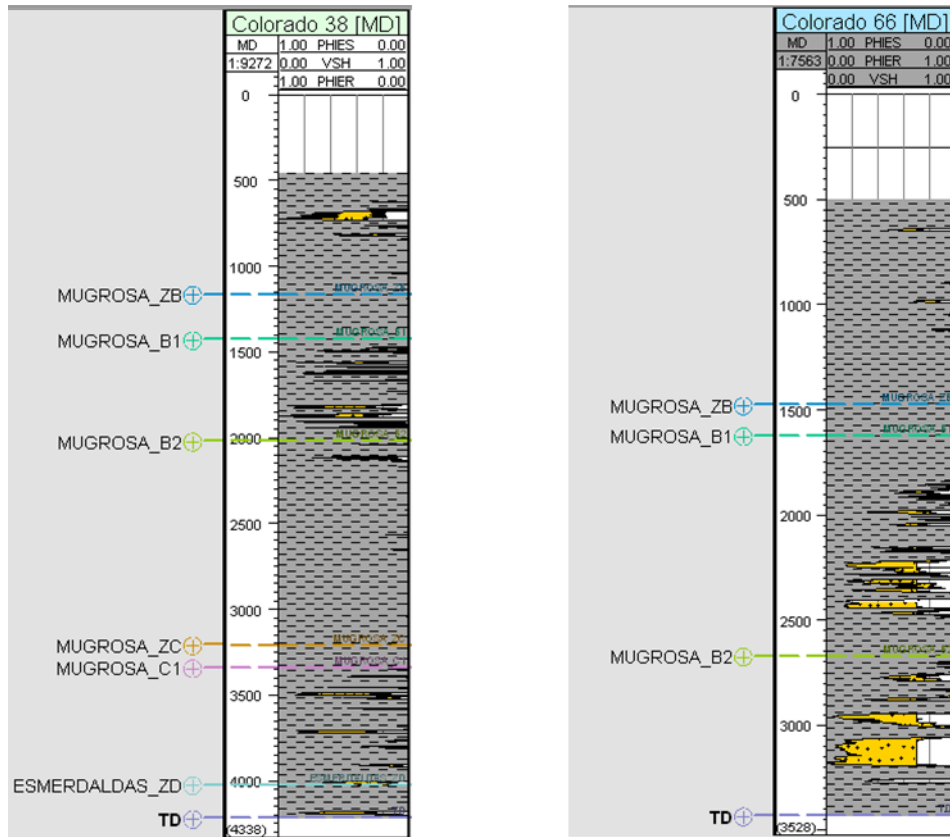
SURVEY			
(ft)	deg	deg	(ft)
MD	INC	AZ	TVD
0.00	0.00	—	0.00
520.00	0.5	—	520.00
1500.00	1.00	—	1500.00
3000.00	1.50	—	3000.00
3811.00	2.00	—	3811.00

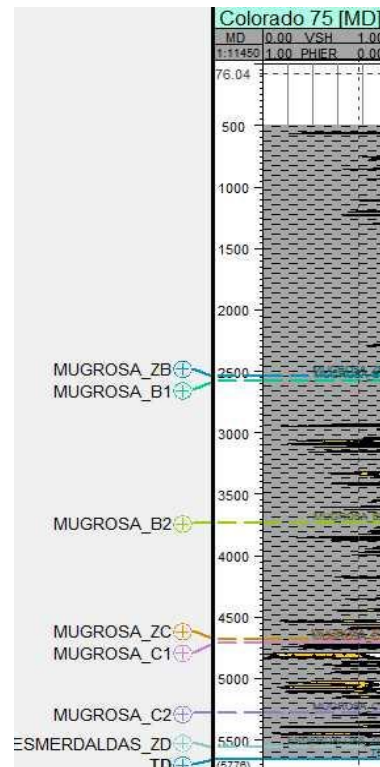
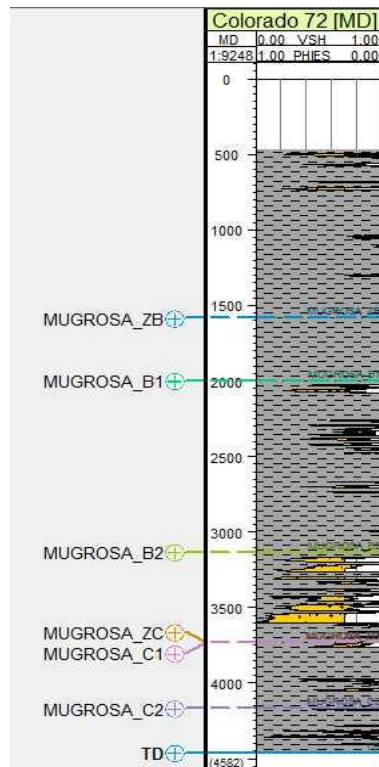
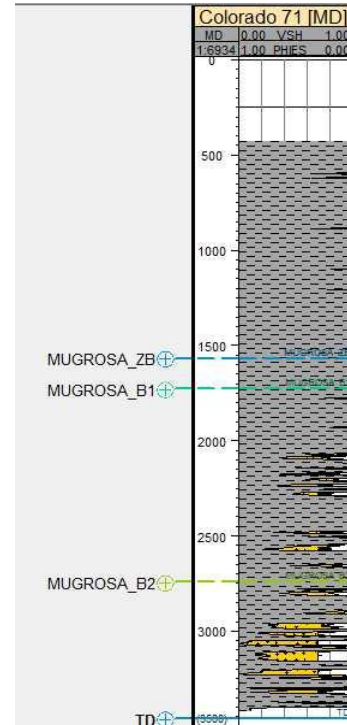
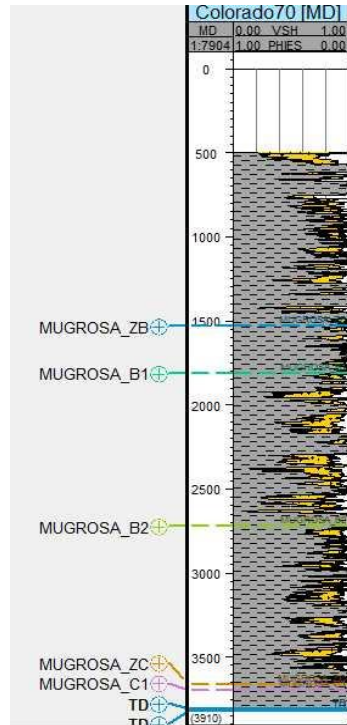
Fuente: Los autores

El resumen sobre la revisión de la información de perforación para cada uno de los pozos se presenta detalladamente en el Capítulo 3.

2.2.3 Petrofísica Una de las principales variables que influye en la elaboración de un apropiado modelo geomecánico es la petrofísica que, para propósitos geomecánicos consta de VSH, PHIE y PHIT. La definición de una adecuada petrofísica permite una óptima asignación de las propiedades mecánicas de los materiales, mediante la estratigrafía mecánica. Ésta permite identificar la matriz de la roca y en función de ello, su comportamiento. En el campo Colorado se propuso revisar la petrofísica, para los pozos seleccionados para este estudio. En la figura 36 se presenta la petrofísica para estos pozos la cual fue cargada en el software Petrel de Schlumberger.

Figura 36. Petrofísica entregada por Campo colorado, Pozos offset





Fuente: Los autores

La revisión de la petrofísica mostró que el pozo 67 no dispone de registros de VSH, PHIT ni PHIE adicionalmente la petrofísica existente para el resto de pozos no puede ser utilizada en el modelo ya que presenta valores inconsistentes en la Porosidad efectiva, no dispone del registro de PHIT en los pozos y muestra paquetes muy grandes de arcilla lo cual no es consistente con la columna estratigráfica de la cuenca del valle medio del magdalena. Es necesario el cálculo de una nueva petrofísica que represente correctamente la litología de los pozos, la metodología para tal propósito será desarrollada en el capítulo 4.

2.2.4 Propiedades mecánicas Una vez revisada la información se encontró que no se dispone de ensayos de mecánica de rocas; sin embargo, dada la existencia de núcleos en el pozo colorado 70 donde se corazonó desde 1991' hasta 2012', con una recuperación del 76% es recomendable realizar el diseño de un plan de ensayos que incluya las pruebas de UCS, Compresión Triaxial y la prueba compresión Brasileña, que permitiera calibrar y ajustar el modelo.

Que tan representativo puede llegar a ser un modelo depende en gran parte de la calidad y cantidad de información con la que se cuenta, es por esta razón que después de realizada la auditoria de datos se tiene una idea preliminar de la incertidumbre y las limitaciones que posiblemente presente el modelo.

Una vez realizada la auditoria de datos para el campo y los pozos seleccionados como posibles candidatos para la construcción del modelo se realiza una tabla con toda la información que es necesaria y la que está disponible para cada uno de los pozos, facilitando seleccionar los pozos off set.

2.3 Auditoria de Datos

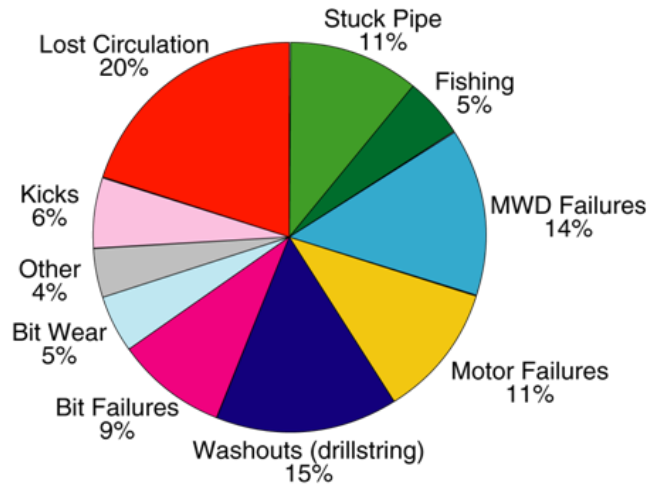
TOPICOS	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 4				Bloque 5
	Colorado 38	Colorado 70	Colorado 66	Colorado 67	Colorado 71	Colorado 72	Colorado 75
GEOLOGIA							
Mapas del Area, Campo, localizacion y fallas regionales de los pozos offset	si	si	si	si	si	si	si
Topes de Formacion.	si	si	si	si	si	si	si
DATOS DE EVALUACION DE FORMACION							
Gama ray	GR	NO	si	si	NO	si	si
Caliper	CAL	si	si	si	si	si	si
Sonicos	DTCO	si	si	si	si	si	si
	DTSM	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Densidad	RHOB	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Resistividad	DLOB	si	si	si	si	si	si
	DSLB	si	si	si	si	si	si
Volumen de Arcilla	VSH	si	si	si	NO	si	si
Porosidad	PHIE	si	si	si	si	si	si
<i>XLOT, LOT, FIT, Mini Frac, etc</i>							
<i>Pruebas de presion de formacion, RFT, MDT, XPT etc.</i>							
<i>Imágenes de Pozo- UBI, OBM and FM/FMS</i>							
<i>Pruebas de Propiedades de la Roca</i>							
DATOS RELACIONADOS CON LA PERFORACION							
<i>Survey</i>							
<i>Topes</i>							
<i>Reporte Diarios de Perforacion</i>							
<i>Estado Mecanico</i>							
<i>Perforating Data</i>							
<i>Master log</i>							
<i>Reporte de Lodo</i>							
<i>Bit record</i>							
CODIGO DE COLORES							
INFORMACION REQUERIDA							
INFORMACION UTIL							
INFORMACION ADICIONAL							

Fuente: Los autores

3. ANÁLISIS DE EVENTOS DE PERFORACIÓN

Como concepto principal, debe aclararse que un evento es una situación indeseable e inesperada que ocurre durante el proceso de perforación, ocasionando tiempos no productivos (NPT) y costos adicionales a los del programa de perforación, que estadísticamente representan un billón de dólares adicionales para la industria a nivel mundial. El 57% de los NPT están relacionados con problemas geomecánicos entre los que se destacan las pérdidas de circulación y los washouts. En la figura 37 se presenta el porcentaje de ocurrencia que tienen los eventos durante la perforación.

Figura 37. Eventos durante la perforación



Fuente: Sedco Forex statistics

La identificación de eventos es de gran importancia para un MEM porque son usados como puntos de calibración para el modelo, y permiten su validación y por

supuesto es usado para entender la causa de los problemas durante el análisis de riesgos.

Para identificar los NPT es necesario correlacionar los eventos reportados, la profundidad, la formación y el peso del lodo con el fin de determinar las posibles causas de estos problemas operacionales. Para este estudio se clasifica los eventos de la siguiente manera.

Tabla 6. Clasificación de los eventos durante la perforación

Eventos
Presión de poro (PP): Influjos, Corte de lodo, Gas trip, Gas show.
Breakout (BO1): Reaming, Backreaming, Washout, Tight hole, Alto torque.
Breakout (BO2): Geometrical stuck pipe, Stuck pipe debido a estabilidad o pack off, Cavings
Gradiente de fractura (BD, Sh): Perdidas de lodo parcial o total, LOT/FIT.
Differential stuck pipe (DSP)
No relacionados con geomecánica (NGR)
Operacional: Logging, Coring, Casing, Cementing.

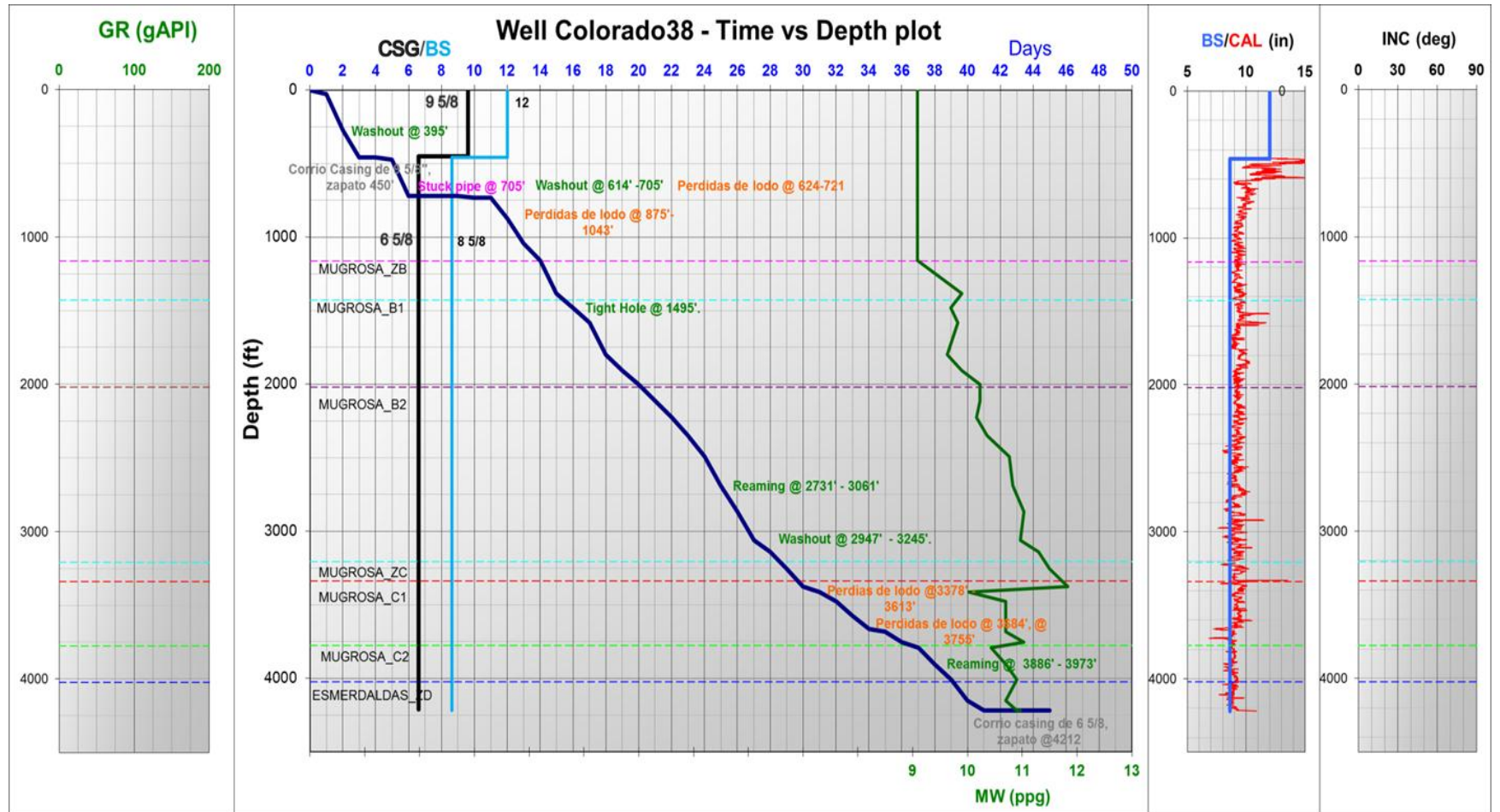
Fuente: Schlumberger

Para la identificación de los eventos y sus NPT es necesaria la revisión de los reportes diarios de perforación y el reporte final de geología. La metodología usada para tal fin consiste en extraer de cada reporte la fecha, la profundidad perforada, el tamaño de broca, el peso del lodo, el evento y el NPT, lo cual representa un resumen de los sucesos diarios de perforación. Adicionalmente se crea una representación gráfica del progreso de la perforación mediante una curva de profundidad vs tiempo (que da una idea de las dificultades durante la perforación), junto con la curva de la densidad de lodo, la sección perforada y el estado mecánico. Esta gráfica se acompaña al lado izquierdo del GR con el fin de

relacionar la litología con los eventos, al lado derecho el Caliper junto con la sección para identificar los breakouts, y finalmente la inclinación del pozo, que permite verificar la geometría del pozo cuando ocurre el evento.

Pozo Colorado 38

Figura 38. Curva de avance de la perforación pozo 38



Fuente: Los autores

Tabla 7. Resumen de eventos de perforación colorado 38

WELL TIME SUMMARY							
Col38	Date	(ft)	(in)	(ppg)	Colorado38 Summary	ftday Daily	
		MD	Section	MW			
0		0				0	
1	10/05/1954	29	12	9.1	Perforo desde Superficie hasta 29'	29	
2	11/05/1954	274	12	9.1	Perforo desde 29' hasta 274'	245	
3	12/05/1954	460	12	9.1	Perforo desde 274' hasta 460', Corrio Casing de 9 5/8", zapato @450', No hubo Retornos.	186	
4	13/05/1954	460	12	9.1	Test de tapon,	0	
5	14/05/1954	475	8 5/8	9.1	Perforo desde 460' hasta 475',	15	
6	15/05/1954	721	8 5/8	9.1	Perforo desde 475' hasta 721'. Perdidas de lodo @624', 80 Bbls, Perdidas de lodo totales @ 721', 100 Bbls.	246	
7	16/05/1954	721	8 5/8	9.1	No se restablecio la Circulacion del Lodo	0	
8	17/05/1954	721	8 5/8	9.1	Se restablecio la Circulacion y se Bombeo para sellar la formacion, Volvieron a perder Circulacion.	0	
9	18/05/1954	721	8 5/8	9.1	Bombearon 100 sacos de Cemento, (Para Sellar Formacion)	0	
10	19/05/1954	732	8 5/8	9.1	Perforo desde 721' hasta 732'. Sin Circulacion, Se Cemento, tope cemento 563'	11	
11	20/05/1954	732	8 5/8	9.1	Perforo tapon de cemento desde 563' hasta 705' con agua. Stuck pipe @ 705'.	0	
12	21/05/1954	875	8 5/8	9.1	Washout desde 614' hasta 705'. Perforo cerneto desde 563' hasta 732'. Perforo desde 732' hasta 875'. Perdidas de lodo de 40 Bbl.	143	
13	22/05/1954	1,043	8 5/8	9.1	Perforo desde 875' hasta 1043'. Perdidas de lodo.	168	
14	23/05/1954	1,160	8 5/8	9.1	Perforo desde 1043' hasta 1160'	117	
15	24/05/1954	1,382	8 5/8	9.9	Perforo desde 1160' hasta 1382'	222	
16	25/05/1954	1,483	8 5/8	9.7	Perforo desde 1382' hasta 1483	101	
17	26/05/1954	1,581	8 5/8	9.8	Perforo desde 1483' hasta 1581'	98	
18	27/05/1954	1,799	8 5/8	9.6	Perforo desde 1581' hasta 1799'	218	
19	28/05/1954	1,907	8 5/8	9.9	Perforo desde 1799' hasta 1907'. Tight Hole @ 1495'. Washout desde 395'	108	
20	29/05/1954	2,002	8 5/8	10.2	Perforo desde 1907' hasta 2002'	95	
21	30/05/1954	2,115	8 5/8	10.2	Perforo desde 2002' hasta 2115'	113	
22	31/05/1954	2,228	8 5/8	10.2	Perforo desde 2115' hasta 2228'	113	
23	01/06/1954	2,351	8 5/8	10.4	Perforo desde 2228' hasta 2351'	123	
24	02/06/1954	2,493	8 5/8	10.8	Perforo desde 2351' hasta 2493'	142	
25	03/06/1954	2,692	8 5/8	10.8	Perforo desde 2493' hasta 2692'	199	
26	04/06/1954	2,866	8 5/8	11.0	Perforo desde 2692' hasta 2866'	174	
27	05/06/1954	3,061	8 5/8	11.0	Perforo desde 2866' hasta 3061'	195	
28	06/06/1954	3,142	8 5/8	11.3	Perforo desde 3061' hasta 3142'. Reaming desde 2731' hasta 3061'	81	
29	07/06/1954	3,255	8 5/8	11.5	Perforo desde 3142' hasta 3255'	113	
30	08/06/1954	3,378	8 5/8	11.8	Perforo desde 3255' hasta 3378'. Washout desde 2947' hasta 3245'.	123	
31	09/06/1954	3,412	8 5/8	10.0	Perforo desde 3378' hasta 3412'. Perdidas totales de lodo.	34	
32	10/06/1954	3,477	8 5/8	10.7	Perforo desde 3412' hasta 3477'. Perdias de lodo 30 BBl.	65	
33	11/06/1954	3,574	8 5/8	10.7	Perfor desde 3477' hasta 3574'. Perdidas de lodo 90 BBl.	97	
34	12/06/1954	3,664	8 5/8	10.7	Perforo desde 3574' hasta 3664'. Perdidas de lodo @3613', 85 BBl.	90	
35	13/06/1954	3,684	8 5/8	10.7	Perforo desde 3664' hasta 3684'	20	
36	14/06/1954	3,755	8 5/8	11.0	Perforo desde 3684' hasta 3755'. Perdidas de lodo @ 3684', 20 Bbl,	71	
37	15/06/1954	3,791	8 5/8	10.4	Perforo desde 3755' hasta 3791'. Perdidas de lodo 240 Bbl. Corrida de registros	36	
38	16/06/1954	3,903	8 5/8	10.7	Perfor desde 3791' hasta 3903'	112	
39	17/06/1954	4,011	8 5/8	10.9	Perforo desde 3903' hasta 4011'. Reaming desde 3886' hasta 3973'	108	
40	18/06/1954	4,152	8 5/8	10.7	Perforo desde 4011' hasta 4152'	141	
41	19/06/1954	4,220	8 5/8	10.9	Perforo desde 4152' hasta 4220'	68	
42	20/06/1954	4,220	8 5/8	11.0	Corrida de registros electricos (Micro log, caliper, dipmeter)	0	
43	21/06/1954	4,220	8 5/8	11.0	Se corrio casing de 6 5/8, zapato @4212	0	
44	22/06/1954	4,220	8 5/8	11.0	Corrida de registro (temperatura),	0	
45	23/06/1954	4,220	8 5/8	11.0	Se circulo y se perforo cemento	0	

Fuente: Los autores

Tabla 8. NPT de colorado 38

Colorado 38					
Date	(ft)	NPT (Horas)			
	MD	STABILITY	LOSS	NGR	OPERATIONAL
10/05/1954	29			4	
11/05/1954	274			1.5	
14/05/1954	475			1	
15/05/1954	721		8		
16/05/1954	721		24		
17/05/1954	721		24		
18/05/1954	721		12		
19/05/1954	732		4		
20/05/1954	732	1			
24/05/1954	1382			3.5	
25/05/1954	1483			4	
28/05/1954	1907	0.5		1.5	
29/05/1954	2002			2	
30/05/1954	2115			1	
01/06/1954	2351			5	
03/06/1954	2692			4.5	
06/06/1954	3142			2.5	
09/06/1954	3412		12		
10/06/1954	3477		2	2	
11/06/1954	3574		2		
13/06/1954	3684			4	
14/06/1954	3755				6
15/06/1954	3791			5	
16/06/1954	3903			10	
18/06/1954	4152			2.5	
TOTAL		1.5	88	54	6

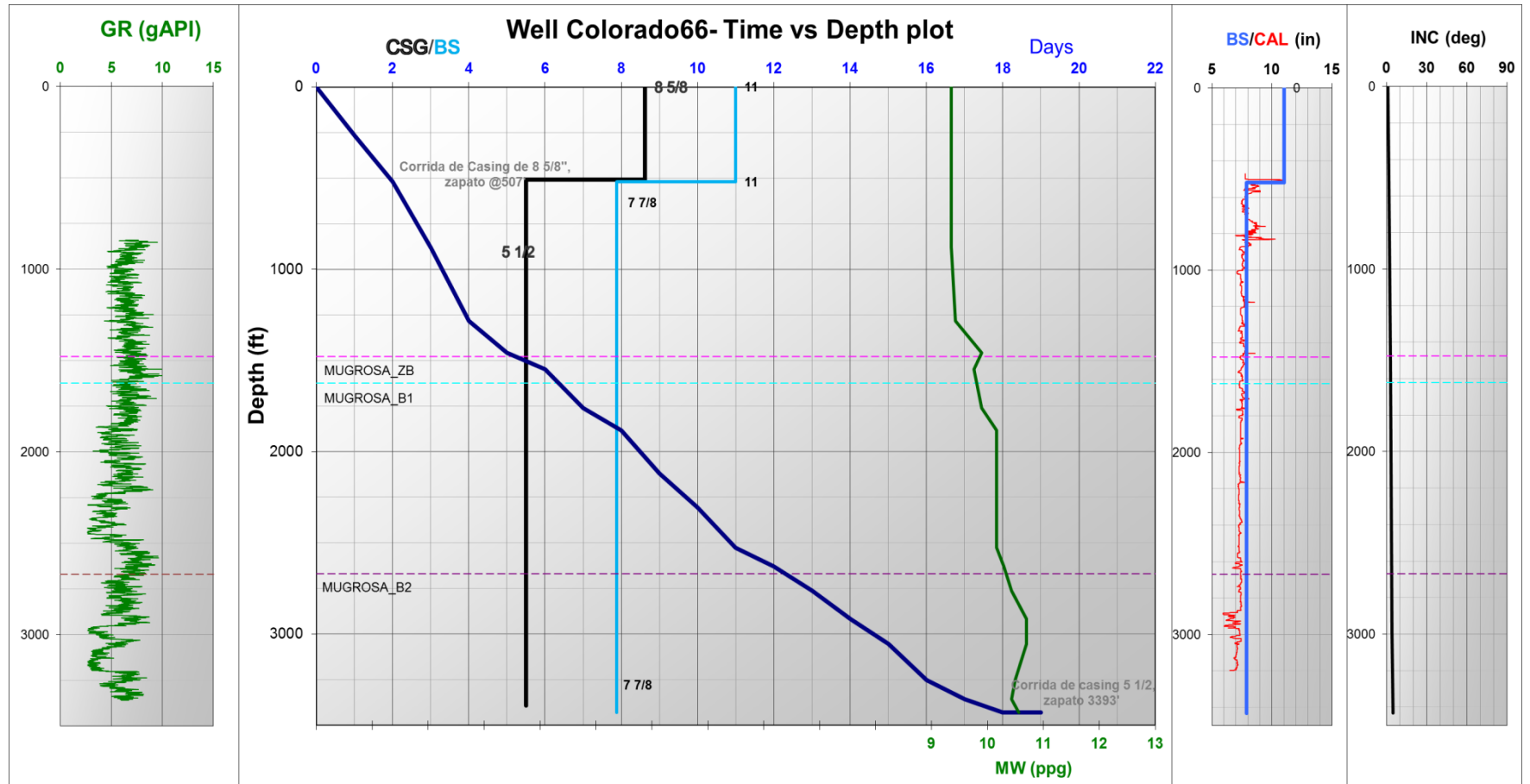
Fuente: Los autores

En el pozo 38 se observa que la mayor cantidad de eventos y NPT están relacionados con las pérdidas de circulación, principalmente en la formación Mugrosa C1 y la formación Colorado, siendo esta última donde ocurre el caso más crítico, presentando pérdidas totales de circulación de aproximadamente 100 Bbl, a una profundidad de 721' y donde fue necesario el bombeo de 100 sacos de cemento para sellar la formación, esto se puede deber a la ubicación del pozo, ya que fue perforado sobre la falla principal del campo. Otro evento importante es una pega a 705', justo después de las pérdidas totales de lodo, las cuales ocasionaron una pobre limpieza del pozo, imposibilitando el avance de la perforación en el día 11. Las pérdidas de lodo que se observan en la formación Mugrosa C1 pueden ser un indicio de la presencia de fracturas en dicha formación, como se observa en la

curva de peso de lodo fue necesario disminuir desde 11.8 hasta 10 ppg la densidad del lodo para controlar las pérdidas de fluido.

Pozo Colorado 66

Figura 39. Curva de avance de la perforación pozo 66



Fuente: Los autores

Tabla 9. Resumen de eventos de perforación colorado 66

WELL TIME SUMMARY							
Col66	Date	(ft) MD	(in) Section	(ppg) MW	Colorado66 Summary	ftday Daily	
		0				0	
1	18/07/1961	267	11	9.4	Perforo desde Superficie hasta 267'.	267	
2	19/07/1961	520	11	9.4	Perforo desde 267' hasta 520'. Corrida de Casing de 8 5/8", zapato @507'. Se circulo, se cemento.	253	
3	20/07/1961	880	7 7/8	9.4	Test de tapon, Perforo desde 520' hasta 880'.	360	
4	21/07/1961	1,283	7 7/8	9.4	Perforo desde 880' hasta 1283'	403	
5	22/07/1961	1,457	7 7/8	9.9	Perforo desde 1283' hasta 1457'.	174	
6	23/07/1961	1,547	7 7/8	9.8	Perforo desde 1457' hasta 1547'	90	
7	24/07/1961	1,761	7 7/8	9.9	Perfor desde 1547' hasta 1761'	214	
8	25/07/1961	1,884	7 7/8	10.2	Perforo desde 1761' hasta 1884'	123	
9	26/07/1961	2,119	7 7/8	10.2	Perforo desde 1884' hasta 2119'	235	
10	27/07/1961	2,306	7 7/8	10.2	Perforo desde 2119' hasta 2306'	187	
11	28/07/1961	2,527	7 7/8	10.2	Perforo desde 2306' hasta 2527'	221	
12	29/07/1961	2,628	7 7/8	10.3	Perforo desde 2527' hasta 2628'	101	
13	30/07/1961	2,763	7 7/8	10.4	Perforo desde 2628' hasta 2763'	135	
14	31/07/1961	2,917	7 7/8	10.7	Perforo desde 2763' hasta 2917'	154	
15	01/08/1961	3,055	7 7/8	10.7	Perforo desde 2917' hasta 3055'	138	
16	02/08/1961	3,251	7 7/8	10.5	Perforo desde 3055' hasta 3251'	196	
17	03/08/1961	3,358	7 7/8	10.4	Perforo desde 3251' hasta 3358'	107	
18	04/08/1961	3,431	7 7/8	10.6	Perforo desde 3358' hasta 3431', circulo, run logs, circulo.	73	
19	05/08/1961	3,431	7 7/8	10.6	Corrida de casing 5 1/2, zapato 3393', run logs temp y gamma ray	0	

Fuente: Los autores

Tabla 10. NPT de Colorado 66

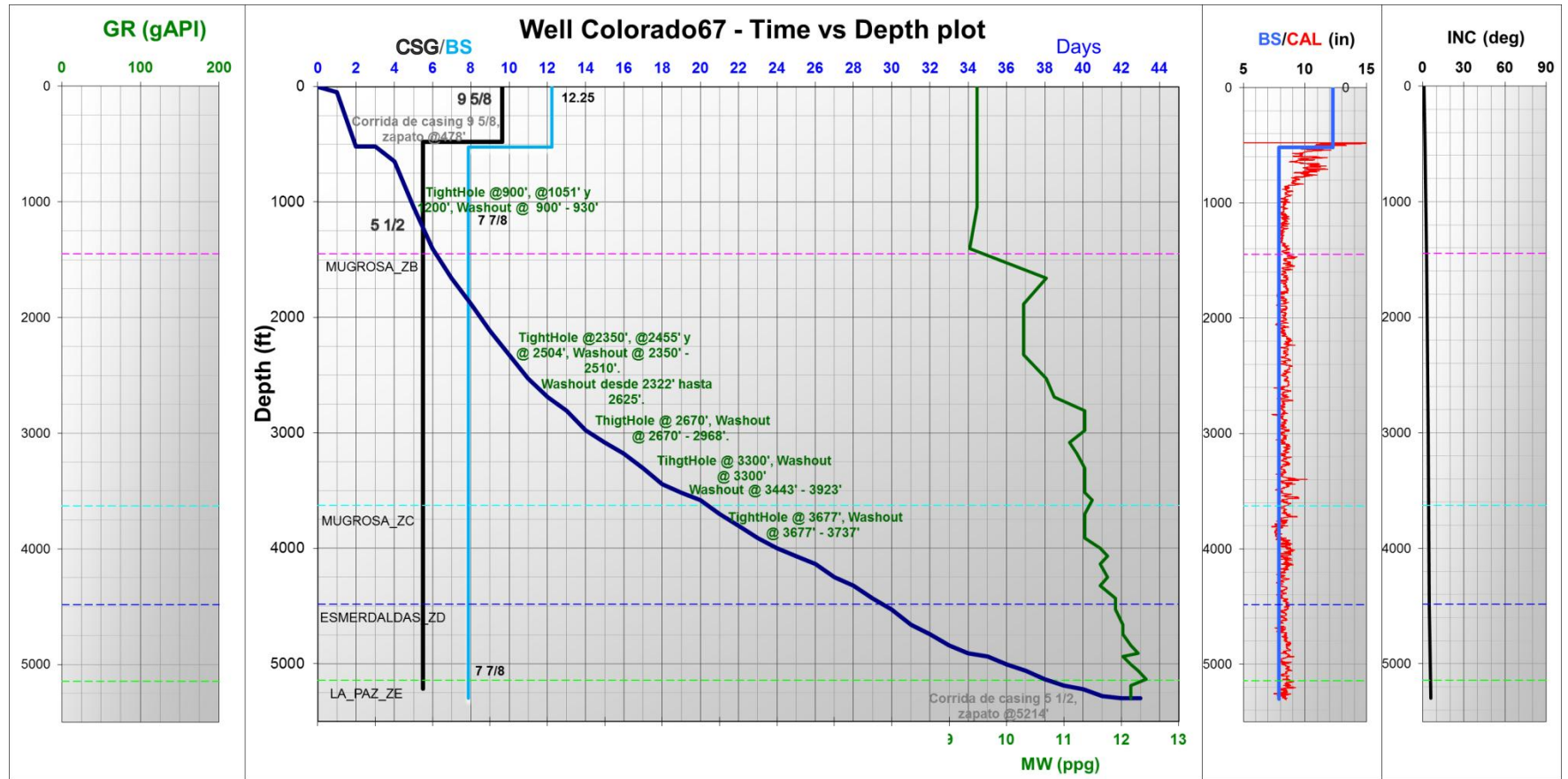
Colorado 66						
Date	(ft)	NPT (Horas)				
	MD	STABILITY	LOSS	NGR	OPERATIONAL	INFLUX
22/07/1961	1457			4.5		
23/07/1961	1547			7		
25/07/1961	1884			8		
29/07/1961	2628			3		
30/07/1961	2763			1.5		
TOTAL		0	0	24	0	0

Fuente: Los autores

En el pozo 66 no hubo eventos relacionados con problemas geomecánicos durante la perforación, incluso los NPT totales solo fueron de 24 horas durante todo el programa de perforación del pozo, lo que evidencia el óptimo rendimiento de la operación, y por lo cual la curva de peso del lodo presenta un comportamiento estable.

Pozo Colorado 67

Figura 40. Curva de avance de la perforación pozo 67



Fuente: Los autores

Tabla 11. Resumen de eventos de perforación colorado 67

WELL TIME SUMMARY							
Col67	Date	(ft) MD	(in) Section	(ppg) MW	Colorado67 Summary	ftday Daily	
0		0				0	
1	30/12/1961	47	12 1/4	9.5	Perforo desde Superficie hasta 47'	47	
2	31/12/1961	520	12 1/4	9.5	Perforo desde 47' hasta 520'. Circulo, inicia corrida de casing 9 5/8	473	
3	01/01/1962	520	7 7/8	9.5	Corrida de casing 9 5/8, zapato @478'. Test de tapon.	0	
4	02/01/1962	647	7 7/8	9.5	Perforo desde 442' (tapon) hasta 647'	127	
5	03/01/1962	1,039	7 7/8	9.5	Perforo desde 647' hasta 1039'. TightHole @900', Washout de 900' hasta 930'	392	
6	04/01/1962	1,401	7 7/8	9.4	Perforo desde 1039' hasta 1401'. TightHole @931', 1051' y 1200'	362	
7	05/01/1962	1,660	7 7/8	10.7	Perforo desde 1401 hasta 1660'	259	
8	06/01/1962	1,883	7 7/8	10.3	Perforo desde 1660' hasta 1883'	223	
9	07/01/1962	2,118	7 7/8	10.3	Perforo desde 1883' hasta 2118'	235	
10	08/01/1962	2,325	7 7/8	10.3	Perforo desde 2118' hasta 2325'	207	
11	09/01/1962	2,530	7 7/8	10.7	Perforo desde 2325' hasta 2530'. TightHole @2350', Washout desde 2350' hasta 2510'.	205	
12	10/01/1962	2,690	7 7/8	10.8	Perforo desde 2430' hasta 2690'. Washout desde 2322' hasta 2625'.	160	
13	11/01/1962	2,810	7 7/8	11.4	Perforo desde 2625' hasta 2810'. TightHole @2455', Washout @ 2455'	120	
14	12/01/1962	2,976	7 7/8	11.4	Perforo desde 2810' hasta 2976'. TightHole @ 2504', Washout @ 2504'	166	
15	13/01/1962	3,085	7 7/8	11.1	Perforo desde 2976' hasta 3085'. TightHole @ 2670', Washout desde 2670' hasta 2968'.	109	
16	14/01/1962	3,180	7 7/8	11.2	Perforo desde 3085' hasta 3180'. Broca tapada @ 3085	95	
17	15/01/1962	3,307	7 7/8	11.4	Perforo desde 3180' hasta 3307'	127	
18	16/01/1962	3,443	7 7/8	11.4	Perforo desde 3307' hasta 3443'	136	
19	17/01/1962	3,519	7 7/8	11.4	Perforo desde 3443' hasta 3519'. Washout de 480'	76	
20	18/01/1962	3,580	7 7/8	11.5	Perforo desde 3519' hasta 3580'.	61	
21	19/01/1962	3,701	7 7/8	11.4	Perforo desde 3580' hasta 3701'. TightHole @ 3300', Washout @ 3300'	121	
22	20/01/1962	3,807	7 7/8	11.4	Perforo desde 3701' hasta 3807'. TightHole @ 3677', Washout desde 3677' hasta 3737'	106	
23	21/01/1962	3,910	7 7/8	11.4	Perforo desde 3807' hasta 3910	103	
24	22/01/1962	3,997	7 7/8	11.6	Perforo desde 3910' hasta 3997'	87	
25	23/01/1962	4,067	7 7/8	11.8	Perforo desde 3997' hasta 4067'	70	
26	24/01/1962	4,135	7 7/8	11.6	Perforo desde 4067' hasta 4135'	68	
27	25/01/1962	4,250	7 7/8	11.8	Perforo desde 4135' hasta 4250'	115	
28	26/01/1962	4,325	7 7/8	11.6	Perforo desde 4250' hasta 4352'	75	
29	27/01/1962	4,433	7 7/8	11.9	Perforo desde 4325' hasta 4433'	108	
30	28/01/1962	4,530	7 7/8	11.9	Perforo desde 4433' hasta 4530'	97	
31	29/01/1962	4,660	7 7/8	12.0	Perforo desde 4350' hasta 4660'	130	
32	30/01/1962	4,745	7 7/8	12.0	Perforo desde 4660' hasta 4745'	85	
33	31/01/1962	4,840	7 7/8	12.2	Perforo desde 4745' hasta 4840'	95	
34	01/02/1962	4,910	7 7/8	12.3	Perforo desde 4840' hasta 4910'	70	
35	02/02/1962	4,939	7 7/8	12.0	Perforo desde 4910' hasta 4939'	29	
36	03/02/1962	5,005	7 7/8	12.2	Perforo desde 4939 hasta 5005	66	
37	04/02/1962	5,062	7 7/8	12.3	Perforo desde 5005' hasta 5062'	57	
38	05/02/1962	5,135	7 7/8	12.4	Perforo desde 5062' hasta 5135'	73	
39	06/02/1962	5,187	7 7/8	12.2	Perforo desde 5135' hasta 5187'	52	
40	07/02/1962	5,219	7 7/8	12.2	Perforo desde 5187' hasta 5219	32	
41	08/02/1962	5,279	7 7/8	12.2	Perforo desde 5219' hasta 5279	60	
42	09/02/1962	5,300	7 7/8	12.2	Perforo desde 5279' hasta 5300'. circulo durante 3,5 h. Corrida de registros.	21	
43	10/02/1962	5,300	7 7/8	12.2	Corrida de casing 5 1/2, zapato @5214', se cemento, Test de tapon.	0	

Fuente: Los autores

Tabla 12. NPT de Colorado 67

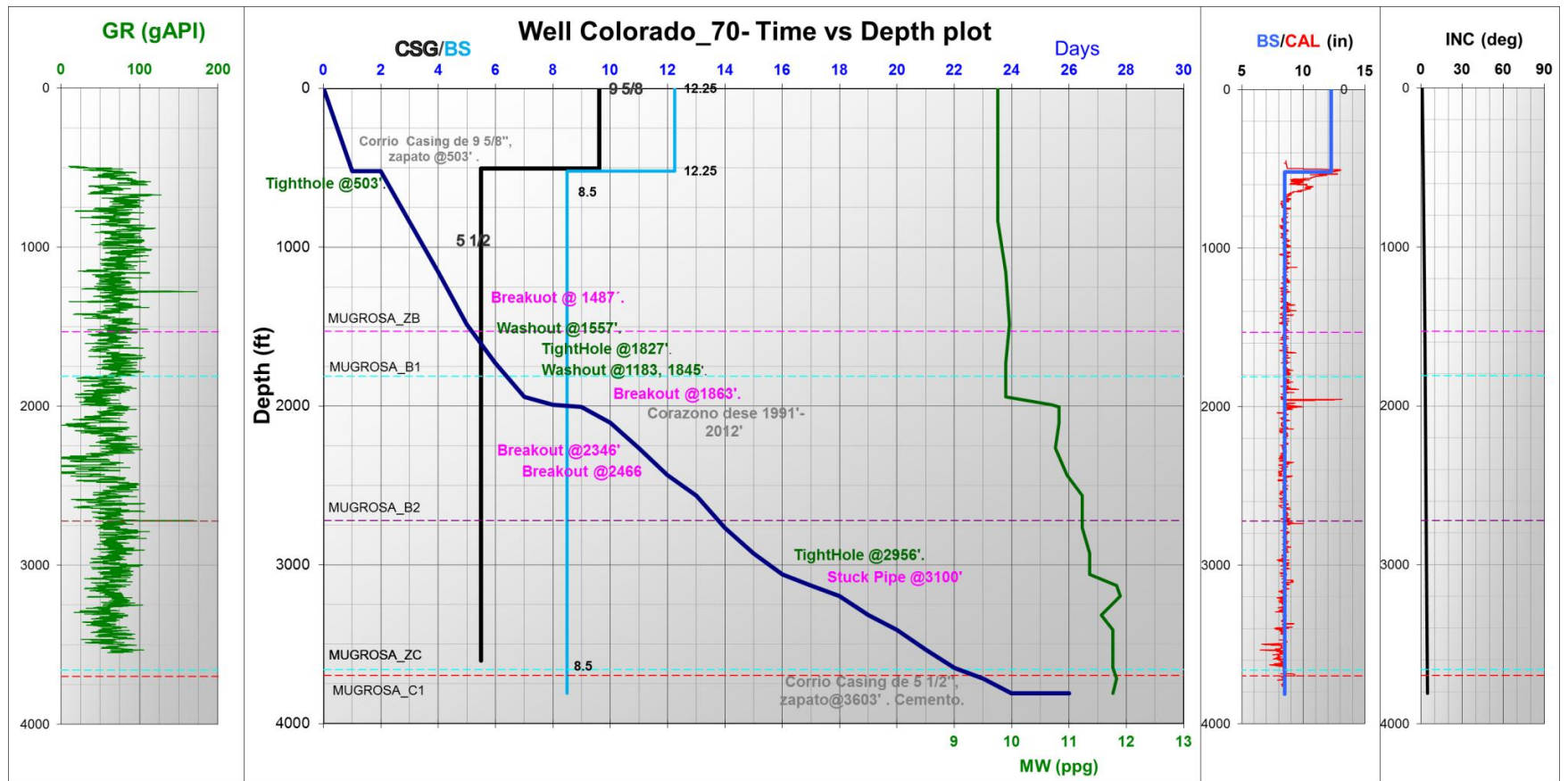
Colorado 67						
	(ft)	NPT (Horas)				
Date	MD	STABILITY	LOSS	NGR	OPERATIONAL	INFLUX
03/01/1962	1039	1.5				
09/01/1962	2530	2				
10/01/1962	2690	1.5				
11/01/1962	2810	1			3.5	
12/01/1962	2976	0.5				
13/01/1962	3085	1				
14/01/1962	3180				3.5	
17/01/1962	3519	2			3	
18/01/1962	3580				6	
19/01/1962	3701	0.5				
22/01/1962	3997			3		
25/01/1962	4250			1		
26/01/1962	4325			1		
27/01/1962	4433			2		
28/01/1962	4530				1.5	
05/02/1962	5135			1.5		
07/02/1962	5219			5		
	TOTAL	10	0	13.5	17.5	0

Fuente: Los autores

En el pozo 67 la mayor parte de los eventos están relacionados con Tight Hole y Washouts, principalmente en la formación Mugrosa Zona B, que posiblemente son generados por la litología que se caracteriza por las intercalaciones de arcillas y arenas, las cuales tienen a derrumbarse y a mantenerse en calibre respectivamente, lo que genera un escalonamiento favoreciendo la aparición de puntos apretados en el hueco. A pesar de que corresponden a los eventos de mayor ocurrencia no fueron muy altos los NPT, ya que fue posible superar estos puntos apretados lavando la formación con la bomba, razón por la que se observan Washouts a la misma profundidad de los Tight Hole.

Pozo Colorado 70

Figura 41. Curva de avance de la perforación pozo 70



Fuente: Los autores

Tabla 13. Resumen de eventos de perforación colorado 70

WELL TIME SUMMARY						
Col70	Date	(ft) MD	(in) Section	(ppg) MW	Colorado70 Summary	fday Daily
0		0				
1	30/10/1961	520	12 1/4	9.8	Perforo desde Superficie hasta 520'.	520
2	31/10/1961	520	8 1/2	9.8	Corrida de Casing de 9 5/8", zapato @503'. TightHole @503'.	0
3	01/11/1961	838	8 1/2	9.9	Perforo desde 520' hasta 838'	318
4	02/11/1961	1,157	8 1/2	10.0	Perforo desde 838' hasta 1157'	319
5	03/11/1961	1,488	8 1/2	9.9	Perforo desde 1157' hasta 1488'	331
6	04/11/1961	1,730	8 1/2	9.9	Perforo desde 1488' hasta 1730'. breakout @ 1487'. Washout 1557'.	242
7	05/11/1961	1,943	8 1/2	10.7	Perforo desde 1730' hasta 1943'. Washout @1183, 1845'.	213
8	06/11/1961	1,991	8 1/2	10.8	Perforo desde 1943' hasta 1991'. TightHole @1687'-1991'.	48
9	07/11/1961	2,007	8 1/2	10.8	Corazono dese 1999'-1999'. Se recuperaron 7'. Corazono desde 1999'-2007' se recupero 8'.	16
10	08/11/1961	2,104	8 1/2	10.8	Perforo desde 2012' hasta 2104'. Corazono desde 2007'-2012'. Recupero 1'.	97
11	09/11/1961	2,267	8 1/2	11.0	Perforo desde 2104' hasta 2267'. TightHole @1827'.	163
12	10/11/1961	2,436	8 1/2	11.2	Perforo desde 2267' hasta 2436'. Breakout @1863'.	169
13	11/11/1961	2,566	8 1/2	11.2	Perforo desde 2436' hasta 2566'. Breakout @ 2346'.	130
14	12/11/1961	2,769	8 1/2	11.4	Perforo desde 2566' hasta 2769'. TightHole @ 2185'- 2706'.	203
15	13/11/1961	2,929	8 1/2	11.4	Perforo desde 2769' hasta 2929'. Breakout @1831'.	160
16	14/11/1961	3,062	8 1/2	11.8	Perforo desde 2929' hasta 3062'. Breakout @2466'.	133
17	15/11/1961	3,131	8 1/2	11.9	Perforo desde 3062' hasta 3131'.	69
18	16/11/1961	3,196	8 1/2	11.6	Perforo desde 3131' hasta 3196'.	65
19	17/11/1961	3,318	8 1/2	11.8	Perforo desde 3196' hasta 3318'.	122
20	18/11/1961	3,410	8 1/2	11.8	Perforo desde 3318' hasta 3410'. TightHole @2956'.	92
21	19/11/1961	3,535	8 1/2	11.8	Perforo desde 3410' hasta 3535'	125
22	20/11/1961	3,650	8 1/2	11.8	Perforo desde 3535' hasta 3650'. Stuck pipe @3100'.	115
23	21/11/1961	3,716	8 1/2	11.8	Perforo desde 3650' hasta 3716'.	66
24	22/11/1961	3,811	8 1/2	11.8	Perforo desde 3716' hasta 3811'. Run Logs (Induccion, Sonico)	95
25	23/11/1961	3,811	8 1/2	11.8	Correo Casing de 5 1/2", zapato@3603'. Cemento.	0
26	24/11/1961	3,811	8 1/2	11.8	Run Logs (Temperatura, Gamma Ray)	0

Fuente: Los autores

Tabla 14. NPT de Colorado 70

Colorado 70						
Date	(ft) MD	NPT (Horas)				
		STABILITY	LOSS	NGR	OPERATIONAL	INFLUX
31/10/1961	520				3.5	
06/11/1961	1991			4	3	
09/11/1961	2267			1.5		
14/11/1961	3062	3				
15/11/1961	3131	1		4.5		
	TOTAL	4		10	6.5	

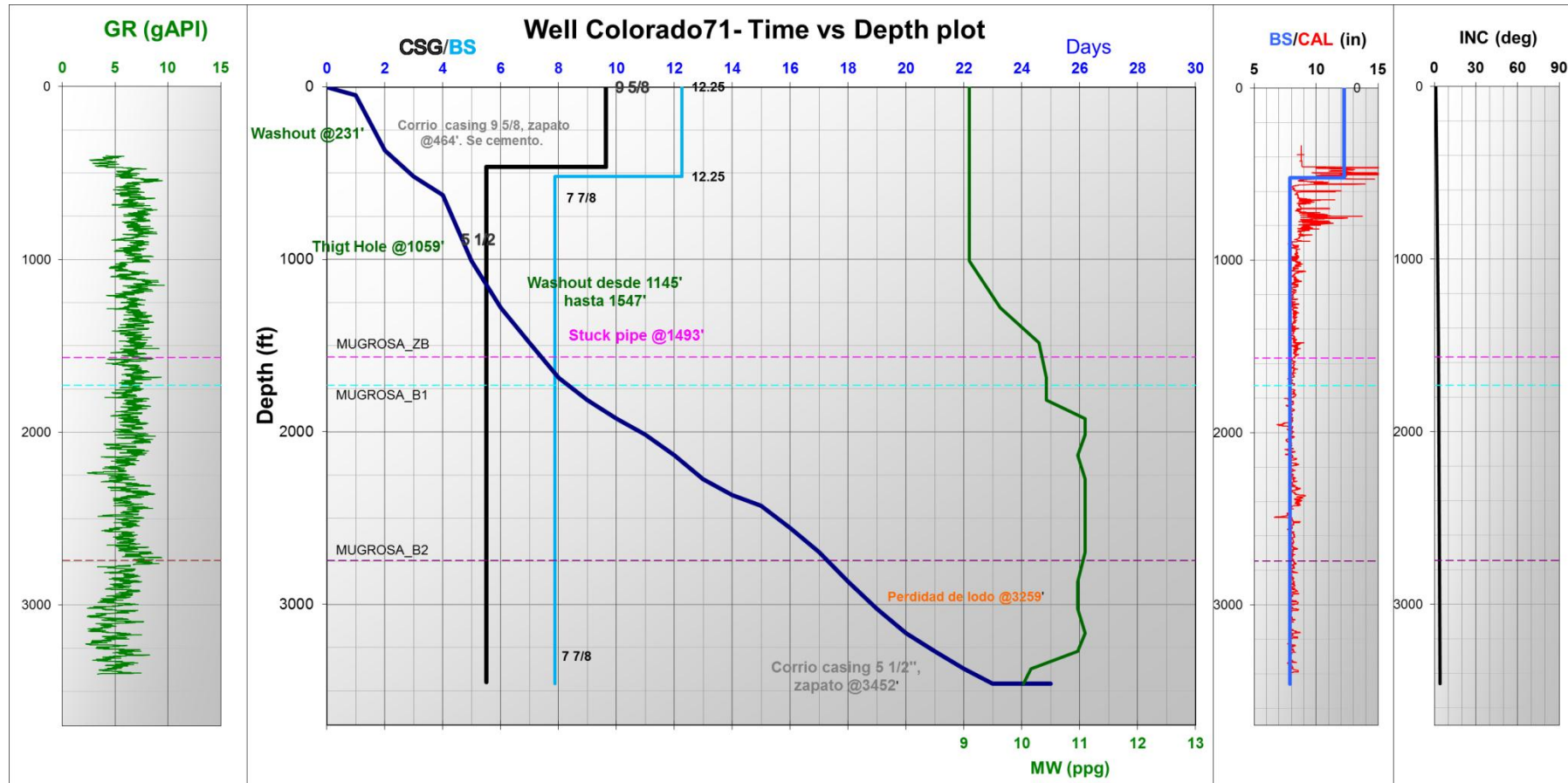
Fuente: Los autores

Los eventos más relevantes en el Colorado 70 fueron los puntos apretados tanto en la formación Mugrosa Zona B como Mugrosa B2, sin embargo los NPT no

disminuyeron considerablemente el avance de la perforación. A 3100' se presenta una pega de tubería, debido a la presencia de un paquete de arcillas, como se puede observar en las lecturas altas del registro GR a esa profundidad. En la formación Mugrosa B1 presento varios breakouts, que pueden estar asociadas a la presencia de algunos paquetes de arenas poco consolidadas como se observan en el registro GR. Para este pozo se corazonó desde 1991' hasta 2012', con una recuperación del 76% lo que valida la poca consolidación de dicha arena.

Pozo Colorado 71

Figura 42. Curva de avance de la perforación pozo 71



Fuente: Los autores

Tabla 15. Resumen de eventos de perforación colorado 71

WELL TIME SUMMARY							
Col71	Date	(ft) MD	(in) Section	(ppg) MW	Colorado71 Summary	ftday Daily	
0		0				0	
1	29/11/1961	48	12 1/4	9.1	Perforo desde Superficie hasta 48'	48	
2	30/11/1961	369	12 1/4	9.1	Perforo desde 48' hasta 369'	321	
3	01/12/1961	520	12 1/4	9.1	Perforo desde 369' hasta 520'. Corrida de casing 9 5/8, zapato @464'. Se cemento.	151	
4	02/12/1961	627	7 7/8	9.1	Perforo tapon 425' hasta 520'. Perforo desde 520' hasta 627'.	107	
5	03/12/1961	1,009	7 7/8	9.1	Perforo desde 627' hasta 1009'	382	
6	04/12/1961	1,278	7 7/8	9.6	Perforo desde 1009' hasta 1278'	269	
7	05/12/1961	1,482	7 7/8	10.3	Perforo desde 1278' hasta 1482'. Thigt Hole @1059'	204	
8	06/12/1961	1,685	7 7/8	10.4	Perforo desde 1482' hasta 1685'. Washout desde 1145' hasta 1547'	203	
9	07/12/1961	1,815	7 7/8	10.4	Perforo desde 1685' hasta 1815'. Stuck pipe @1493', se trabajo con bomba (Washout) 231' por 2.5 horas	130	
10	08/12/1961	1,924	7 7/8	11.1	Perforo desde 1815' hasta 1924'	109	
11	09/12/1961	2,016	7 7/8	11.1	Perforo desde 1924' hasta 2016'	92	
12	10/12/1961	2,137	7 7/8	11.0	Perforo desde 2016' hasta 2137'	121	
13	11/12/1961	2,273	7 7/8	11.1	Perforo desde 2137' hasta 2273'	136	
14	12/12/1961	2,366	7 7/8	11.1	Perforo desde 2273' hasta 2366'	93	
15	13/12/1961	2,428	7 7/8	11.1	Perforo desde 2366' hasta 2428'	62	
16	14/12/1961	2,558	7 7/8	11.1	Perforo desde 2428' hasta 2558'	130	
17	15/12/1961	2,695	7 7/8	11.1	Perforo desde 2558' hasta 2695'	137	
18	16/12/1961	2,867	7 7/8	11.0	Perforo desde 2695' hasta 2867'	172	
19	17/12/1961	3,025	7 7/8	11.0	Perforo desde 2867' hasta 3025'	158	
20	18/12/1961	3,167	7 7/8	11.1	Perforo desde 3025' hasta 3167'	142	
21	19/12/1961	3,273	7 7/8	11.0	Perforo desde 3167' hasta 3273'. Perdidad de lodo @3259'	106	
22	20/12/1961	3,373	7 7/8	10.2	Perforo desde 3273' hasta 3373'	100	
23	21/12/1961	3,460	7 7/8	10.0	Perforo desde 3373' hasta 3460'. Corrida de registros (inducción y sonico)	87	
24	22/12/1961	3,460	7 7/8	10.0	Corrida de casing 5 1/2", zapato @3452', cemento, corrida de registro (temperatura y gamma ray)	0	
25	23/12/1961	3,460	7 7/8	10.0	Termina corrida de registros	0	

Fuente: Los autores

Tabla 16. NPT de Colorado 71

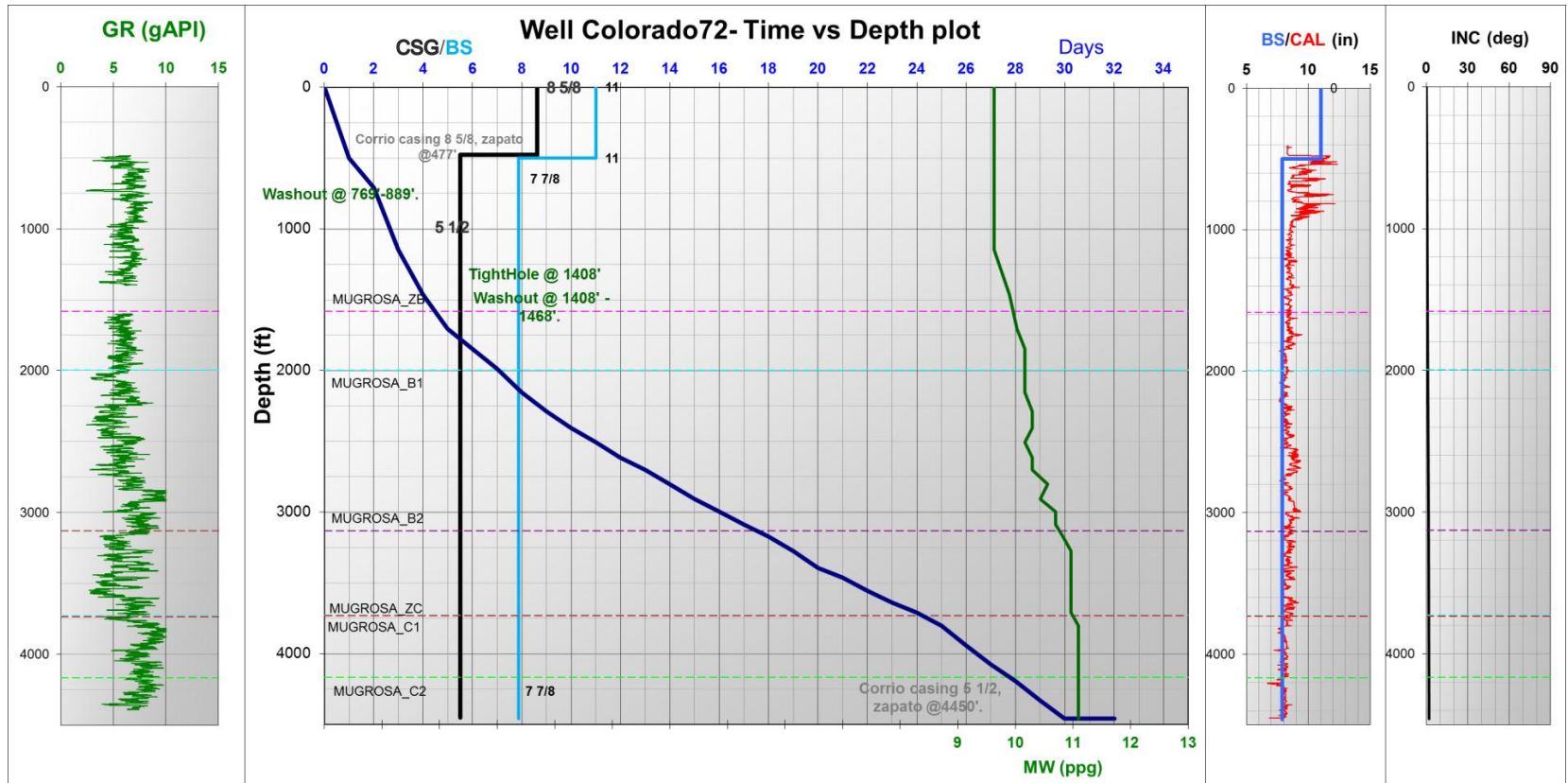
Colorado 71						
Date	(ft) MD	NPT (Horas)				
		STABILITY	LOSS	NGR	OPERATIONAL	STUCK PIPE
29/11/1961	48			2		
30/11/1961	369				0.5	
07/12/1961	1815			1		2
08/12/1961	1924			1		
09/12/1961	2016			7		
10/12/1961	2137			4		
15/12/1961	2695			5		
19/12/1961	3273	4	4			
22/12/1961	3460			1		
TOTAL		4	4	21	0.5	2

Fuente: Los autores

En el pozo colorado 71 se presentó una pega a 1493', posiblemente por mala limpieza del pozo, debido a la baja densidad del lodo, sin embargo la pega se trabajó con la bomba adecuadamente permitiendo seguir con la perforación; como medida preventiva se aumentó la densidad del lodo y se continuo perforando, pero a 3295' de profundidad se experimentaron perdidas de lodo las cuales posiblemente fueron causadas por un alto valor de densidad (11ppg), dichos eventos no influenciaron significativamente en el avance de la perforación del pozo.

Pozo Colorado 72

Figura 43. Curva de avance de la perforación pozo 72



Fuente: Los autores

Tabla 17. Resumen de eventos de perforación colorado 72

WELL TIME SUMMARY						
Col72	Date	(ft) MD	(in) Section	(ppg) MW	Colorado72 Summary	ftday Daily
0		0				0
1	16/02/1962	500	11	9.6	Perforo desde Superficie hasta 500'. Circulo 1.5 h. Inicia corrida de casing 8 5/8	500
2	17/02/1962	709	7 7/8	9.6	Corrida de casing 8 5/8, zapato @477'. Se cemento y probó tapon. Perforo tapon desde 442' hasta 500'. Perforo desde 500' hasta 709'.	209
3	18/02/1962	1,148	7 7/8	9.6	Perforo desde 709' hasta 1148'. Washout desde 769' hasta 889'.	439
4	19/02/1962	1,468	7 7/8	9.9	Perforo desde 1148' hasta 1468'	320
5	20/02/1962	1,704	7 7/8	10.0	Perforo desde 1468' hasta 1704'. TightHole @ 1408', Washout desde 1408' hasta 1468'.	236
6	21/02/1962	1,849	7 7/8	10.2	Perforo desde 1704 hasta 1849'	145
7	22/02/1962	1,987	7 7/8	10.2	Perforo desde 1849' hasta 1987'	138
8	23/02/1962	2,154	7 7/8	10.2	Perforo desde 1987' hasta 2154'	167
9	24/02/1962	2,290	7 7/8	10.3	Perforo desde 2154' hasta 2290'	136
10	25/02/1962	2,408	7 7/8	10.3	Perforo desde 2290' hasta 2408'	118
11	26/02/1962	2,508	7 7/8	10.2	Perforo desde 2408' hasta 2508'	100
12	27/02/1962	2,617	7 7/8	10.3	Perforo desde 2508' hasta 2617'	109
13	28/02/1962	2,701	7 7/8	10.3	Perforo desde 2617' hasta 2701'	84
14	01/03/1962	2,803	7 7/8	10.6	Perforo desde 2701' hasta 2803'	102
15	02/03/1962	2,908	7 7/8	10.4	Perforo desde 2803' hasta 2908'	105
16	03/03/1962	2,998	7 7/8	10.7	Perforo desde 2908' hasta 2998'	90
17	04/03/1962	3,089	7 7/8	10.7	Perforo desde 2998' hasta 3089'	91
18	05/03/1962	3,175	7 7/8	10.8	Perforo desde 3089' hasta 3175'	86
19	06/03/1962	3,276	7 7/8	11.0	Perforo desde 3175' hasta 3276'	101
20	07/03/1962	3,396	7 7/8	11.0	Perforo desde 3276' hasta 3396'	120
21	08/03/1962	3,462	7 7/8	11.0	Perforo desde 3396' hasta 3462'	66
22	09/03/1962	3,555	7 7/8	11.0	Perforo desde 3462' hasta 3555'	93
23	10/03/1962	3,640	7 7/8	11.0	Perforo desde 3555' hasta 3640'	85
24	11/03/1962	3,709	7 7/8	11.0	Perforo desde 3640' hasta 3709'	69
25	12/03/1962	3,804	7 7/8	11.1	Perforo desde 3709' hasta 3804'	95
26	13/03/1962	3,941	7 7/8	11.1	Perforo desde 3804' hasta 3941'	137
27	14/03/1962	4,078	7 7/8	11.1	Perforo desde 3941' hasta 4078'	137
28	15/03/1962	4,194	7 7/8	11.1	Perforo desde 4078' hasta 4194'	116
29	16/03/1962	4,333	7 7/8	11.1	Perforo desde 4194' hasta 4333'	139
30	17/03/1962	4,460	7 7/8	11.1	Perforo desde 4333' hasta 4460'	127
31	18/03/1962	4,460	7 7/8	11.1	Circulo 2 h. Corrió registros. Inicia corrida de casing	0
32	19/03/1962	4,460	7 7/8	11.1	Corrida de casing 5 1/2, zapato @4450'. Se cemento y probó tapon.	0

Fuente: Los autores

Tabla 18. NPT de Colorado 72

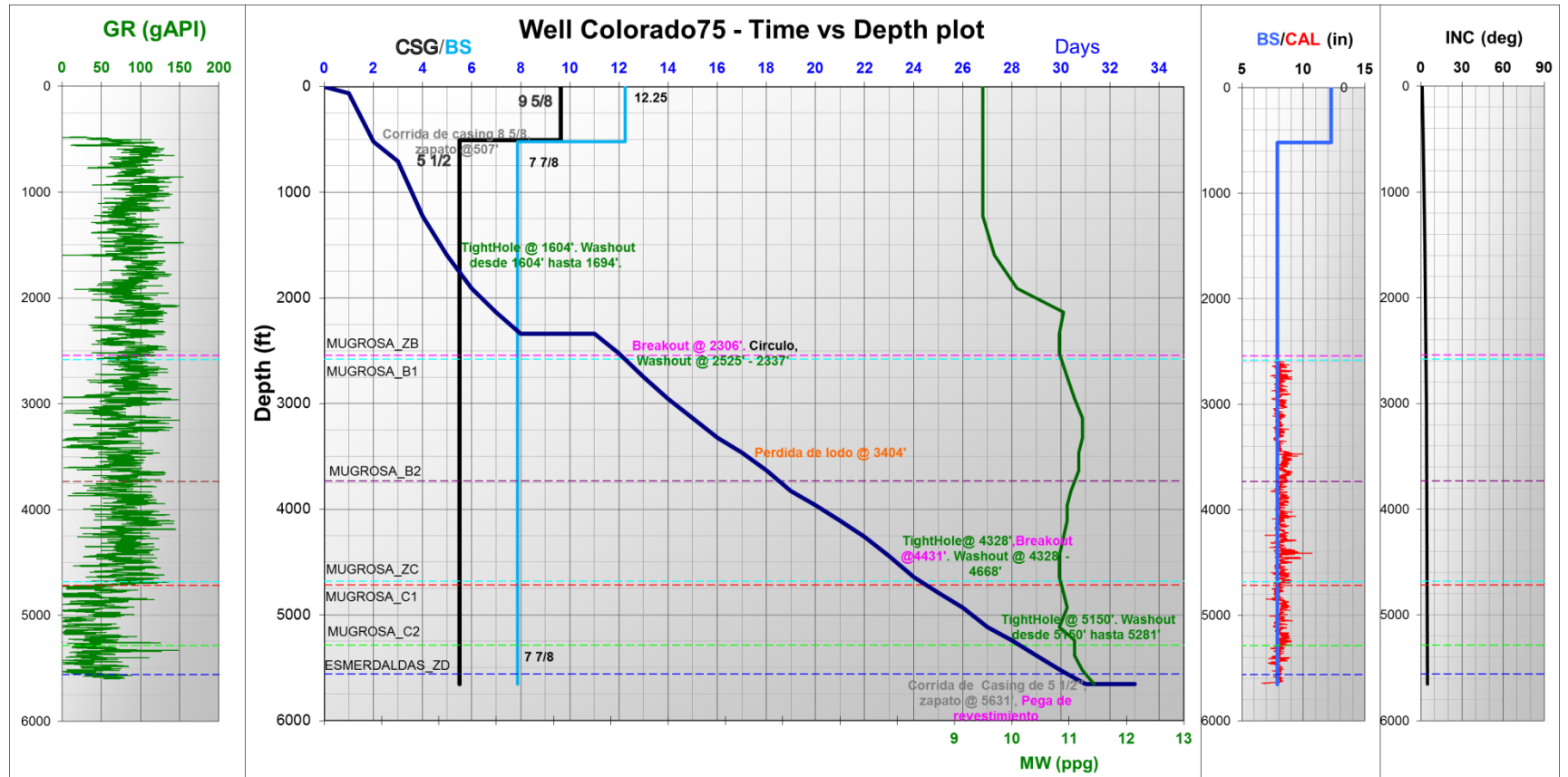
Colorado 72				
Date	(ft) MD	NPT(Horas)		
		STABILITY	NGR	OPERATIONAL
18/02/1962	1148	1		
19/02/1962	1468			
20/02/1962	1704	1		
22/02/1962	1987			1.5
25/02/1962	2408		1.5	
27/02/1962	2617		1	
28/02/1962	2701		1	
01/03/1962	2803		1.5	
10/03/1962	3640		1	
13/03/1962	3941		2.5	
TOTAL		2	8.5	1.5

Fuente: Los autores

En el pozo colorado 72 los eventos relacionados con problemas geomecánicos no ocasionaron inconvenientes en el momento de perforar el pozo como se observa en la tabla de NPT y en el performance de la curva de avance de perforación. La mayoría de los eventos no están relacionados con la estabilidad del pozo, presentándose solo 2 horas de NPT ocasionados por Tight hole a 1408' que fue trabajado lavando (washouts) la formación a dicha profundidad.

Pozo Colorado 75

Figura 44. Curva de avance de la perforación pozo 75



Fuente: Los autores

Tabla 19. Resumen de eventos de perforación colorado 75

WELL TIME SUMMARY							
Col75	Date	(ft) MD	(in) Section	(ppg) MW	Colorado75 Summary	ftday Daily	
0		0				0	
1	26/09/1962	60	12 1/4	9.5	Perforo desde superficie hasta 60'.	60	
2	27/09/1962	520	12 1/4	9.5	Perforo desde 60' hasta 520'. Circulo 1,5 h. Inicia corrida de casing 8 5/8	460	
3	28/09/1962	705	7 7/8	9.5	Corrida de casing 8 5/8, zapato @507'. Se cemento proba tapon. Perforo tapon desde 468' hasta 705'.	185	
4	29/09/1962	1,226	7 7/8	9.5	Perforo desde 705' hasta 1226'.	521	
5	30/09/1962	1,595	7 7/8	9.7	Perforo desde 1226' hasta 1595'.	369	
6	01/10/1962	1,910	7 7/8	10.1	Perforo desde 1595' hasta 1910'. TightHole @ 1604'. Washout desde 1604' hasta 1694'.	315	
7	02/10/1962	2,134	7 7/8	10.9	Perforo desde 1910' hasta 2134'	224	
8	03/10/1962	2,337	7 7/8	10.8	Perforo desde 2134' hasta 2337'	203	
9	04/10/1962	2,337	7 7/8	10.8	No se puede ingresar a la locacion	0	
10	05/10/1962	2,337	7 7/8	10.8	No se puede ingresar a la locacion	0	
11	06/10/1962	2,337	7 7/8	10.8	No se puede ingresar a la locacion	0	
12	07/10/1962	2,525	7 7/8	10.8	Perforo desde 2337' hasta 2525'. Breakout @ 2306'. Circulo, Washout desde 2525' hasta 2337'	188	
13	08/10/1962	2,749	7 7/8	11.0	Perforo desde 2525' hasta 2749'	224	
14	09/10/1962	2,956	7 7/8	11.1	Perforo desde 2749' hasta 2956'	207	
15	10/10/1962	3,138	7 7/8	11.2	Perforo desde 2956' hasta 3138'	182	
16	11/10/1962	3,323	7 7/8	11.2	Perforo desde 3138' hasta 3323'	185	
17	12/10/1962	3,464	7 7/8	11.2	Perforo desde 3323' hasta 3464'. Perdida de lodo parcial @ 3404' (aprox. 60 Bbls), se acondiciono lodo.	141	
18	13/10/1962	3,632	7 7/8	11.2	Perforo desde 3464' hasta 3632'. Corriendo broca se tapo.	168	
19	14/10/1962	3,827	7 7/8	11.0	Perforo desde 3632' hasta 3827'	195	
20	15/10/1962	3,963	7 7/8	11.0	Perforo desde 3827' hasta 3963'	136	
21	16/10/1962	4,107	7 7/8	11.0	Perforo desde 3963' hasta 4107'	144	
22	17/10/1962	4,261	7 7/8	10.9	Perforo desde 4107' hasta 4261'. Corriendo broca se tapo, no se logro destapar se saco tuberia.	154	
23	18/10/1962	4,441	7 7/8	10.8	Perforo desde 4261' hasta 4441'	180	
24	19/10/1962	4,642	7 7/8	10.8	Perforo desde 4441' hasta 4642'. Breakout @4431'. Washout desde 4431' hasta 4482'	201	
25	20/10/1962	4,792	7 7/8	10.9	Perforo desde 4642' hasta 4792'. TightHole @ 4328'. Washout desde 4328' hasta 4668'.	150	
26	21/10/1962	4,931	7 7/8	11.0	Perforo desde 4792' hasta 4931'	139	
27	22/10/1962	5,114	7 7/8	10.8	Perforo desde 4931' hasta 5114'	183	
28	23/10/1962	5,240	7 7/8	11.1	Perforo desde 5114' hasta 5240'	126	
29	24/10/1962	5,386	7 7/8	11.1	Perforo desde 5240' hasta 5386'. TightHole @ 5150'. Washout desde 5150' hasta 5281'	146	
30	25/10/1962	5,524	7 7/8	11.2	Perforo desde 5386' hasta 5524'	138	
31	26/10/1962	5,656	7 7/8	11.4	Perforo desde 5524' hasta 5656'. Se circulo por 3,5 h.	132	
32	27/10/1962	5,656	7 7/8	11.4	Corrida de registros. Circulo 1.5 horas	0	
33	28/10/1962	5,656	7 7/8	11.4	Corrida de Casing de 5 1/2", zapato @ 5631', pega de revestimiento durante la corrida, cementacion	0	

Fuente: Los autores

Tabla 20. NPT de Colorado 75

Colorado 75						
Date	(ft)	NPT (Horas)				
	MD	STABILITY	LOSS	NGR	OPERATIONAL	INFLUX
27/09/1962	520			1		
29/09/1962	1226			1		
30/09/1962	1595			3.5		
01/10/1962	1910	1				
02/10/1962	2134			2		
03/10/1962	2337			5.5		
04/10/1962	2337			22		
05/10/1962	2337			24		
06/10/1962	2337			24		
07/10/1962	2525			6		
08/10/1962	2749	1				
11/10/1962	3323			2		
12/10/1962	3464		1.5	0.5		
13/10/1962	3632	0.5				
17/10/1962	4261			1	3	
18/10/1962	4441				2	
19/10/1962	4642	0.5				
20/10/1962	4792	2.5		3.5		
21/10/1962	4931			6.5		
24/10/1962	5386	0.5		1		
25/10/1962	5524			0.5		
	TOTAL	6	1.5	104	5	0

Fuente: Los autores

En el pozo Colorado 75 el evento de mayor frecuencia fue Tight hole en las formaciones Colorado, Mugrosa zona C y Mugrosa C2, adicionalmente se presentó una pérdida de lodo parcial a 3404' de aproximadamente 60 Bbl, con un peso de lodo de 11.2 ppg, posiblemente por la alta densidad de lodo. Se presentó breakouts a 2306' y 4431' lo que hizo necesario aumentar la densidad de lodo para controlar la estabilidad del hueco. La principal causa de NPT en este pozo son ocasionados por eventos no relacionados a la geomecánica, observándose que del día 9 al 11 se interrumpe el avance en la perforación, debido a que el personal no pudo acceder a la locación, por lo cual el valor de los NPT debido a NGR es muy alto.

Una vez identificados las causas de los NPT en los pozos off set y basado en el conocimiento de los antecedentes de los eventos en los pozos a los que se les construirá modelo unidimensional, se puede determinar cuáles de estos tienen mayor probabilidad de ocurrir, la severidad, la forma de detección durante la perforación y las recomendaciones que se deben llevar a cabo para evitar la ocurrencia del evento y de esta manera optimizar el progreso de la perforación.

En el caso de los pozos seleccionados se evaluó la probabilidad de acuerdo al número de veces que ocurrió el evento, la severidad basada en la cantidad de NPT que ocasiono el mismo, y se plantean ciertas operaciones que se deben llevar a cabo con el fin de reducir al mínimo la presencia de estos eventos. La siguiente tabla presenta las acciones y procedimientos aconsejados para los futuros pozos que se perforen en Campo Colorado.

Tabla 21. Evaluación de los eventos

Evento/Descripción	Formación	Probabilidad	Severidad	Detección	Recomendaciones
Tight Hole/ Debido al colapso de las paredes del hueco en zonas de arcillolitas , generan derrumbes que se acumulan en el anular causando restricción al paso de la sarta. También por las propiedades mecánicas de los conglomerados, estos tienden a mantenerse en calibre, por lo que al paso de herramientas con calibre similar al tamaño del hueco tenderán a generar arrastres y overpull. Escalonamiento que se genera por la intercalación de litologías: shales, los cuales tienden a lavarse y a derrumbarse, y areniscas y calizas, las cuales por sus propiedades mecánicas van a estar en calibre.	Colorado, Mugrosa Zona B, Mugrosa B2, Mugrosa Zona C, Mugrosa C1	Alta	Baja	Sobretensión durante el monitoreo de viajes Slackoff alto durante viajes a fondo. Restricciones al paso de la sarta. Arrastres y torques altos. Cambios drásticos en ROP. Picos en presión de bombeo y de ECD.	Antes de realizar el viaje asegúrese de haber circulado bien, evacuando los cortes y derrumbes que pudieron haber quedado en el anular. Si se requiere realizar backreaming iniciarlo si y sólo si se está seguro de haber circulado el tiempo suficiente después de perforar o de un rimado previo. Monitorear continuamente cualquier indicio de aparición de cavings. Circular antes de empezar viaje con galonaje controlado para evitar levantamiento brusco de rípios.
Breakout/ con la densidad de lodo propuesta se trabajará en el límite de breakouts controlados . Esto puede generar problemas de limpieza, dificultar los viajes y crear escalones y empaquetamiento de la sarta por obstrucción del anular.	Colorado, Mugrosa B1, Mugrosa B2	Media	Mayor	Incrementos de presión de bombeo no esperados (algunas veces errático). Incremento de volumen de cavings. Overpull cuando se saca o slack off cuando se entra.	Monitorear volumen de recortes en las shakers para evaluar eficiencia de limpieza del lodo. Antes de realizar cualquier viaje asegurarse de circular lo suficiente para evitar empaquetamientos. Evitar circular en Lutitas lo cual agravaría los washouts
Stuck Pipe/ Producto de zonas de inestabilidad generadas por uso de pesos de lodo bajos en zonas de lutitas con ligera sobrepresión. Empaquetamiento por derrumbes (planos de debilidad / colapso/acumulación de cortes)	Colorado, Mugrosa B2	Baja	Mayor	Disminución de recortes en las zaranda. Alto arrastre durante los viajes y variaciones en el torque Aumento en la presión de	Realizar viaje a una velocidad constante, evitando golpeteos que generen derrumbes. Monitorear la presión de fondo del pozo (APWD), un aumento en la presión de fondo puede significar alta carga de sólidos en el anular.
Perdidas de lodo/ Las posibles causas puede ser: la presión del hueco es mayor que la presión de formación (Densidad del lodo muy alta), por presencia de fracturas naturales y/o formaciones de alta permeabilidad.	Colorado, Mugrosa B1, Mugrosa B2, Mugrosa C1	Media	Seria	Perdidas espontáneas posibles pérdidas totales, Pérdidas de estáticas durante conexiones/Registros, Pérdidas del Volumen en las piscinas.	Minimizar el peso del lodo. controlar la tasa de penetración Minimizar las presiones de surgencia en el hueco Bombear Cemento a la formación (squeeze) Tratamiento Previo con material para pérdida de Circulación (píldoras, aditivos)

Fuente: Los autores

4. MEM CAMPO COLORADO

El modelo geomecánico (MEM) es una representación de las propiedades de resistencia, deformación de las rocas y de los esfuerzos a que estas se encuentran sometidas, la construcción de este modelo se lleva a cabo a partir de información geofísica, de perforación y geología. El flujo de trabajo se realiza para cada uno de los pozos seleccionados como offset (Colorado 66, 67, 72 y 75) obteniéndose así un modelo 1D para cada pozo, estos modelos necesariamente son construidos con las mismas correlaciones y constante y deben representar los eventos sucedidos en cada uno de ellos. Estas correlaciones serán las usadas para crear el modelo de estabilidad del pozo Infill 5.

En los capítulos 2 y 3 se realizó la auditoria de la información y el análisis de eventos de perforación, en este capítulo se desarrolla el resto de la metodología presentada en el capítulo 1.

4.1 Mecánica Estratigráfica

La idea de esta mecánica estratigráfica es construir una petrofísica y una litología para cada pozo off set que permita identificar las rocas grano soportadas (arenas) y arcillo soportadas (shale), de manera que se obtenga una idea del comportamiento geomecánico esperado.

Luego de la revisión de la petrofísica entregada por Campo Colorado (VSH y PHIE) de los pozos seleccionados, se observaron valores inconsistentes, debido a que los perfiles de porosidad muestran valores muy altos en algunos intervalos y una porosidad nula en la mayor parte del perfil, además de una secuencia litológica totalmente dominada por arcillas (ver figura 36), haciendo necesario el cálculo de una nueva petrofísica a partir de los registros, para correlacionar

adecuadamente las características litológicas de las rocas con las propiedades que van a ser calculadas.

Debido a la importancia de la calidad de los registros para los cálculos de las propiedades geomecánicas, se hizo uso de la función despique de Petrel para eliminar los picos del perfil, adicionalmente se completaron con perfiles de otros pozos que tenían comportamientos similares.

El cálculo inicial de la petrofísica se hizo a partir de los registros GR y sínico, donde se usaron las siguientes ecuaciones:

$$VSH = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (23)$$

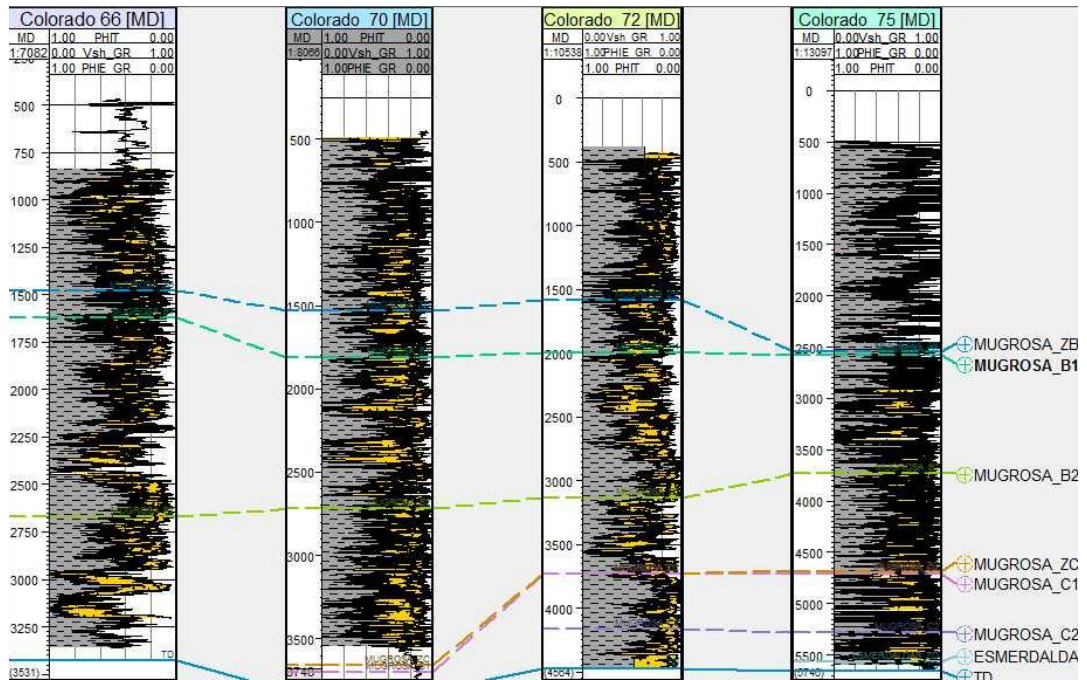
$$\phi_{TOTAL} = \frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{matriz}}{\Delta t_{fluido} - \Delta t_{matriz}} \quad (24)$$

$$\phi_{Efectiva} = \phi_{TOTAL} * (1 - VSH) \quad (25)$$

Las consideraciones que se tomaron en cuenta para el cálculo de la porosidad total fue valores de $189 \mu s/ft$ como tiempo de transito para el fluido, el cual corresponde al tiempo para un lodo fresco y $55 \mu s/ft$ para la matriz de una arena.

Las siguientes imágenes corresponden a la petrofísica hallada con la metodología anterior, donde se observan valores de porosidad más altos que los teóricos, causados por los picos presentes en el registro sínico, y la limitación del registro sínico para presentar en todo el perfil una buena correlación con la porosidad.

Figura 45. Petrofísica a partir de los registros GR y Sónico compresional



Fuente: Los autores

Una metodología que ha mostrado mejores resultados para el cálculo de las porosidades, es a partir del registro de densidad, la construcción de este registro se hace mediante la correlación de Gardner, donde la densidad es una función del tiempo de transito de las ondas compresionales, esta ecuación ha mostrado resultados muy acertados a pesar de que las constantes de la ecuación fueron calibradas para el Golfo de México. A continuación se presenta la correlación de Gardner:

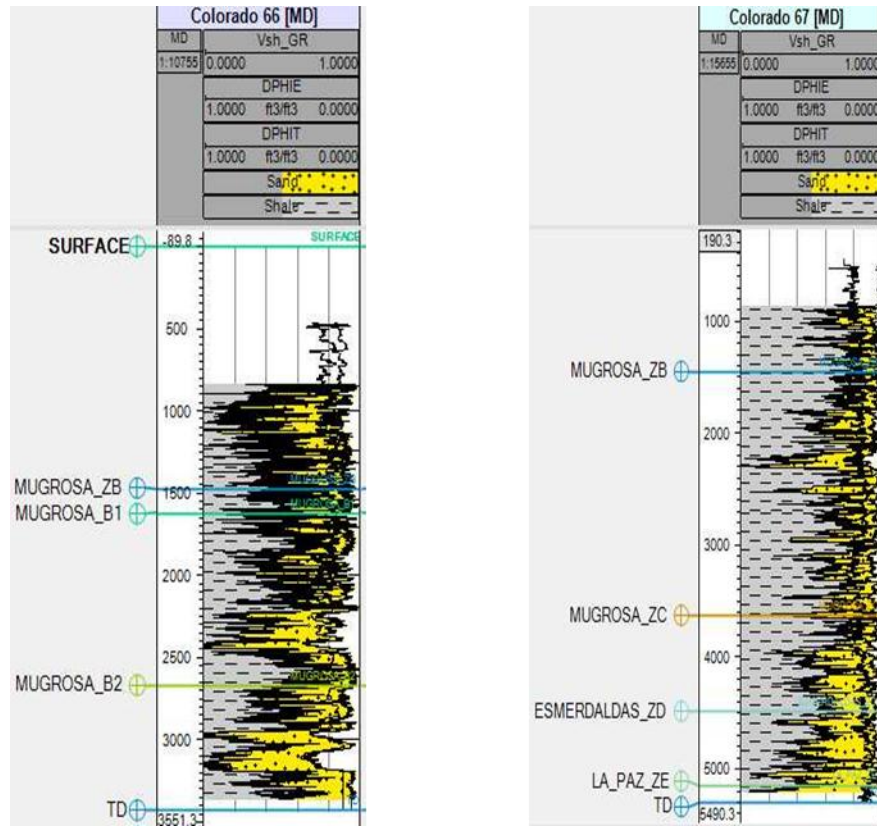
$$\rho_b = 0.23 \left(\frac{10^6}{\Delta t_{log}} \right)^{0.25} \quad (10)$$

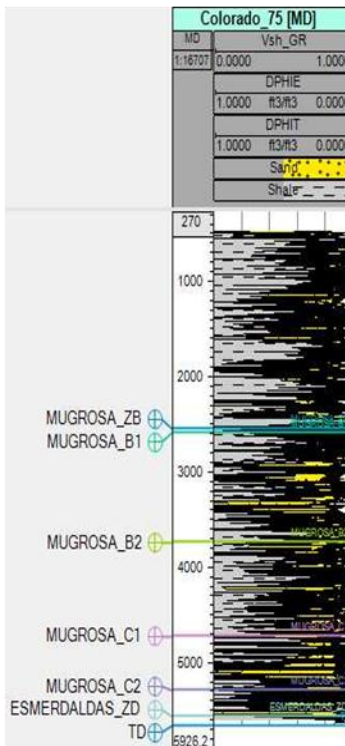
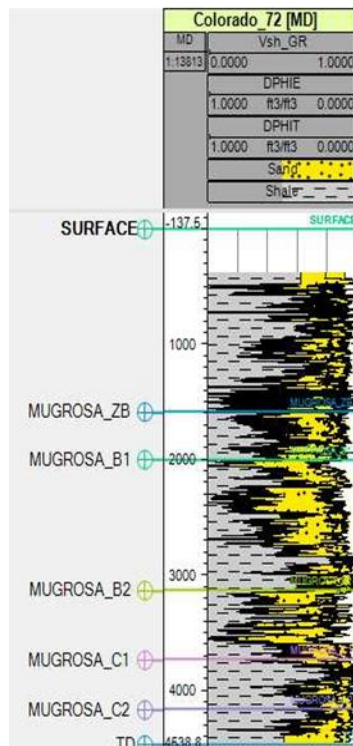
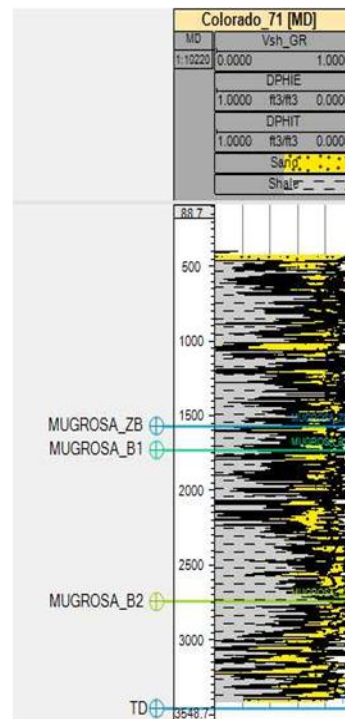
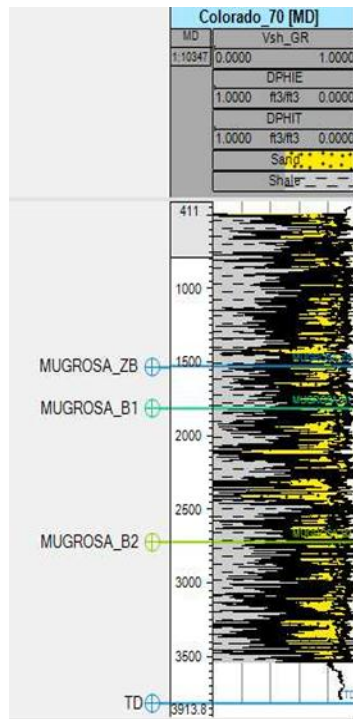
$$\phi_{TOTAL} = \frac{(\rho_{matriz} - \rho_b)}{(\rho_{matriz} - \rho_{fluido})} \quad (11)$$

Para calcular la porosidad total se tomaron valores de 2.65 gr/ cc como la densidad de la matriz para una arena y de 1 gr/cc como la densidad del fluido (agua fresca).

Esta forma de calcular la porosidad dio resultados más reales, de acuerdo con los datos que se tienen del campo, las siguientes imágenes muestra los resultados finales de la petrofísica construida para los pozos off set, y que será usada para la construcción del modelo geomecánico.

Figura 46. Petrofísica a partir de los registros GR y Densidad

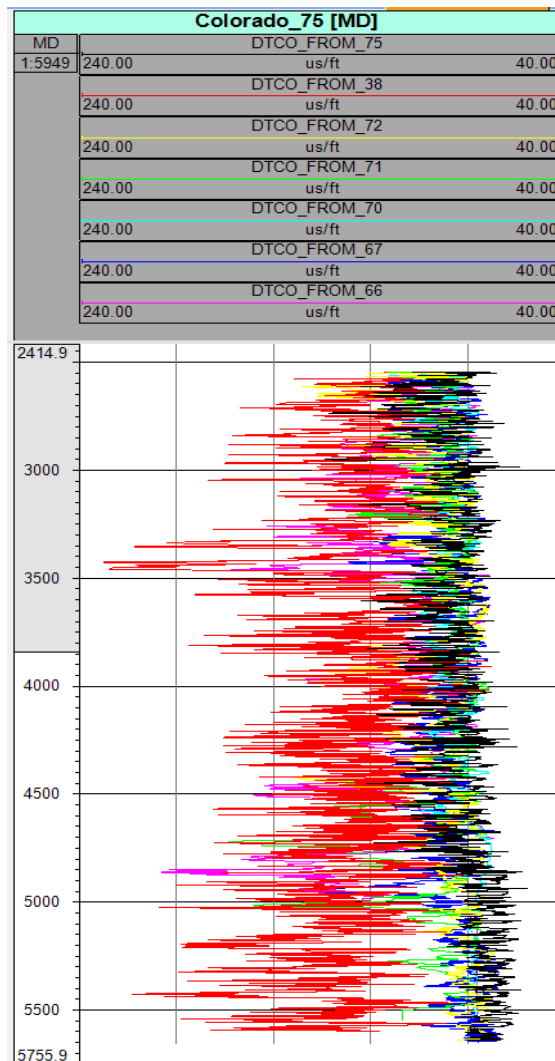




Fuente: Los autores

Una vez seleccionados los posibles pozos candidatos, se procedió a evaluar la calidad del set de registros de cada uno de ellos, el primer filtro que se hizo fue comparar las tendencias de los registros sínicos compresionales ya que el cálculo de las propiedades se basa en el modelo sínico. Se descartó el pozo 38, debido a que su comportamiento no seguía la tendencia de los otros pozos del campo y presentaba valores incoherentes.

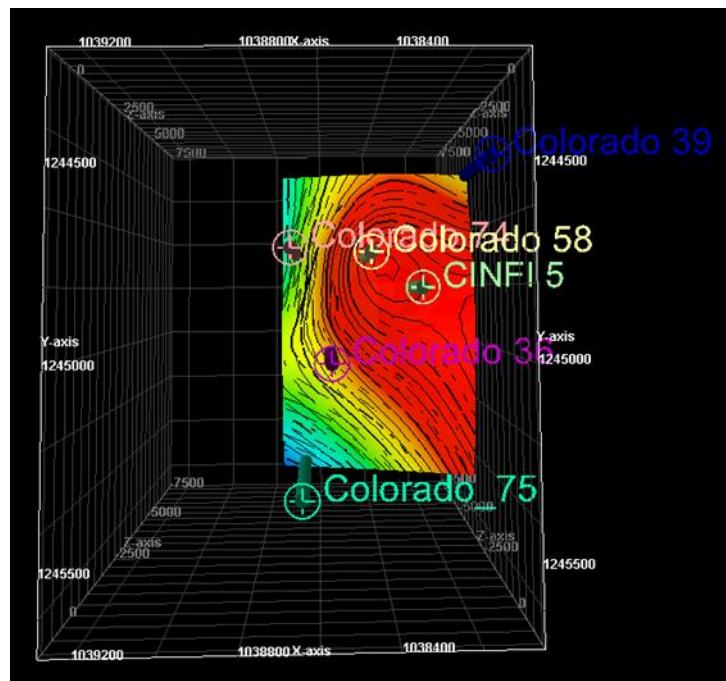
Figura 47. Comparación de registro DTCO de pozos off set



Fuente: Los autores

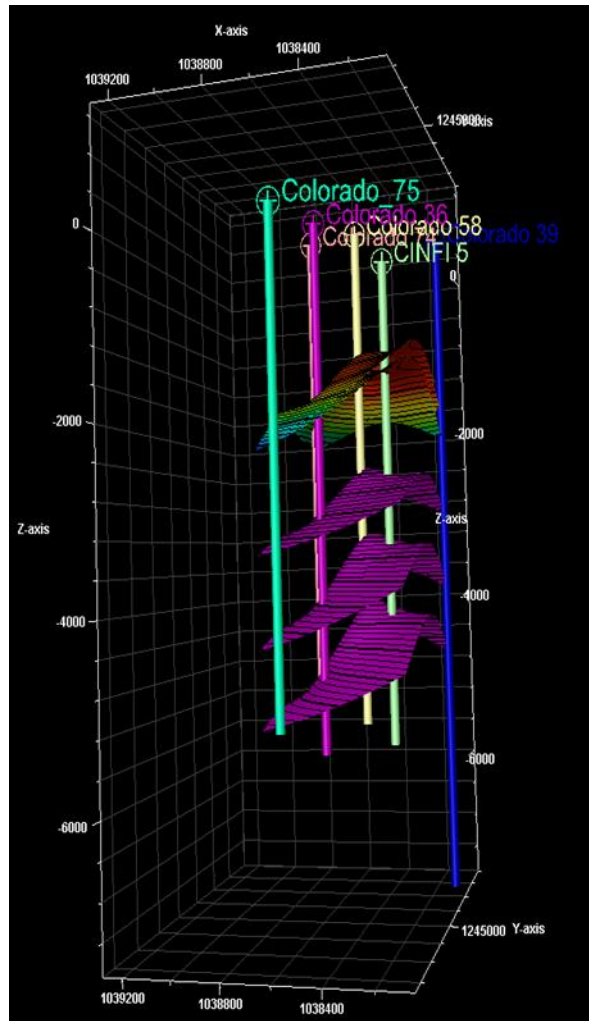
Teniendo en cuenta los pozos con mejor calidad de registros y la cercanía entre pozos off set y los pozos que planea perforar Campo Colorado, se seleccionó el pozo Infill 5, ya que es el más cercano a los pozos de mejor información. Este pozo se encuentra ubicado en el bloque V del campo, no cuenta con una prognosis de topes de formación ni con un survey. La metodología usada para definir los topes consiste en un método geoestadístico que se encarga de propagar una superficies a partir de la interpolación de los topes de formación de los pozos más cercanos al Infill 5 (Colorado 36, 39 58, 74 y 75) todos estos pozos pertenecen al bloque V, evitando la discontinuidad geológica por las fallas entre bloques, de esta manera garantizar una interpolación más acertada y una mejor construcción de la superficie. Para esto se utilizó la herramienta make/edit surface de Petrel.

Figura 48. Vista de planta de la superficie del subsuelo



Fuente: Los autores

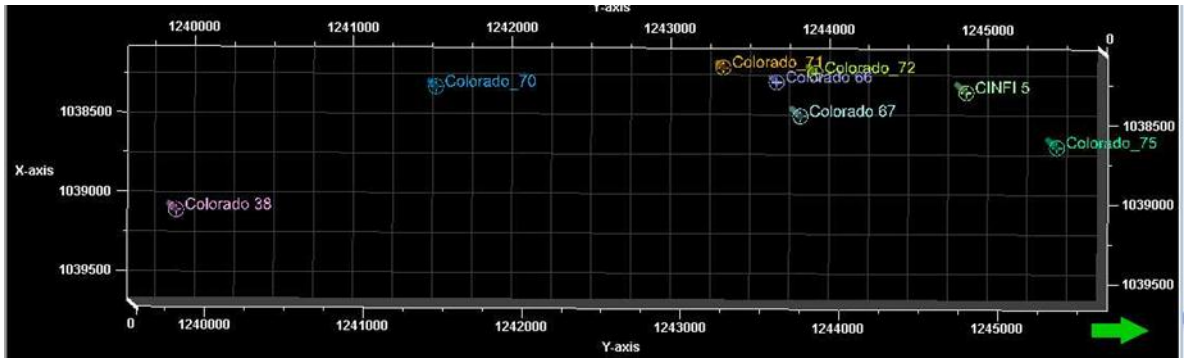
Figura 49. Superficies del subsuelo mediante método geoestadístico



Fuente: Los autores

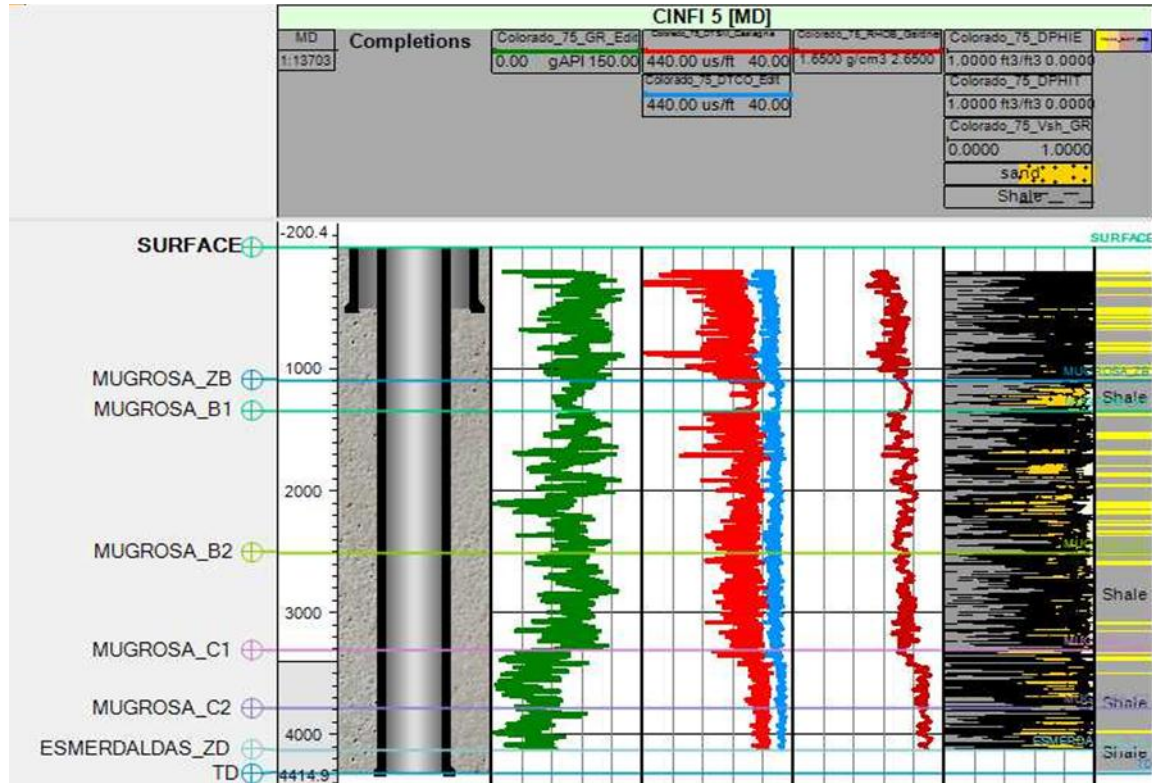
Una vez definido los topes de formación del pozo Infill 5, se puede alimentar el set de registros del pozo Infill 5 con el mejor pozo de correlación, que para este caso es el Colorado 75, los criterios para seleccionar el mejor pozo de correlación se basa en la en la calidad de los registros y la cercanía al pozo que se va a perforar, los registros fueron traídos tope a tope para garantizar la tendencia de los perfiles a través de cada una de las formaciones. La figura 50 es una vista de planta que permite observar que el colorado 75 es el pozo más cercano al Infill 5. El set de registros del pozo Infill 5 es presentado en la figura 51.

Figura 50. Vista de planta del pozo Infill 5 y pozos offset



Fuente: Los autores

Figura 51. Log montage pozo Infill 5



Fuente: Los autores

4.2 Calculo de propiedades elásticas

Las propiedades elásticas de la roca tienen que ver con su capacidad de deformación (o rigidez), estas se clasifican en dinámicas y estáticas, las estáticas son para deformaciones de mayor magnitud como las que experimenta la roca en las prueba de laboratorio y dinámicas para deformaciones de magnitud más pequeña como las ocasionadas por las ondas de los registros.

El cálculo de las propiedades elásticas de la roca se determina a partir del modelo sónico, este modelo permite calcular los módulos dinámicos y estáticos a partir de los registros sínicos y de densidad. Este modelo se basa en la relación teórica que existe entre las propiedades dinámicas de la roca y los tiempos de transito de las ondas compresionales y de cizalla. Para materiales homogéneos, isotrópicos y elásticos, el comportamiento de esfuerzo-deformación puede ser descrito por tres propiedades: el Módulo de Young (E), la Relación de Poisson (ν) y el Coeficiente de Biot.

4.2.1 Propiedades dinámicas de la roca Para el cálculo de las propiedades dinámicas de la roca se hace uso de los módulos shear y bulk los cuales son función de los registros sínico compresional y de cizalla, debido a que no se cuenta con registro DTSM en ninguno de los pozos, fue necesario la construcción de este perfil, luego de evaluar diferentes correlaciones la que mejores resultados presentó fue la correlación de Castagna la cual es función del DTCO como se muestra a continuación.

$$DTSM = \frac{1}{-0.0025 + \frac{0.75}{DTCO}} \quad (26)$$

- **Modulo Shear y Modulo Bulk**

El modulo de rigidez o modulo Shear (G_{dyn}), es una medida de la resistencia de la muestra de roca contra la deformación de corte y el modulo Bulk o modulo de compresibilidad (K_{dyn}), mide la resistencia de la roca mientras se comprime uniformemente, indica entonces el aumento de presión requerido para disminuir unitariamente el volumen de la roca, estos módulos pueden ser calculados como se muestra a continuación:

$$G_{dyn} = (13474.45) \frac{\rho_b}{DTSM^2} \quad (27)$$

$$K_{dyn} = (13474.45)\rho_b \left[\frac{1}{DTCO^2} \right] - \frac{4}{3}G_{dyn} \quad (28)$$

- **Modulo dinámico de Young**

El modulo de Young se calcula para conocer la capacidad del material para deformarse elásticamente mientras es sometido a un esfuerzo, este modulo depende entonces de los módulos de rigidez y de compresibilidad de la roca, y su valor varía entre 0.5 y 10 MPsi. El modulo de Young dinámico se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{dyn} = \frac{9G_{dyn} * K_{dyn}}{G_{dyn} + 3K_{dyn}} \quad (29)$$

- **Relación de Poisson dinámica**

La relación de Poisson, determina la relación entre la deformación latitudinal y la deformación longitudinal, es una propiedad elástica de la roca que es función de

las tiempos de transito en los perfiles sónicos compresionales y de cizalla, los valores típicos de relación de Poisson para arenas grano soportadas es de 0.25, mientras que para las arcillas se presentan valores de 0.3. La relación de Poisson dinámica puede ser calculada para cada pozo así:

$$v_{dyn} = \frac{3K_{dyn} - 2G_{dyn}}{6K_{dyn} + 2G_{dyn}} \quad (30)$$

- **Constante elástica de Biot**

Para el modelo se asume un coeficiente de Biot igual a 1 como se ha hecho en la mayoría de los modelos desarrollados para las cuencas productoras en Colombia, esto significa que hay una máxima influencia en la presión de poro para atenuar el esfuerzo total aplicado a la roca, consideración hecha para sólidos porosos extremadamente plásticos.

4.2.2 Propiedades estáticas de la roca Las propiedades estáticas son determinadas principalmente por correlaciones empíricas que dependen de las propiedades dinámicas de la roca.

- **Modulo estático de Young**

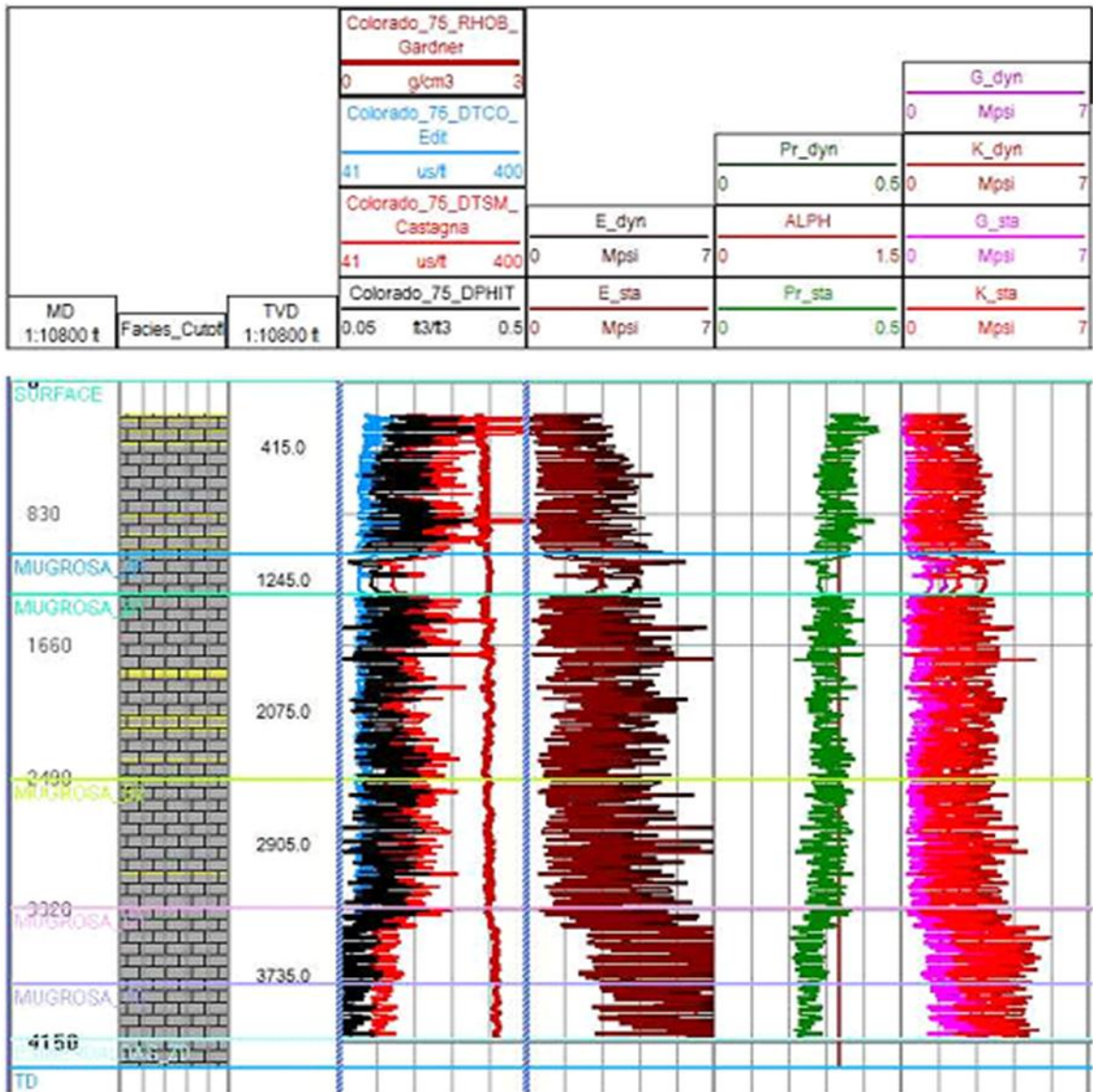
El modulo de Young estático es calculado mediante la correlación de Morales, esta correlación es aplicable para rocas grano soportadas. El modulo de Young estático es una función del modulo de Young dinámico y la porosidad efectiva, como se muestra a continuación:

$$E_{sta} = E_{dyn}(-2.21 * PHIE + 0.963) \quad (31)$$

- **Relación de Poisson estático**

Campo Colorado no dispone de pruebas a núcleos, por lo tanto para el desarrollo de este modelo se asume que la relación de Poisson estática es igual a la dinámica.

Figura 52. Propiedades elásticas de la roca pozo Infill 5



Fuente: Los autores

4.3 Propiedades de resistencia de la roca

Las propiedades de la resistencia de las rocas están representadas por la resistencia a la compresión inconfiada (UCS), por la resistencia a la tracción (TSTR) y el ángulo de fricción interna (FANG). Valores altos de estas propiedades indican altas resistencias de las rocas.

4.3.1 UCS La determinación del UCS se hizo a partir de la correlación de Coates Denoo, este es un algoritmo que empezó a ser usado en los años 60, el cual sugiere que la resistencia de arenas arcillosas se puede predecir a partir de correlaciones para arena y shale desarrolladas por Deere y Miller. Este algoritmo permite el cálculo del UCS a partir del modulo de Young dinámico, la relación de Poisson dinámica y el volumen de arcilla.

La ecuación de Coates-Denoo para el cálculo del UCS se presenta a continuación:

$$UCS = 1.9 * 10^{-20} \rho_b^2 V_p^4 \left[\frac{1+v}{1-v} \right]^2 (1 - 2v)[1 + 0.78Vsh] \quad (32)$$

4.3.2 Angulo de fricción interna El ángulo de fricción interna, es definido como el ángulo de un plano pendiente respecto a la horizontal, al cual un cuerpo empieza justo a deslizarse. Los valores típicos para una roca arcillo soportada es de 25° mientras que para una grano soportada es de 40°. Este ángulo de fricción es determinado con pruebas a núcleos, o a partir de correlaciones, como la desarrollada por Dick Plumb en el año 1994, para rocas grano soportada y arcillo soportadas

$$\theta = 19 + 31.172(1 - V_{grain})^2 \quad (33)$$

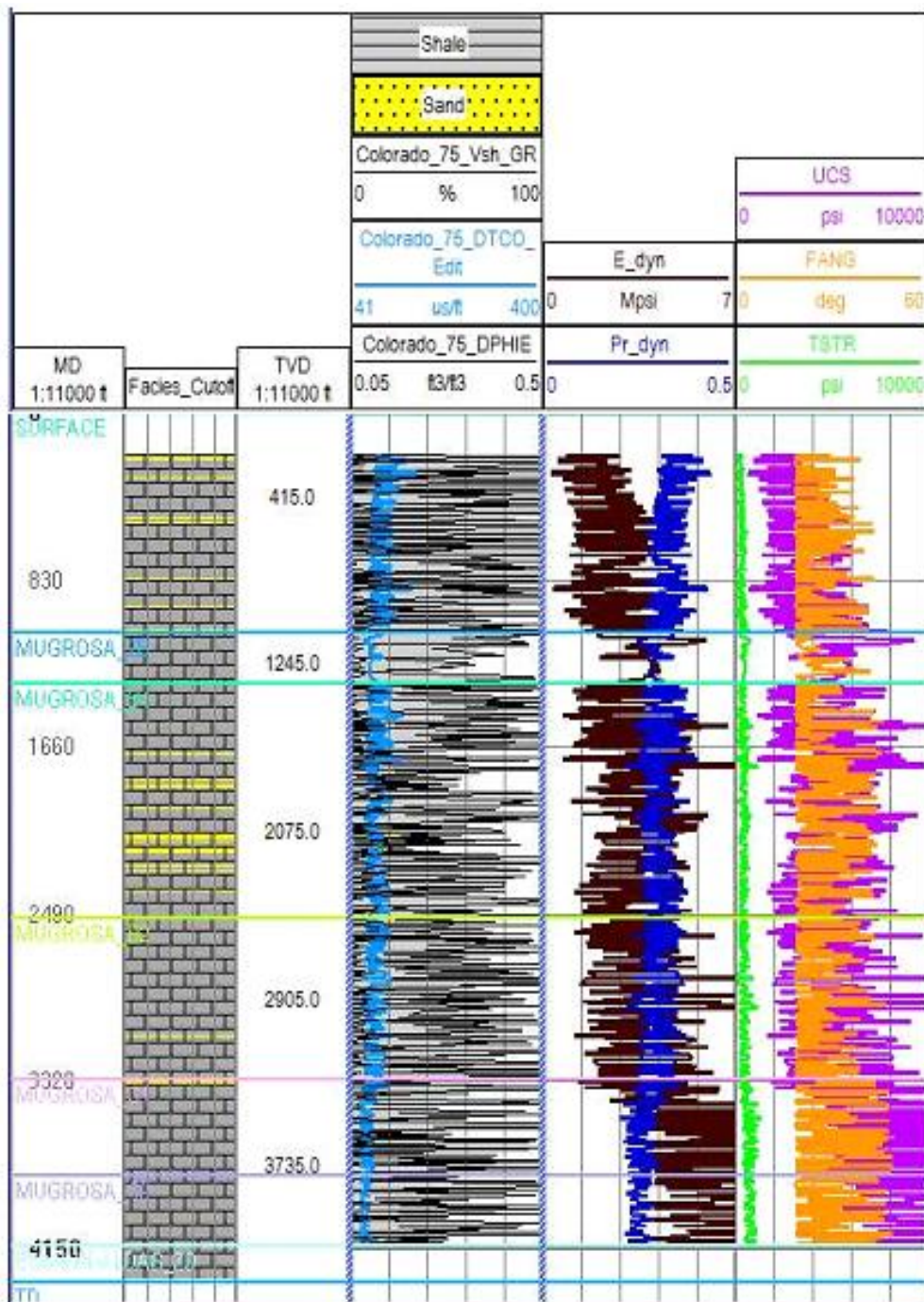
$$\theta = 19 + 31.172(1 - \phi - V_{clay})^2 \quad (34)$$

4.3.3 Resistencia a la tracción (TSTR) De acuerdo a estudios experimentales se ha demostrado que la resistencia a la tracción alcanza valores a alrededor de la décima parte de la resistencia a la compresión (UCS).

$$TSTR = \frac{UCS}{10} \quad (35)$$

El valor de 10 está basado en la teoría Elástico-plástica de Griffith, la cual da unas relaciones de resistencia a la tracción y UCS del orden de 8 a 12.

Figura 53. Propiedades de resistencia de la roca pozo Infill 5



Fuente: Los Autores

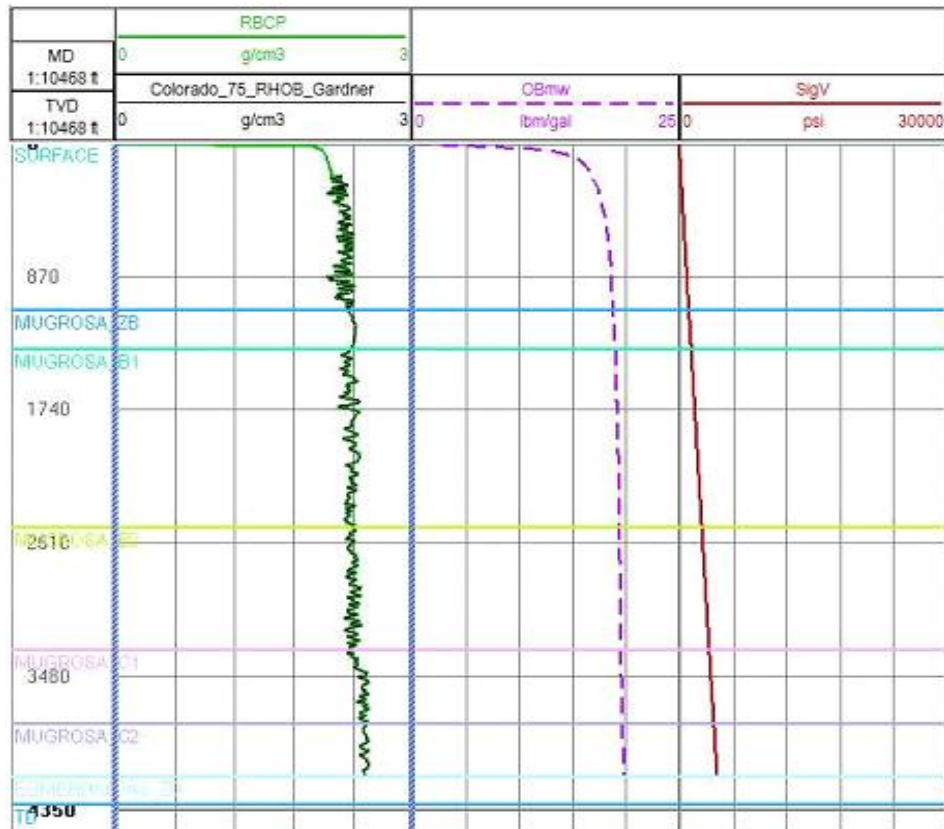
4.4 Esfuerzo vertical

El cálculo del esfuerzo vertical corresponde al peso ejercido por los estratos suprayacentes de la formación, por lo tanto puede ser calculado fácilmente cuando se tiene un perfil de densidad en los pozos, donde el esfuerzo vertical o de sobrecarga está dado por:

$$S_v = g \int_0^z \rho_b dz \quad (13)$$

La figura 54 muestra la estimación del esfuerzo vertical para el pozo a partir de su registro de densidad. Es necesario completar los primero 500 ft del registro, mediante la extrapolación del registro.

Figura 54. Esfuerzo vertical pozo Infill 5



Fuente: Los autores

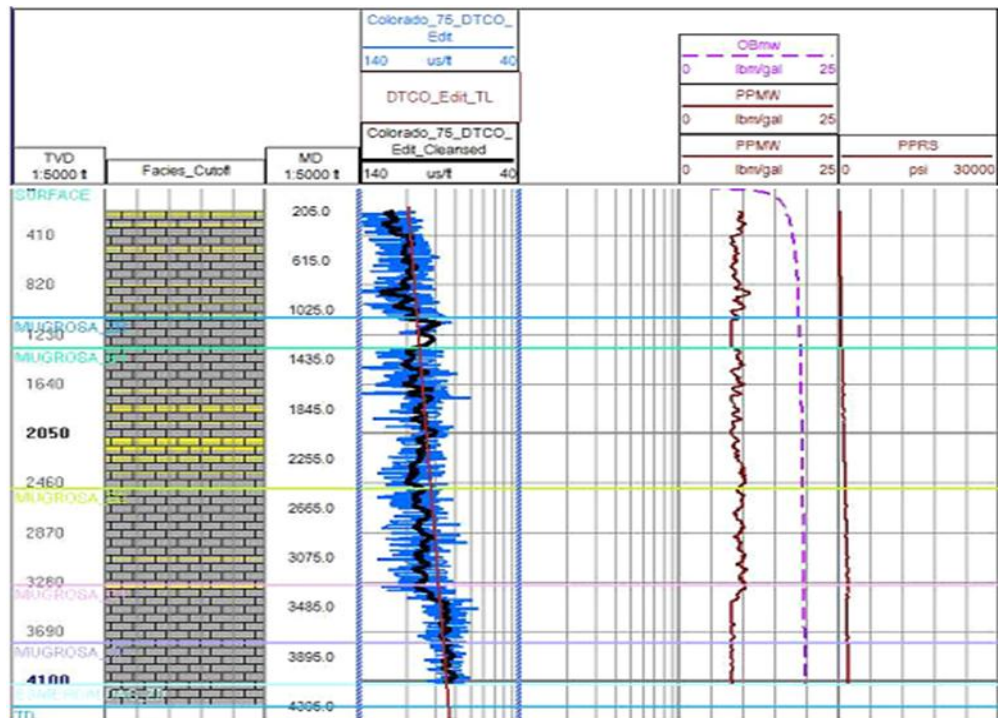
4.5 Presión de poro

La presión de poro fue determinada a partir del método de Eaton, usando el registro DTCO, para esto fue necesario hacer un smooth (suavizado) a los datos del registro para determinar una línea de tendencia de compactación normal, se consideró el coeficiente de tendencia normal de 1.2 recomendado por Schlumberger, ya que se ha usado en modelos anteriores para campos cercanos y ha mostrado buenos resultados. El incremento de caving en el pozo 75 evidencio la calibración de la presión de poro.

$$PP = S_v - (S_v - PP_n) \left(\frac{\Delta t_o}{\Delta t_n} \right)^{1.2} \quad (17)$$

Como se observa en el track, del registro sónico y la línea de tendencia normal, la formación Mugrosa B2 presenta sobrepresiones

Figura 55. Presión de poro pozo Infill 5



Fuente: Los autores

4.6 Esfuerzos horizontales máximo y mínimo

Los esfuerzos in situ que actúan sobre las rocas se forman a partir de sedimentos que se depositan en un ambiente geológico, que son sometidos a esfuerzos de sobrecarga repetidos, ocasionando la elevación y la depresión, además de ser afectados por las fuerzas tectónicas y los efectos térmicos. Estos eventos geológicos y actividades afectan considerablemente la magnitud y dirección de los esfuerzos horizontales, por lo tanto el conocimiento de los procesos geológicos, información acerca de campo y el ambiente de depositación de la cuenca, son muy valiosos en la evaluación de los esfuerzos in-situ.

A partir del mapa mundial de esfuerzos se tiene una idea preliminar de la dirección del azimut del esfuerzo horizontal mínimo, donde se observa un valor de 5°, como se puede ver en la figura 22. La determinación de los esfuerzos horizontales máxima y mínima se hizo a partir del modelo de poro-elasticidad donde la magnitud de los esfuerzos es función del esfuerzo de sobrecarga, la presión de poro, el módulo de Young y la relación de Poisson.

$$\sigma_h = \alpha P_p + \frac{v}{1-v} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-v^2} \varepsilon_h + \frac{E.v}{1-v^2} \varepsilon_H \quad (18)$$

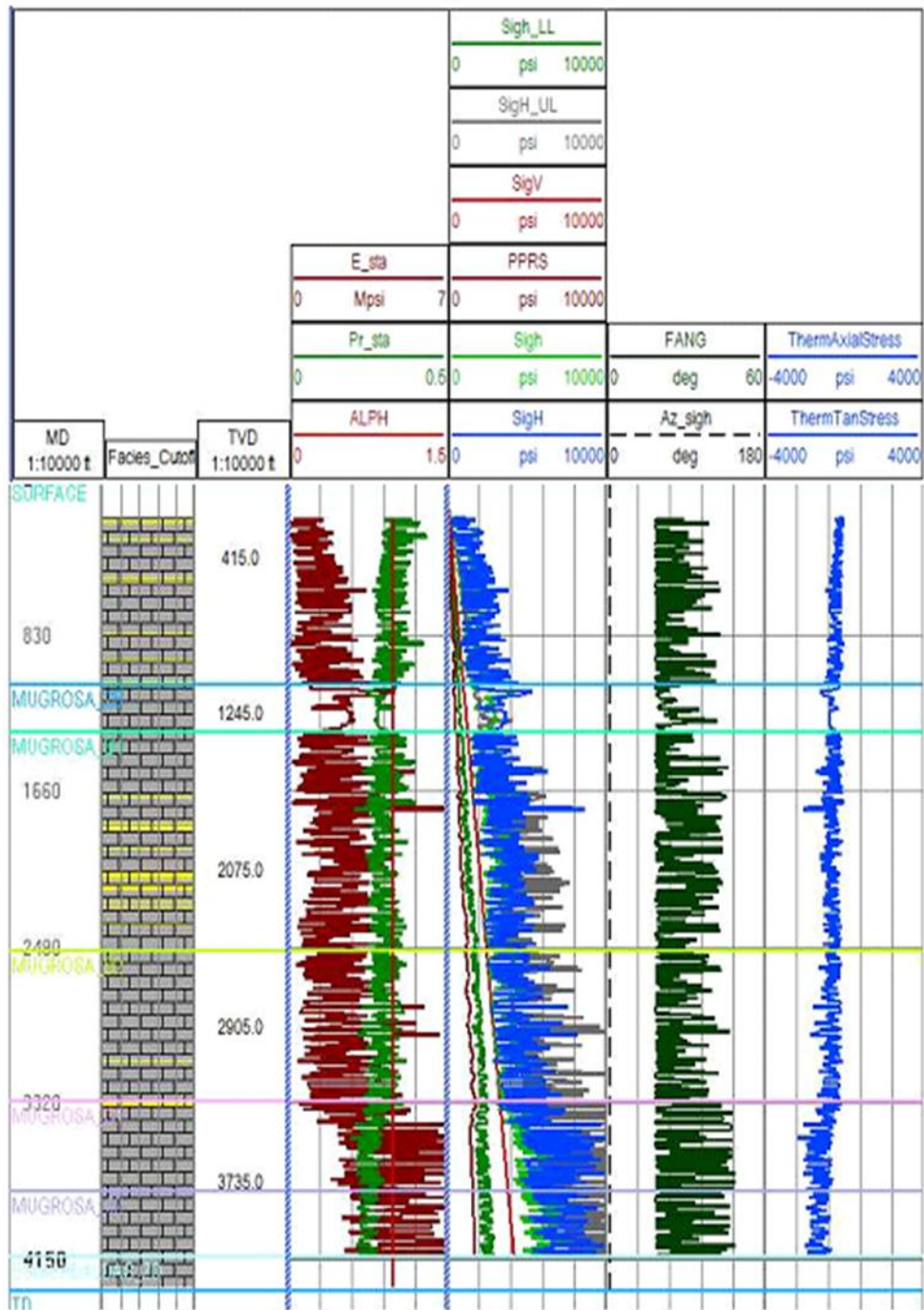
$$\sigma_H = \alpha P_p + \frac{v}{1-v} (\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-v^2} \varepsilon_H + \frac{E.v}{1-v^2} \varepsilon_h \quad (19)$$

Donde ε_x y ε_y son la deformación mínima horizontal y deformación máxima horizontal respectivamente. Estos valores permiten calibrar los esfuerzos horizontales en el modelo; para el campo se obtuvo valores de $0.5 \cdot 10^{-3}$ para la deformación mínima horizontal y $0.8 \cdot 10^{-3}$ para la deformación máxima horizontal, tomando como base los valores usados en proyectos desarrollados por Schlumberger en campos cercanos, y realizando una variación de los mismos,

como se mostrara en el capítulo 5, mediante un análisis de sensibilidad respecto a la magnitud de los esfuerzos y la trayectoria de perforación.

Una vez calculadas las magnitudes de los esfuerzos horizontales, y el esfuerzo de sobrecarga se puede determinar el régimen de esfuerzos en Campo Colorado, el cual corresponde normalmente a un régimen inverso, es decir $S_H > S_v$, lo cual es consistente con los perfiles sísmicos donde se observa que en el plano de falla existe un desplazamiento del techo hacia arriba.

Figura 56. Esfuerzos horizontales máximo y mínimo pozo Infill 5

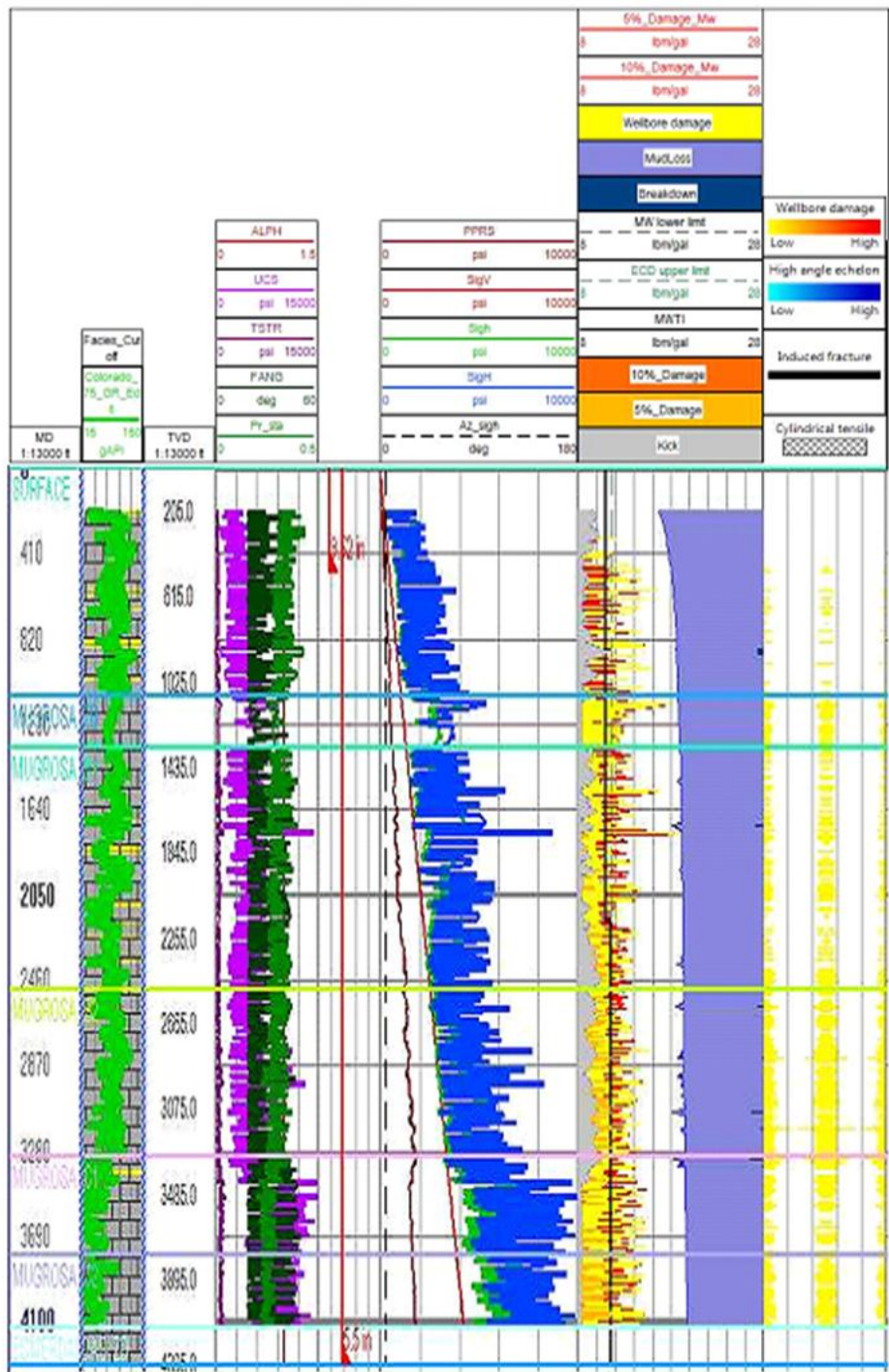


Fuente: Los autores

4.7 Análisis de estabilidad de pozo

El análisis de estabilidad del pozo se basa en las condiciones de falla que éste presenta de acuerdo con las propiedades de la roca en interacción con el campo de esfuerzos a que se encuentran sometidas. Como se muestra en la figura 57, esta define la estabilidad del pozo Infill 5, donde se consideran las condiciones bajo las cuales debe variar la densidad del lodo así, cuando el peso de lodo usado durante la perforación es muy bajo se presenta una condición de perforación cocida bajo balance (kicks), mientras que pesos de lodo muy altos pueden inducir fracturas en la roca (breakdown). La zona de los breakout y la zona de las pérdidas son condiciones menos severas, lo ideal es utilizar un peso de lodo que controle los breakout hasta el punto tal que permita una perforación más rápida y que evite la aparición de pérdidas de lodo.

Figura 57. Análisis de estabilidad del pozo Infill 5.



Fuente: Los autores

De acuerdo a la ventana de lodo obtenida, se puede observar que para el pozo Infill 5 se cuenta con una amplia zona segura de trabajo, con el fin de optimizar la rata de penetración se propone una curva de densidad de 11 ppg desde 0' a 2175' y de 11.5 ppg desde 2175' hasta la profundidad final, la cual corresponde a un colapso controlado. Los puntos críticos de la ventana, es decir donde se presenta una reducción significativa de la zona segura, se dan por un aumento de la probabilidad del colapso de las paredes del pozo, hecho que está asociado a la baja consolidación de las arenas productoras (Mugrosa).

Respecto al estado mecánico del Infill 5, al tratarse de pozos someros y considerando que no se han tenido problemas de colapso de casing en los pozos del campo, se propone un completamiento sencillo de 2 casing, un casing conductor de 9 5/8" con una profundidad de zapato a 507' y un segundo casing de 5 1/2 hasta la profundidad total del pozo.

El análisis de trayectoria de perforación se hará basado en los puntos críticos de la ventana, el cual se desarrolla de manera explícita en el capítulo 5 del libro mediante un análisis de sensibilidad de esfuerzos y trayectoria.

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En este capítulo se hace un análisis de sensibilidad a la trayectoria de perforación, el cual consiste en estudiar el efecto de la trayectoria del pozo en la ventana de lodo a una determinada profundidad, de manera que permita tomar decisiones respecto a la más óptima. Dicho análisis se basa en el estudio de los intervalos más críticos de la trayectoria, los cuales están determinados por tres criterios que son los puntos de mayor contraste de esfuerzos, las formaciones problemáticas en los pozos off set y las profundidades que presentan un daño mayor al 10% (colapso de las paredes del pozo). Este análisis se hace mediante el uso del software StoneFish® de Schlumberger.

Los esfuerzos in situ son los parámetros geomecánicos que mayor incidencia tienen en la determinación de la trayectoria de perforación ya que son los que determinan el régimen y el estado diferencial de esfuerzos al cual el lodo debe ajustarse, y de los cuales depende el comportamiento mecánico de las rocas. Hacer un análisis de sensibilidad de la trayectoria de perforación, implica entonces evaluar los escenarios más favorables y más críticos del azimuth, desviación de un pozo y densidad de lodo respecto a los esfuerzos horizontales y de sobrecarga.

Antes de realizar un análisis de sensibilidad de la trayectoria es necesario calibrar los esfuerzos horizontales máximo y mínimo mediante el ajuste de la variable, deformación máxima y mínima horizontal, como se puede observar en la ecuación de poroelasticidad. Para esto es necesario calibrar los esfuerzos horizontales ajustando las variables ε_x y ε_y . Se tomo como base 5 valores usados en proyectos desarrollados por Schlumberger en campos cercanos. Estos valores se presentan a continuación:

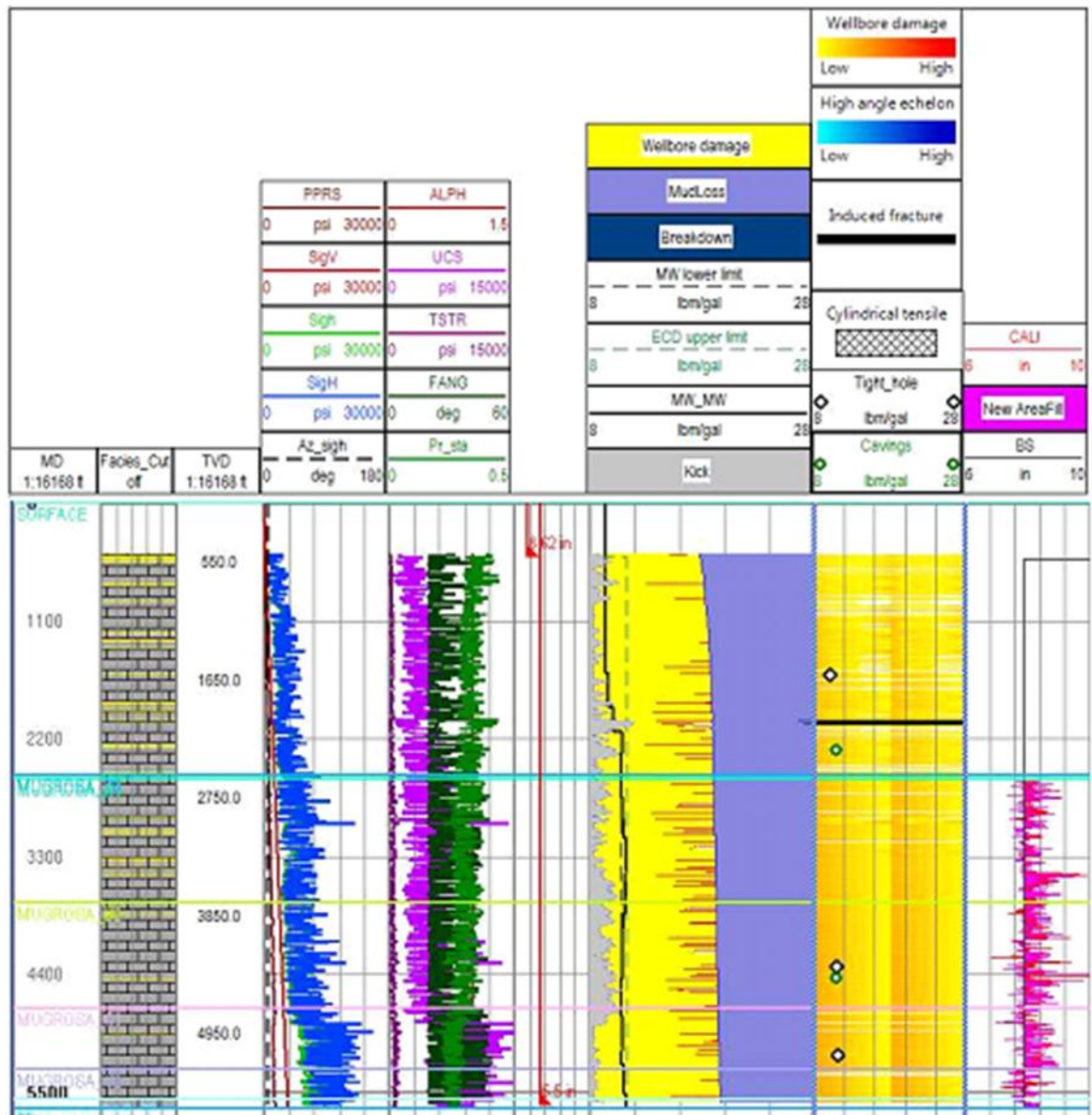
Tabla 22. Deformaciones máximas y mínimas

ϵ_x	ϵ_y
1.3	2.1
0.4	0.7
1	1.5
0.4	0.7
1	1.4

Fuente: Los autores

La variación de las deformaciones principales generan cambios en los esfuerzos y por lo tanto en el comportamiento de la ventana de lodo, la selección correcta de los valores de deformaciones está determinada por una adecuada representación entre el comportamiento de la ventana de lodo, los eventos de perforación y el registro Caliper a la profundidad adecuada, este ajuste debe realizarse para cada uno de los pozos off set, hasta encontrar los valores que se ajustan para todos los pozos. Las imágenes a continuación representa el flujo de trabajo mencionado anteriormente, tomando como ejemplo el pozo colorado 75

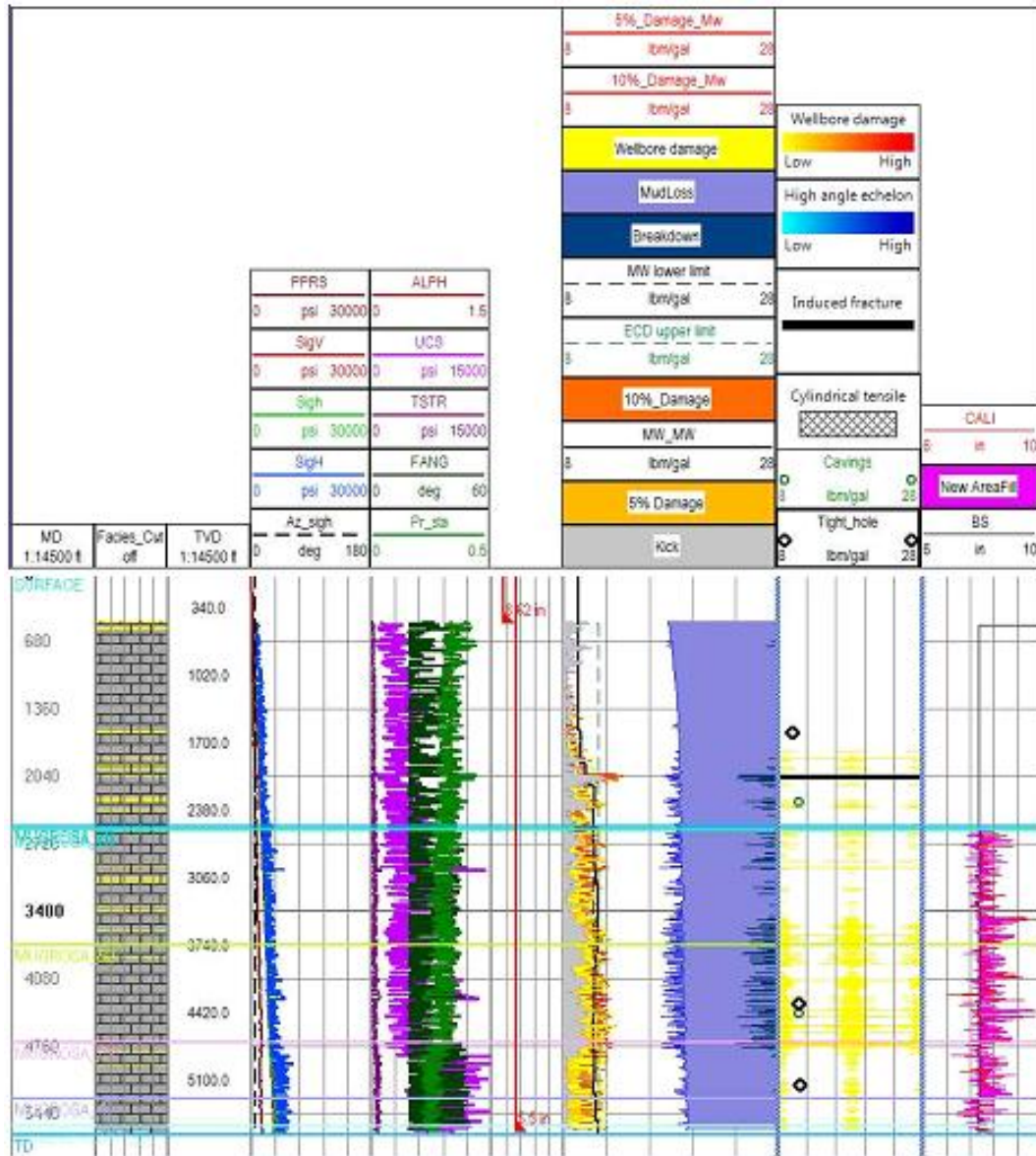
Figura 58. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 1.3$ y $\epsilon_y = 2.1$



Fuente: Los autores

Para esta combinación de valores, la ventana de lodo que se obtuvo no representa realmente los eventos sucedidos durante la perforación del pozo, debido al colapso excesivamente alto y que no modela el comportamiento de ninguno de los pozos off set.

Figura 59. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 0.4$ y $\epsilon_y = 0.7$

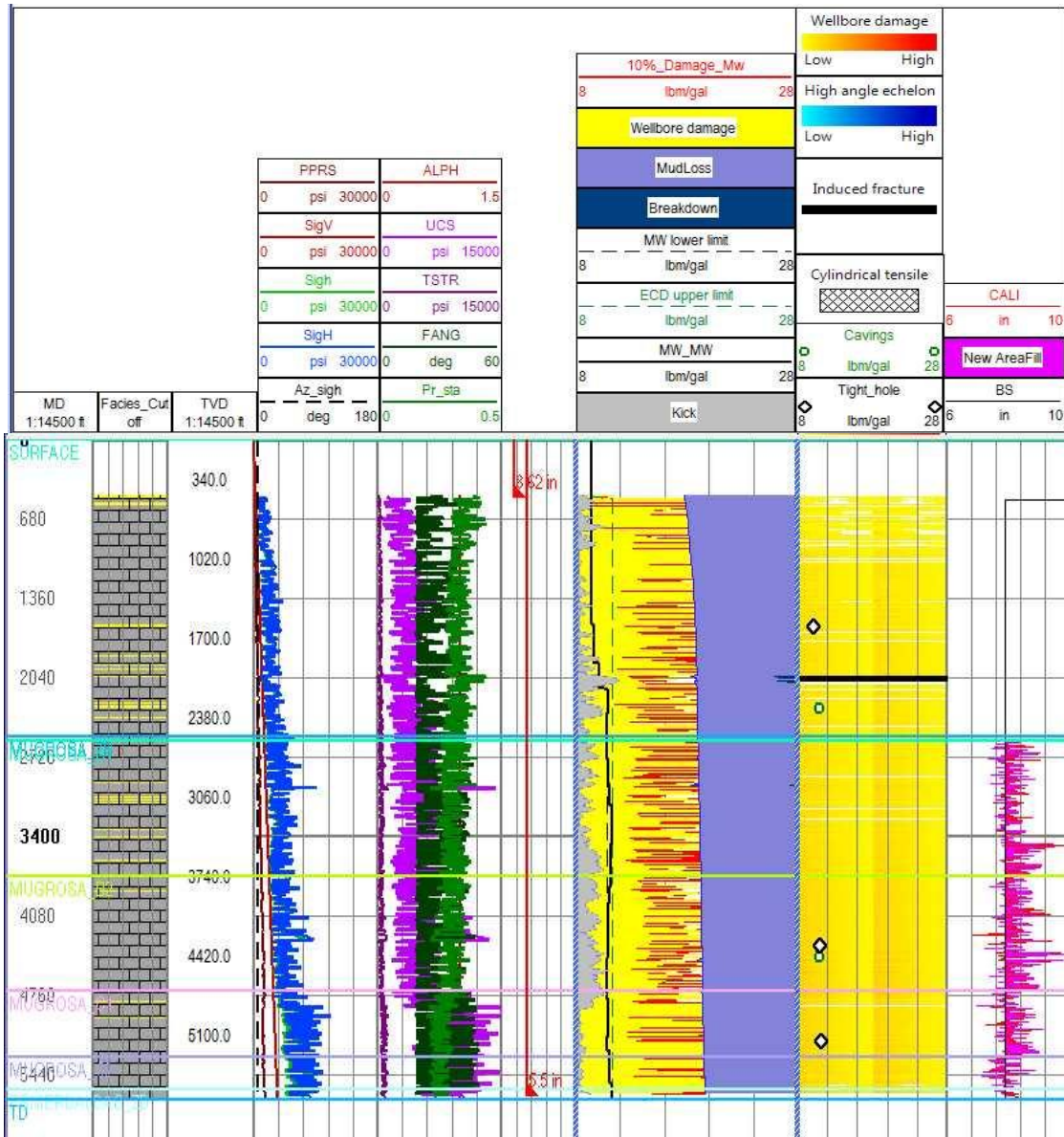


Fuente: Los autores

Esta combinación de deformaciones permite observar un diferencial de esfuerzos más representativo, ya que modela los eventos durante la perforación de acuerdo con la curva de lodo que fue usada en el pozo, por ejemplo los puntos de caving

se presentan a la misma profundidad cuando la densidad de lodo estaba en la región del colapso del 10%. Estos valores a pesar de ser representativo para este pozo, no representaron al resto de pozos off set.

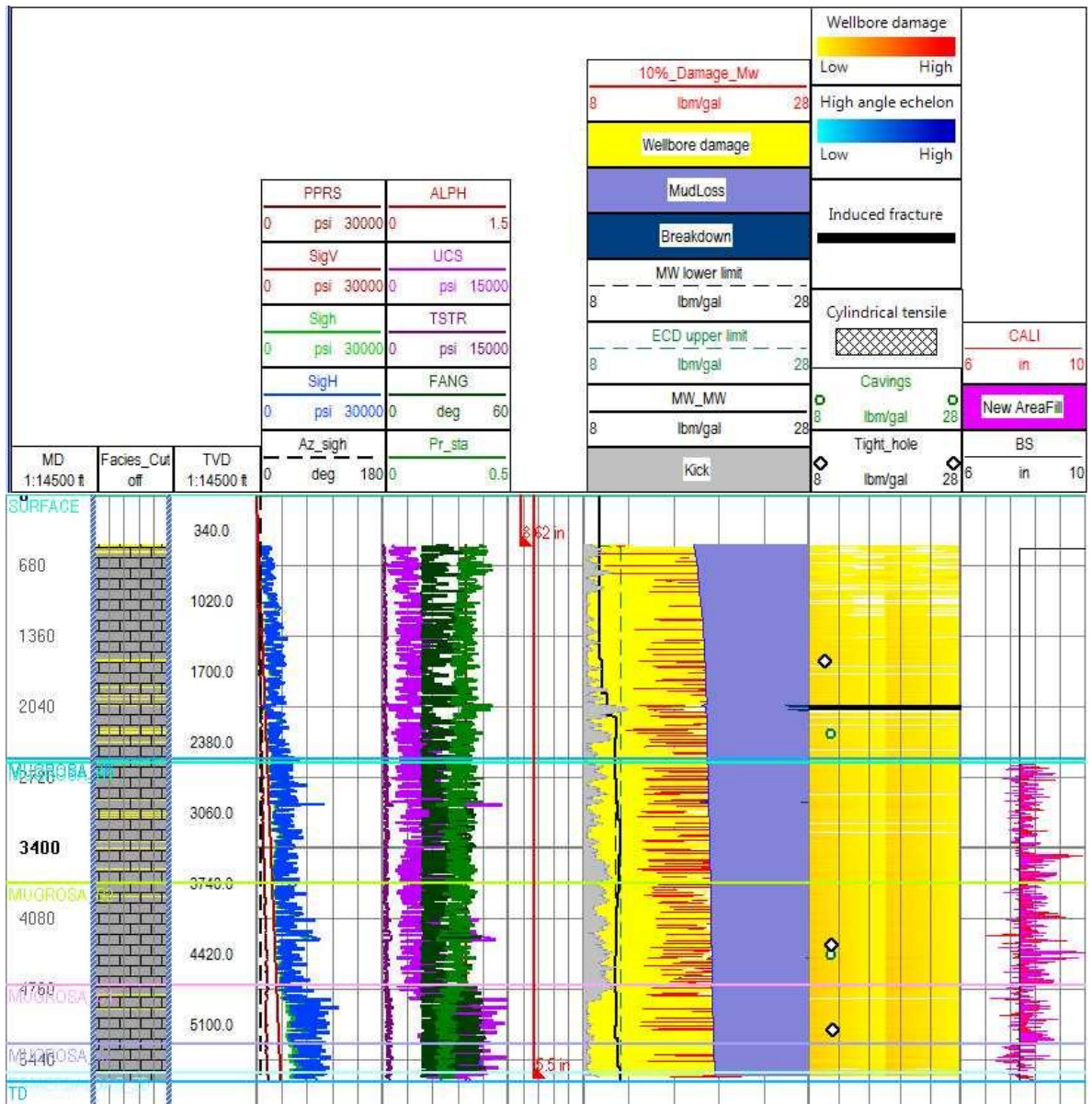
Figura 60. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 1$ y $\epsilon_y = 1.4$



Fuente: Los autores

Esta combinación de deformaciones, ocasionando que la ventana presente un colapso muy alto respecto al peso del lodo usado durante la perforación, y muestre eventos que no sucedieron durante dicha operación como influjos.

Figura 61. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 1$ y $\epsilon_y = 1.5$

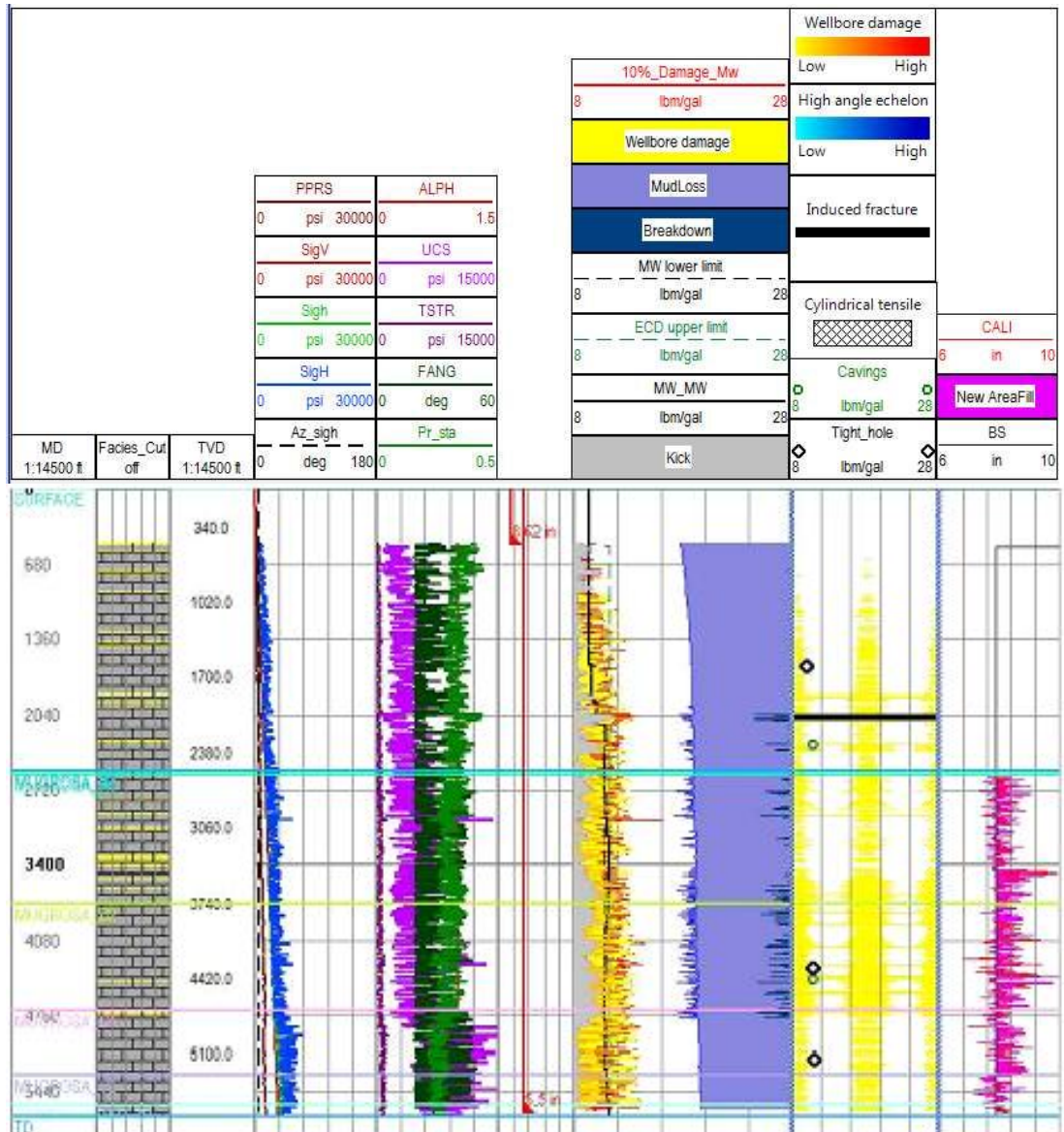


Fuente: Los autores

Como se observa en esta combinación de deformaciones el comportamiento es muy similar que para valores $\epsilon_x = 1$ y $\epsilon_y = 1.4$, por lo que se puede inferir la

relación directa entre las magnitudes de los esfuerzos y las magnitudes de las deformación, por lo tanto valores entre $\epsilon_x = 0.4$ y $\epsilon_y = 0.7$ y $\epsilon_x = 1$ y $\epsilon_y = 1.5$ representaran mejor el comportamiento de la ventana.

Figura 62. Modelo estabilidad pozo Colorado 75 con $\epsilon_x = 0.5$ y $\epsilon_y = 0.8$

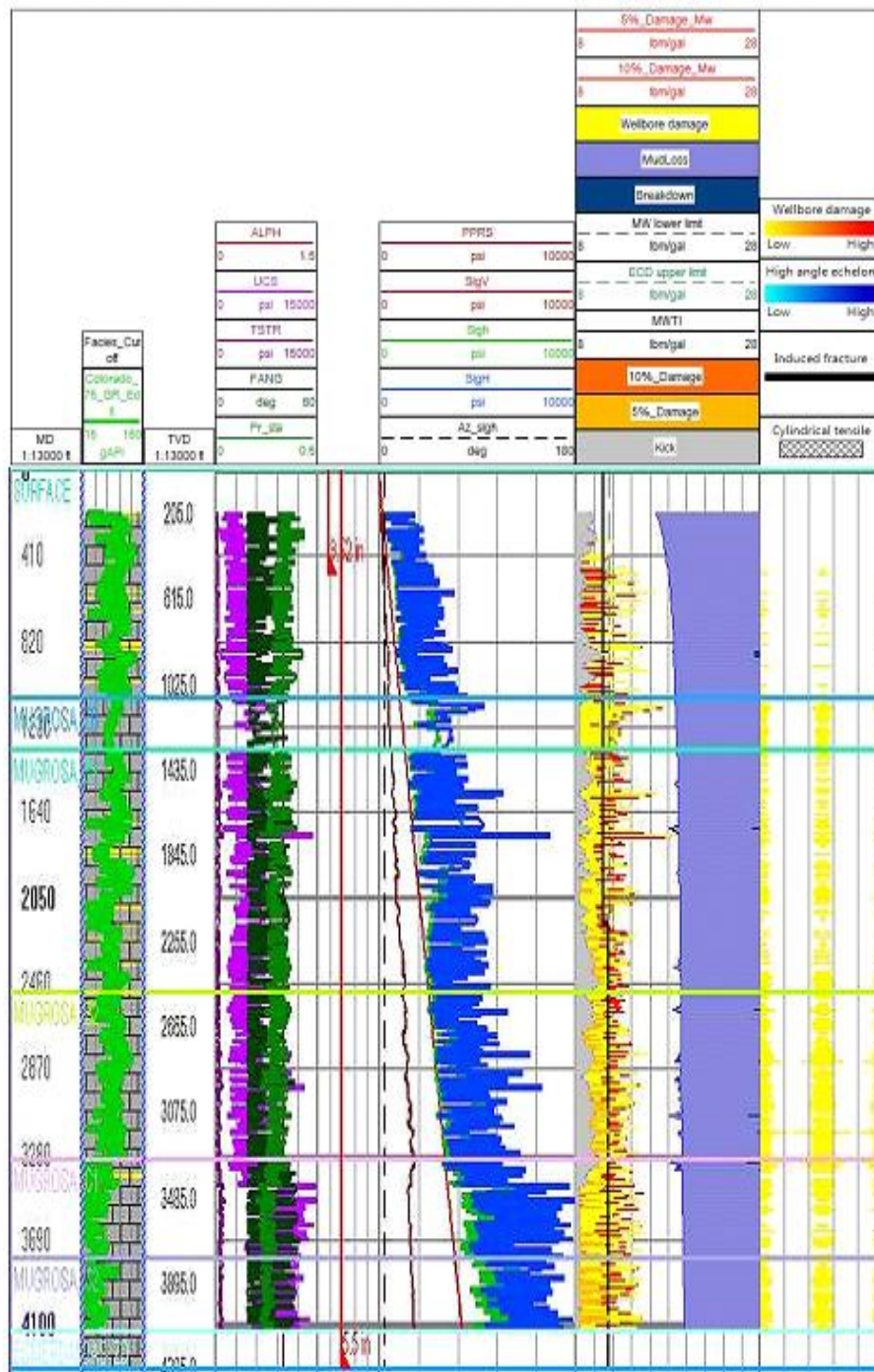


Fuente: Los autores

Finalmente los valores que se obtuvieron para Campo Colorado fueron una deformación mínima horizontal de $0.5 \cdot 10^{-3}$ y una deformación máxima horizontal de $0.8 \cdot 10^{-3}$. Se seleccionaron estos valores porque representan adecuadamente el comportamiento del registro Caliper y el colapso a lo largo de la trayectoria del pozo, también se pueden justificar los eventos como los puntos apretados y los cavings, para todos los pozos off set.

La figura 63 corresponde al análisis de estabilidad del pozo Infill 5, obtenido a partir de la calibración de los esfuerzos horizontales. Esta ventana de lodo permite identificar las profundidades críticas durante la perforación, a partir de los criterios mencionados al inicio de este capítulo, las cuales deben ser objeto de estudio para definir que posibles trayectorias permiten reducir el contraste de esfuerzos. Las profundidades seleccionadas fueron las siguientes: A 889' se observa que la curva de peso de lodo cae por debajo de la presión de poro, a 2306' se observa que durante la perforación del pozo Colorado 75 se presentó una pega, a 3511' ya que se presenta un alto diferencial entre los esfuerzos y finalmente 4042' también por un alto diferencial de esfuerzos alto y se observa un colapso mayor al 5%.

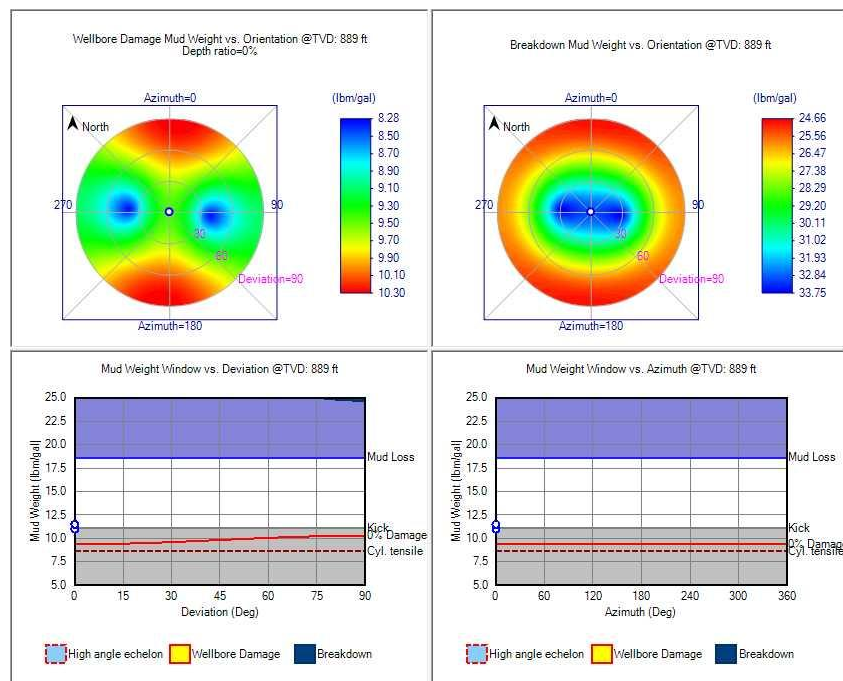
Figura 63. Modelo estabilidad pozo Infill 5 con $\epsilon_x = 0.5$ y $\epsilon_y = 0.8$



Fuente: Los autores

A continuación se explica el análisis de sensibilidad para la trayectoria de perforación del pozo Infill 5, este análisis se realiza a las 4 profundidades mencionadas. Los óvalos de sensibilidad que se obtienen a estas profundidades representan, la inclinación del pozo por círculos concéntricos que van desde 0° en el centro de la circunferencia hasta 90°, el azimut del pozo se define en el plano de la circunferencia por lo que pueden ser ubicados los esfuerzos horizontales máximo y mínimo. Los colores indican el peso del lodo crítico y el cual es la variable que determina el ángulo con que debe perforarse esa profundidad. El color azul indica la trayectoria óptima de perforación, es decir la mejor inclinación y azimut.

Figura 64. Análisis de sensibilidad breakout y breakdown @ 889'

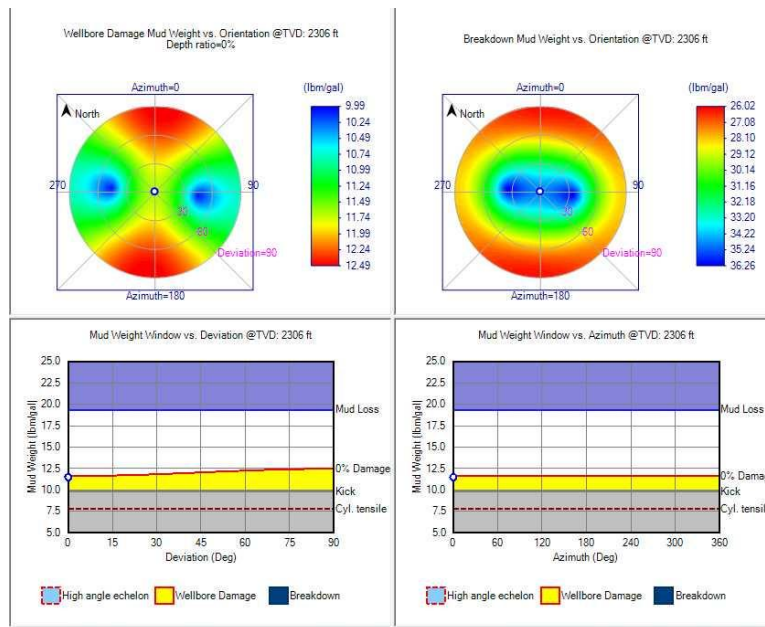


Fuente: Los autores

El comportamiento de la sensibilidad de la trayectoria del pozo respecto al breakout, se observa que el ángulo óptimo a esta profundidad se alcanza con una inclinación de 45° ya que es allí donde se presenta el peso de lodo más bajo

para que ocurra el breakout en este caso de 8.28 ppg, de esta manera se garantiza que un peso del lodo mayor a este valor es capaz de mantener las paredes del pozo y evita que este colapse, preferencialmente con un azimut de 90°. El análisis del ovalo del breakdown muestra que perforar con el mismo ángulo y con el mismo azimut se logra un breakdown de 29.20 ppg lo cual garantiza que no se va a fracturar la formación ni tener pérdidas de circulación fácilmente. El azimut mas critico para perforar es 0° ya que las tendencias de los óvalos tienden a cerrarse.

Figura 65. Análisis de sensibilidad breakout y breakdown @ 2306'



Fuente: Los autores

Como se observa en el ovalo para el análisis del breakout a 2306', no se recomienda perforar con un azimut de 0° ni con una desviación superior a 30°, ya que implica entrar en la zona de mayor colapso usando densidades menores a 12.49 ppg, lo cual es una densidad alta comparada con los valores usados en la perforación de los pozos off set. Respecto al breakdown la mejor inclinación y azimut para perforar es el mismo que se observo a 889'.

Figura 66. Análisis de sensibilidad breakout y breakdown @ 3511'

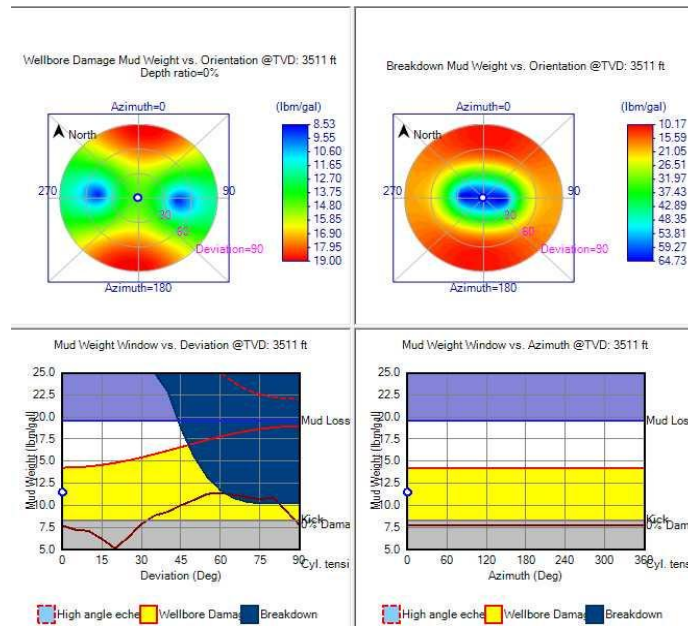
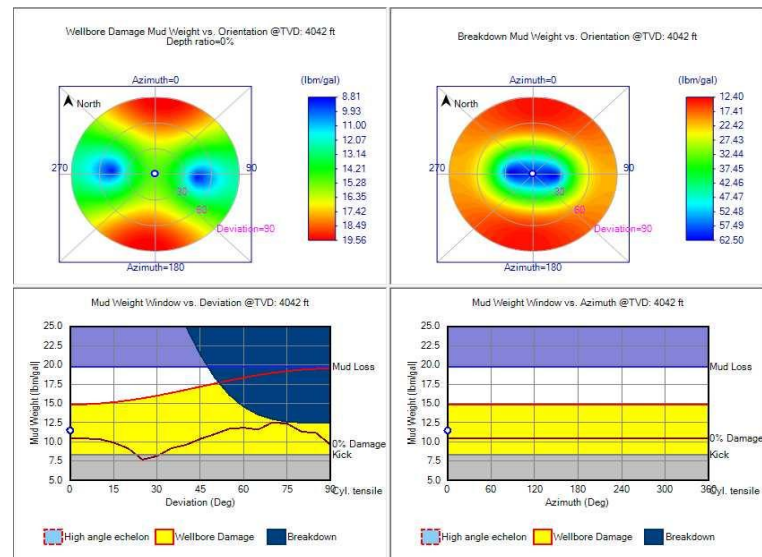


Figura 67. Análisis de sensibilidad breakout y breakdown @ 4020'



Fuente: Los autores

Para las dos últimas profundidades el comportamiento es similar al observado en las dos primeras profundidades, donde se puede identificar que el escenario más favorable para el breakout es perforar con una desviación de 45° y un azimut de

90°, para el breakdown la inclinación de la perforación no es muy sensible respecto al azimut pero si se logra una mayor densidad equivalente de fractura con el azimut de 90°. Este comportamiento es típico de un régimen inverso de esfuerzos, ya que el esfuerzo horizontal máximo es el mayor, y la tendencia de la perforación debería ir en la misma orientación de este.

Tabla 23. Survey del pozo Infill 5

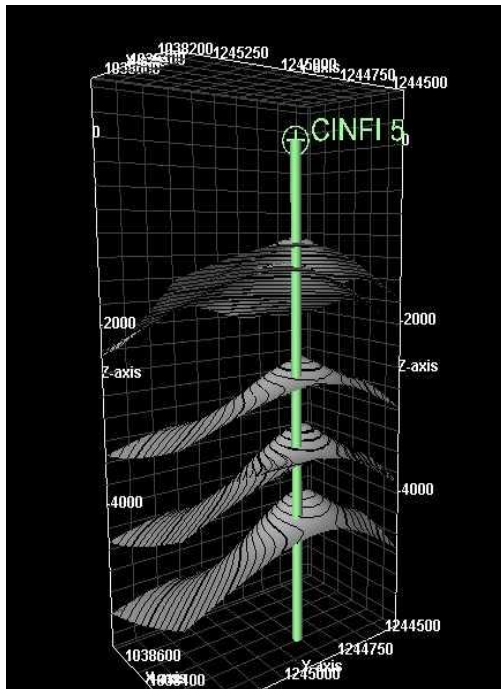
SURVEY POZO INFILL 5											
X	Y	Z	MD	INCL	AZIM(GN)	AZIM	DX	DY	DX(TN)	DY(TN)	TVD
1038307.68	1244806.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1038307.68	1244806.53	-889	889	0	0	0	0	0	0	0	889
1038307.68	1244806.53	-2306	2306	0	0	0	0	0	0	0	2306
1038307.68	1244806.53	-3511	3511	0	0	0	0	0	0	0	3511
1038307.68	1244806.53	-5656	5656	0	0	0	0	0	0	0	5656

Tabla 24. Survey del pozo Infill 5 desviado

SURVEY POZO INFILL 5											
X	Y	Z	MD	INCL	AZIM(GN)	AZIM	DX	DY	DX(TN)	DY(TN)	TVD
1038307.68	1244806.53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1038307.68	1244806.53	-889	889	0	0	0	0	0	0	0	889
1038307.69	1244806.52	-889.09	889.1	45	135	135	0.01	-0.01	0.01	-0.01	889.09
1038523.62	1244590.59	-1890.99	2306	45	135	135	215.94	-215.94	215.94	-215.94	1890.99
1038707.27	1244406.94	-2743.05	3511	45	135	135	399.59	-399.59	399.59	-399.59	2743.05
1039199.52	1243914.69	-5027.01	6741	45	135	135	891.84	-891.84	891.84	-891.84	5027.01

Fuente: Los autores

Figura 68. Trayectoria vertical del pozo Infill 5



Fuente: Los autores

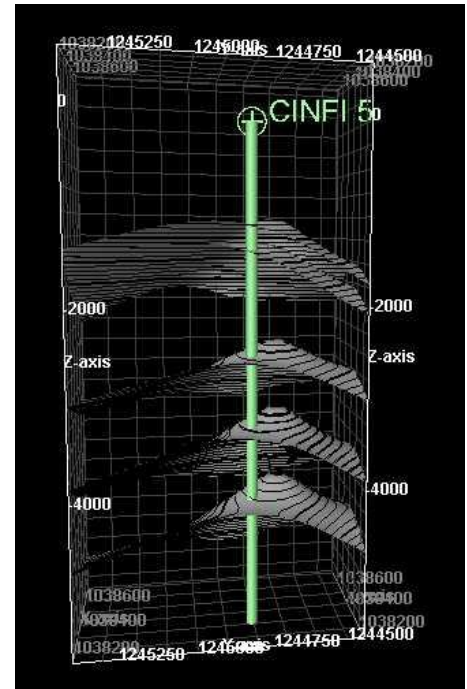
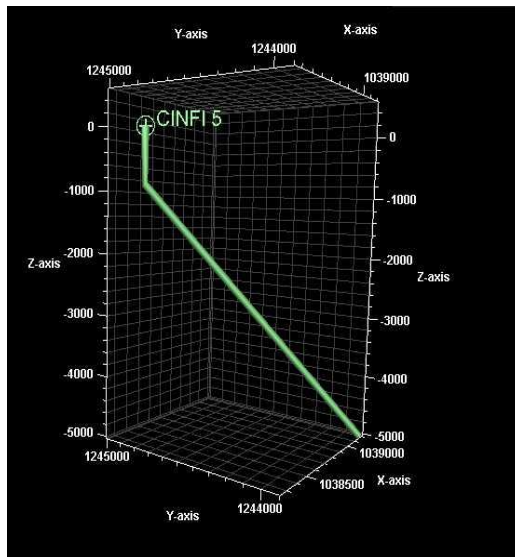
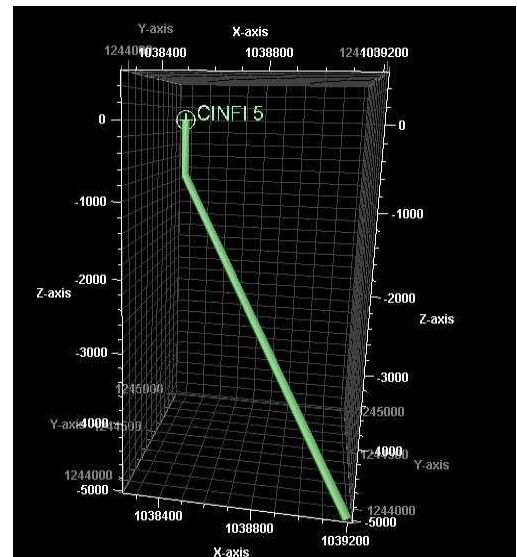


Figura 69. Trayectoria desviada del pozo Infill 5



Fuente: Los autores



Si bien teóricamente el régimen inverso que presenta Campo Escuela Colorado indica que perforar con una inclinación de 45° garantiza eliminar la componente del esfuerzo horizontal máximo y por lo tanto disminuir el contraste de esfuerzos y optimizar la perforación, los antecedentes del campo han demostrado que perforar verticalmente no ha generado grandes problemas de estabilidad del pozo, además de ser una alternativa mucho más económica. En el caso del análisis de sensibilidad para breakdown la mejor dirección es vertical como se puede observar en los óvalos de sensibilidad, para el breakout perforar verticalmente también es una opción viable ya que las densidades necesarias para evitar el colapso de las paredes están en el orden de 9 a 11 ppg. Es importante tener en cuenta que el diferencial de esfuerzos entre el esfuerzo vertical y el esfuerzo horizontal mínimo es mayor que el diferencial entre los esfuerzos horizontales, por lo tanto un análisis geomecánico permite concluir que la perforación vertical del pozo Infill 5 es viable ya que elimina el esfuerzo vertical y de esta manera también se elimina el mayor contraste de esfuerzos haciendo más estable la perforación.

CONCLUSIONES

- La metodología expuesta en la tesis permitió desarrollar de manera clara y explícita el flujo de trabajo necesario para la creación de un modelo geomecánico 1D de estabilidad de pozo, con el fin de definir la mejor curva de lodo, los puntos de casing y la trayectoria de perforación óptima basado en un análisis de esfuerzos.
- Un análisis detallado de los informes diarios de perforación de los pozos off set, permitió definir que el evento geomecánico de mayor frecuencia es el Tight Hole, el cual tuvo mayor incidencia en la formación productora (Mugrosa), por lo cual es importante resaltar la importancia de una buena circulación durante la perforación para garantizar una buena limpieza del pozo.
- La revisión de los eventos de perforación sucedidos en Campo Colorado permitió la construcción de un formato que describe los posibles eventos que se pueden presentar durante la perforación de futuros pozos, donde se especifica las formaciones de mayor ocurrencia del evento, así como la probabilidad, severidad, detección y las operaciones de campo más adecuadas para evitar el evento.
- Para la apropiada construcción de un modelo, se presenta una tabla de la información necesaria para este propósito, la cual está clasificada en información requerida, útil y adicional de acuerdo a su relevancia a la hora de crear un MEM, a fin de facilitar la selección de los pozos offset del modelo.

- Luego de la evaluación de la petrofísica entregada por el Campo Escuela Colorado se concluye que presenta valores inconsistentes de porosidad y volumen de shale, por lo cual fue necesario desarrollar una metodología para el cálculo de una nueva petrofísica.
- El modelado de la geomecánica del Campo Colorado y del análisis de estabilidad de pozo dio como resultado una densidad óptima para la perforación del pozo Infill 5, de 11.5 ppg con un ángulo de 45° en los puntos de mayor diferencial de esfuerzos, sin embargo perforar verticalmente es una alternativa más viable desde el punto de vista económico teniendo en cuenta que un análisis geomecánico demuestra que esta trayectoria es efectiva para garantizar la estabilidad del pozo.

RECOMENDACIONES

- Tomar registros GR, sónico dipolar y densidad, ya que la construcción del modelo sería más representativo, debido a que los perfiles se obtienen directamente de las mediciones en el pozo y no a partir de correlaciones que se encuentran calibradas para otros campos.
- Realizar pruebas LOT o XLOT para poder determinar el esfuerzo mínimo horizontal.
- Hacer una re-calibración de los topes de formación para el pozo Infill 5 con una sísmica 2D o 3D y con los informes de geología durante la perforación.
- Proponer un plan de ensayos para los núcleos existentes en Campo Escuela Colorado y de esta manera tener valores que permitan calibrar las propiedades de esfuerzo y deformación.
- Realizar pruebas de presión en las formaciones productoras, por ejemplo una DST para obtener valores reales de presión de poro y calibrar las correlaciones con las que se calculó.
- Actualizar el modelo en tiempo real, mientras se lleva a cabo la perforación.
- Utilizar un material puenteante o bombear una píldora controladora de pérdidas, cuando se estén perforando las arenas de Mugrosa para evitar las pérdidas de circulación debido a la poca consolidación de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

1. AKBAR ALI, A., et al, "Observación del cambio de las rocas: modelo mecánico del subsuelo", Oilfield Review, Schlumberger, Otoño de 2003, pag. 22-41.
2. BENDECK J., Perfiles Eléctricos, Una Herramienta para la Evaluación de Yacimientos. Santa Fe de Bogotá, 1992.
3. BISBÉ YORK E. curso básico de evaluación de formaciones para operadores de perforación y producción.
4. CASTILLO D. A. and D. MOOS, Reservoir Geomechanics Applied to drilling and completion programs in challenging formations: North West Shelf, Timor Sea, North Sea and Colombia, APPEA Journal 2000.
5. COOK, J., et al, "Las rocas importan: Realidades de la geomecánica", Oilfield Review, Schlumberger, Invierno 2007/2008, pag. 38-59.
6. DUQUE, C, Informe Geológico final Campo Colorado, 2003.
7. FJÆR E., HOLT M., HORSRUD P., RAAEN I., RISNES R., "Petroleum related rock mechanics", Elsevier Science Publishers, Second edition, 2008.
8. GONZALES, M., GÓMEZ, M., Reevaluación de las presiones de formación y fractura a partir de registros en el campo Colorado.
9. Jaeger J, COOK N., ZIMMERMAN R., "Fundamentals of rock mechanics", Blackwell Publisher, Fourth Edition, 2007.
10. PABÓN GÉLVEZ E., OBEID MÉNDEZ Y. Análisis de la geomecánica aplicada a la estabilidad de pozos de los campos cusiana y cupiagua mediante analogías con yacimientos sensibles a esfuerzos.

11. PADILLA REYES J., BADRAN LIZARAZ N. Trabajo de grado “desarrollo de una metodología general para el cálculo de esfuerzos in-situ en formaciones productoras de hidrocarburos”
12. SÁNCHEZ M. A.. Curso:”Introducción a la Geomecánica Petrolera”. Pág.1-9. 1997.
13. SANTA CRUZ PASTOR, J., “Fundamentos de mecánica de rocas ”, Schlumberger, 2007
14. SANTA CRUZ PASTOR, J., “Fallas en rocas”, Schlumberger, 2007
15. SANTA CRUZ PASTOR, J., “Estabilidad del agujero”, Schlumberger, 2007
16. SCHLUMBERGER. Principios / Aplicaciones de la Interpretación de Registros, 1989.