

EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE FRACTURAS EN ESTADO CRÍTICO DE
ESFUERZOS CON LAS PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN UN POZO DE
ECOPETROL S.A.

DIEGO ALEJANDRO BONILLA GÓMEZ
FABIÁN EDUARDO PÉREZ CORREDOR

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2017

EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE FRACTURAS EN ESTADO CRÍTICO DE
ESFUERZOS CON LAS PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN EN UN POZO DE
ECOPETROL S.A.

DIEGO ALEJANDRO BONILLA GÓMEZ
FABIÁN EDUARDO PÉREZ CORREDOR

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
CARLOS ALBERTO ESPINOSA MORA
Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2017

Nota de Aceptación (Dirección de investigaciones)

Firma Docente Investigador

Firma Docente Jurado 1

Firma Docente Jurado 2

Bogotá D.C., Marzo de 2017

DIRECTIVAS FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Investigaciones.

Ing. ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS

Director (E) Programa Ingeniería de Petróleos

Geólogo. EDGAR CEDEÑO LIGARRETO

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Al Convenio Institucional No. 5211562 ICP-FUA por facilitarnos el desarrollo del proyecto.

A la Dirección de Investigaciones por permitir el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Jefferson Mateus Tarazona por su compromiso y entrega en éste trabajo.

A la MSc Eliana Mesa por su apoyo y compromiso constante con el trabajo.

Al Ingeniero Carlos Espinosa por su colaboración todo el tiempo.

A María del Pilar Guevara y Mauricio Casanova, quienes nos colaboraron en el camino con el desarrollo del trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres, quienes han hecho todo lo posible
y hasta lo imposible para que yo esté aquí.

Hermana, te amo.

Diego Alejandro Bonilla Gómez

A Dios y a mi familia por ser la base y las columnas de mi formación: mis padres que fueron quienes siempre me apoyaron, fueron comprensivos ante las dificultades que se presentaron y me ayudaron a afrontarlas de la mejor manera, mi hermano que a pesar de que no estemos siempre de acuerdo siempre estuvo presente, mi abuela quien siempre estuvo pendiente de mi ayudando en todo y en general a toda mi familia quienes son parte importante de mi vida.

A mis amigos, ellos fueron, son y serán personas a quienes acudir para dejar un poco de lado el estrés, para relajarme y disfrutar de la vida fuera de responsabilidades.

A mi segunda familia, con quienes viví gran parte del tiempo que estuve en la universidad, ellos me brindaron un hogar cómodo gracias al cual no me sentí forastero en una ciudad diferente.

Por último, a mis profesores, a los buenos profesores, los que realmente dejaron una marca y ayudaron en mi formación académica y como persona, ellos lograron hacer que sintiera pasión por mi carrera y que ahora que sigue mi vida profesional piense en algún momento retribuirle a la universidad todo lo aprendido de la misma forma en que ellos lo hicieron. Entre ellos una mención especial al ingeniero Jefferson Mateus quien a pesar de no ser docente de la universidad, fue quien nos orientó para sacar adelante este proyecto.

Fabián Eduardo Pérez Corredor

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	25
1. GENERALIDADES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES	26
1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	26
1.2 GEOLOGÍA DE LA CUENCA	27
1.2.1 Formación Une.	27
1.2.2 Formación Gachetá.	27
1.2.3 Formación Guadalupe.	28
1.2.4 Formaciones Barco y Los Cuervos.	28
1.2.5 Formación Mirador.	28
1.2.6 Formación Carbonera.	28
1.2.7 Formación León.	31
1.2.8 Formación Guayabo.	31
1.3 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO	31
1.3.1 Roca Generadora.	31
1.3.2 Migración.	31
1.3.3 Roca Reservorio.	32
1.3.4 Roca Sello.	32
1.3.5 Trampas.	32
1.4 PRODUCCIÓN DE LA CUENCA	32
2. MARCO TEÓRICO	33
2.1 PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN	33
2.1.1 Clasificación de las pérdidas de circulación.	34
2.1.1 Consecuencias de las pérdidas de circulación.	34
2.2 GEOMECÁNICA	35
2.2.1 Geomecánica aplicada a yacimientos.	36
2.2.2 Esfuerzo.	37
2.2.3 Esfuerzos principales.	41
2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS	43
2.3.1 Módulos elásticos.	43
2.3.2 Resistencia a la compresión no confinada (UCS).	48
2.3.3 Ángulo o Coeficiente de Fricción Interna (μ_i).	49
2.3.4 Cohesión (S_o).	50
2.3.5 Resistencia a la tensión.	51
2.4 DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES	51
2.4.1 Determinación del esfuerzo vertical.	51
2.4.2 Determinación del esfuerzo horizontal mínimo.	52

2.4.3 Determinación del esfuerzo horizontal máximo.	52
2.4.4 Esfuerzos en el Wellbore.	53
2.5 REGÍMENES DE ESFUERZOS.	55
2.6 LÍMITES SOBRE EL ESFUERZO DE LOS VALORES DE ESFUERZOS	56
2.7 PRESIÓN DE PORO	58
2.7.1 Determinación de la Presión de Poro.	59
2.7.2 Concepto de esfuerzo efectivo (σ).	61
2.8 DIAGRAMA DE MOHR-COULOMB	62
2.8.1 Círculo de Mohr	62
2.8.2 Círculos de Mohr en 3D.	64
2.9 DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS NORMAL Y DE CORTE SOBRE EL PLANO DE FRACTURA	65
2.9.1 Determinación del Vector normal al plano de fractura.	65
2.9.2 Determinación de los Valores de Esfuerzos en el Plano de Fractura.	67
2.10 FRACTURAS CRÍTICAMENTE ESFORZADAS	68
2.10.1 Criterio de fracturas críticamente esforzadas.	68
2.10.2 Envoltente de Falla.	68
2.10.3 Evaluación del Criterio.	69
2.10.4 Consideración de Margen de Presión.	69
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	70
3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL POZO DE ESTUDIO	70
3.2 VARIABLES	71
3.2.1 Variable Independiente.	71
3.2.2 Variable dependiente.	72
3.3 HIPÓTESIS.	72
3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS	72
3.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	72
3.6 INTERPRETACIÓN DE DATOS	73
4. CONSTRUCCIÓN Y AJUSTE DEL MODELO GEOMECÁNICO	74
4.1 REVISIÓN DE EVENTOS OPERACIONALES	75
4.2 ORIENTACIÓN DEL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO	77
4.3 OVERBURDEN (ESFUERZO DE SOBRECARGA)	82
4.4 REGISTROS SÓNICOS SINTÉTICOS	85
4.4.1 Registro sísmico sintético a partir de porosidad.	85
4.4.2 Registro sísmico sintético a partir de resistividad.	86
4.5 MODELAMIENTO DE PRESIÓN DE PORO	88
4.6 ESFUERZO HORIZONTAL MÍNIMO	91
4.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ROCA	94
4.7.1 Módulos elásticos.	94
4.7.2 Esfuerzo horizontal máximo.	103
4.8 RESULTADO GENERAL DEL MODELO	110

5. PROGRAMACIÓN CÍRCULOS DE MOHR Y CRITERIO DE MOHR COULOMB	111
5.1 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS SOBRE EL PLANO DE FRACTURA	111
5.2 CONSTRUCCIÓN DE CÍRCULOS DE MOHR Y ENVOLVENTE DE FALLA.	114
5.3 INTEGRACIÓN DE ESFUERZO NORMAL Y DE CORTE, CIRCULOS DE MOHR Y ENVOLVENTE DE FALLA	117
6. EVALUACIÓN DE RELACIÓN DE FRACTURAS CRÍTICAMENTE ESFORZADAS CON LAS PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN	120
7. CONCLUSIONES	135
8. RECOMENDACIONES	136
BIBLIOGRAFÍA	137
ANEXOS	140

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación de la Cuenca de los Llanos Orientales.	27
Figura 2. Columna Generalizada De La Cuenca.	30
Figura 3. Mecanismos que generan pérdidas de circulación.	35
Figura 4. Componentes de un modelo geomecánico.	37
Figura 5. Elemento Infinitesimal de un Cuerpo.	38
Figura 6. Tensor de esfuerzos en orientación arbitraria.	39
Figura 7. Definición del Tensor de Esfuerzos.	40
Figura 8. Esfuerzos principales que actúan sobre las rocas.	42
Figura 9. Relación entre esfuerzo y deformación, en un caso de deformación idealizada.	44
Figura 10. Prueba de <i>Leak Off Test</i> Extendido.	53
Figura 11. Redistribución de Esfuerzos en el Wellbore.	54
Figura 12. Esfuerzos en la cara del pozo.	54
Figura 13. Regímenes de Esfuerzos.	56
Figura 14. Construcción del polígono de esfuerzos.	58
Figura 15. Esfuerzos principales sobre un cuerpo.	63
Figura 16. Círculo de Mohr para el Caso 45°.	64
Figura 17. Círculos de Mohr-Coulomb en 3D.	65
Figura 18. Diagrama de Mohr-Coulomb en 3D normalizado.	69
Figura 19. Etapas Del Proyecto.	70
Figura 20. Esquema de construcción modelo geomecánico parte 1.	74
Figura 21. Esquema de construcción modelo geomecánico parte 2.	75
Figura 22. Eventos Operacionales Pozo.	76
Figura 23. Eventos Operacionales de Pérdidas de Circulación.	76
Figura 24. Orientación de Fracturas Inducidas y Breakouts Respecto a los Esfuerzos Horizontales.	78
Figura 25. Comportamiento del calíper con deformaciones del hueco.	78
Figura 26. Disposición de los pads de la herramienta.	79
Figura 27. Encabezado de Registros.	80
Figura 28. Ubicación del Pad 2 Respecto a los Esfuerzos Horizontales.	81
Figura 29. Programación del Vector Normal Unitario Componente X.	112
Figura 30. Programación del Vector Normal Unitario Componente Y.	112
Figura 31. Programación del Vector Normal Unitario Componente Z.	112
Figura 32. Determinación de las Componentes del Vector de Tracción Sobre el Plano de Fractura.	113
Figura 33. Determinación del Esfuerzo Normal Mediante el Producto Punto.	113
Figura 34. Construcción de Círculos de Mohr.	115
Figura 35. Diagrama con Círculos de Mohr.	115
Figura 36. Programación Envolvente de Falla.	116
Figura 37. Círculos de Mohr con Envolvente de Falla.	116
Figura 38. Gráfica de un Punto Correspondiente a una Fractura.	117

Figura 39. Interfaz de Entrada Modelo.	118
Figura 40. Validación de la Programación del Criterio.	119

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Producción (en barriles por día) de los campos de la Cuenca de los Llanos Orientales.	32
Tabla 2. Tipos de pérdida de circulación según la tasa de pérdida.	34
Tabla 3. Tipo de pérdida de circulación según volumen perdido/tiempo de tratamiento.	34
Tabla 4. Relación entre los módulos elásticos en un cuerpo isotrópico.	45
Tabla 5. Relaciones empíricas entre UCS y otras propiedades físicas de las areniscas.	48
Tabla 6. Relaciones empíricas entre UCS y otras propiedades físicas de las arcillas.	49
Tabla 7. Ecuaciones para determinar ángulo de fricción interna en función de la litología.	50
Tabla 8. Valores de Cutoff para Sónico Sintético.	88
Tabla 9. Relación entre V_p y V_s , en función del Gamma Ray en cualquier litología.	96
Tabla 10. Resultados de esfuerzos horizontal máximo a partir del polígono de esfuerzos y esfuerzo horizontal mínimo.	108
Tabla 11. Identificación de Fracturas.	120
Tabla 12. Valores de Entrada Criterio.	122
Tabla 13. Datos de Fractura y Grupo.	122
Tabla 14. Comparación de esfuerzo normal y de corte con la presión de poro.	129
Tabla 15. Gradiente de reactivación de fracturas.	133

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Cáliper y orientación del Pad 1.	80
Gráfica 2. Histograma Orientación Esfuerzo Horizontal Máximo (Pad 2).	82
Gráfica 3. Datos de densidad y NCTL a lo largo de todo el pozo de estudio.	84
Gráfica 4. Esfuerzo de Sobrecarga en el pozo de estudio.	84
Gráfica 5. Registros Sónicos Sintéticos.	88
Gráfica 6. Ajuste Exponente Eaton para el Pozo de Estudio.	90
Gráfica 7. Presión de Poro en el pozo de estudio.	91
Gráfica 8. Curvas Posibles Esfuerzo Horizontal Mínimo en el pozo de estudio.	92
Gráfica 9. Curva de Esfuerzo Horizontal Mínimo seleccionada en el pozo de estudio.	93
Gráfica 10. Sónico sintético ajustado a la línea de compactación.	95
Gráfica 11. Relación de Poisson.	96
Gráfica 12. Módulo de corte.	97
Gráfica 13. Módulos de Young, Bulk y Parámetro de Lamé.	98
Gráfica 14. Módulo de Young estático por los diferentes métodos.	99
Gráfica 15. Módulo de Young estático (Bradford et al. 1998).	100
Gráfica 16. UCS determinada por diferentes métodos.	101
Gráfica 17. UCS determinada por los métodos seleccionados.	102
Gráfica 18. Histograma de los datos de UCS para el Breakout 1.	104
Gráfica 19. Histograma de los datos de Shmin para el Breakout 1.	104
Gráfica 20. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 1.	105
Gráfica 21. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 2.	106
Gráfica 22. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 3.	106
Gráfica 23. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 4.	107
Gráfica 24. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 5.	107
Gráfica 25. Esfuerzo horizontal máximo a partir de las ecuaciones de Kirsch.	109
Gráfica 26. Magnitudes de Esfuerzos.	110
Gráfica 27. Grupos de fracturas.	121
Gráfica 28. Evaluación del Criterio de Falla en Zonas Sin Pérdidas de Circulación.	125
Gráfica 29. Evaluación Del Criterio de Falla en Zonas Con Pérdidas de Circulación.	126
Gráfica 30. Evaluación Del Criterio de Falla en Zonas Sin Pérdidas de Circulación.	127
Gráfica 31. Evaluación Del Criterio de Falla en Zonas Con Pérdidas de Circulación.	128

Gráfica 32. Diagramas de Mohr para Gradientes de Reactivación de Fracturas Grupo 1 al 6.	132
Gráfica 33. Diagramas de Mohr para Gradientes de Reactivación de Fracturas Grupo 7 al 10.	133
Gráfica 34. Densidad del fluido de perforación para que ocurra reactivación de fracturas naturales.	134

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Comportamiento de esfuerzos generales en la Tierra.	39
Ecuación 2. Teorema de Pitágoras para la Descomposición de esfuerzos.	40
Ecuación 3. Simplificación del Tensor de Esfuerzos a Planos Principales.	42
Ecuación 4. Velocidad compresional a partir de módulos elásticos.	46
Ecuación 5. Velocidad de corte a partir de módulos elásticos.	46
Ecuación 6. Relación de Poisson en función de V_p y V_s .	46
Ecuación 7. Módulo de Young estático (Bradford et al. 1998).	47
Ecuación 8. Módulo de Young estático (Wang -2000-).	47
Ecuación 9. Módulo de Young estático (Canady -2011-).	47
Ecuación 10. Relación entre Cohesión y UCS.	50
Ecuación 11. Definición Matemática del Esfuerzo de Sobrecarga.	51
Ecuación 12. Esfuerzo radial en el pozo.	55
Ecuación 13. Esfuerzo tangencial en el pozo.	55
Ecuación 14. Esfuerzo axial en el pozo.	55
Ecuación 15. Limite friccional para el régimen normal	57
Ecuación 16. Limite friccional para el régimen rumbo-deslizante	57
Ecuación 17. Limite friccional para el régimen inverso	57
Ecuación 18. Presión de Poro Mediante Ecuación de Eaton.	59
Ecuación 19. Ecuación de presión hidrostática para el método de Eaton.	60
Ecuación 20. Presión de poro mediante ecuación de Eaton-Resistividad.	60
Ecuación 21. Tendencia de Resistividad.	61
Ecuación 22. Esfuerzo Efectivo.	61
Ecuación 23. Esfuerzo efectivo normal en el círculo de Mohr.	63
Ecuación 24. Esfuerzo de corte en el círculo de Mohr.	63
Ecuación 25. Determinación Vector Unitario Normal al Plano de Fractura.	66
Ecuación 26. Vector de tracción sobre el plano de fractura.	66
Ecuación 27. Forma Matricial del Vector de Tracción Sobre el Plano de Fractura.	67
Ecuación 28. Determinación de la Magnitud del Esfuerzo Normal Sobre el Plano de Fractura.	67
Ecuación 29. Determinación de la Magnitud del Esfuerzo de Corte Sobre el Plano de Fractura.	67
Ecuación 30. Envolvente de Falla.	68
Ecuación 31. Ecuación de Gardner.	83
Ecuación 32. Porosidad a partir del Registro Sónico.	85
Ecuación 33. Tiempo de Transito a partir de Porosidad.	86
Ecuación 34. Velocidad Compresional Faust.	86
Ecuación 35. Tiempo de Transito Faust.	87
Ecuación 36. Tiempo de Transito Smith.	87
Ecuación 37. Ecuación de Eaton Ajustada para presión de poro.	89

Ecuación 38. Hubbert & Willies para esfuerzo horizontal mínimo para Esfuerzo Horizontal Mínimo.	94
Ecuación 39. Ecuación de Zoback para esfuerzo horizontal mínimo para Esfuerzo Horizontal Mínimo.	94
Ecuación 41. Determinación del esfuerzo horizontal máximo a partir del tamaño del breakout.	103
Ecuación 42. Ecuación de la Circunferencia Despejada para eje Y.	114

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Ecuaciones y demostración del círculo de Mohr.	142

LISTA DE ABREVIATURAS

Bbl: Barriles

ECD: Densidad equivalente de circulación.

ft: Pies (unidad de longitud), por sus siglas en Inglés.

HSP: Presión hidrostática. (Hydrostatic pressure) por sus siglas en Inglés.

MD: (Measured Depth) Profundidad Medida.

MDT: Probador de formación modular dinámico por sus siglas en inglés (modular formation dynamic tester). Hace referencia a la presión de poro tomada en yacimiento mediante dicha herramienta.

MW: (Mud Weight) Peso del Lodo.

NCTL: Hace referencia a los tiempos de transito normales para el registro sísmico compresional; o línea de tendencia para todo el pozo.

NPT: Tiempo no Planeado

OBG: Gradiente de Sobrecarga o Overburden Gradient por sus siglas en inglés.

P1Az: Es el azimut que tiene el brazo número uno de una herramienta.

Pp: Presión de poro, por sus siglas en inglés.

PPG: (Pounds per Galon) Libras por galon.

TVD: (True Vertical Deep) Profundidad Vertical Verdadera.

GLOSARIO

ARCILLA (SHALE): roca sedimentaria de grano fino y prácticamente impermeable, está compuesta principalmente por arcilla y limo, es decir, con tamaño de grano menor a 0,0039 mm. Es la roca sedimentaria más abundante. Las arcillas suelen incluir grandes cantidades de materia orgánica en comparación con otras rocas sedimentarias, por lo tanto tienden a ser rocas generadoras. Además debido a su bajísima permeabilidad, suelen ser rocas sello debido a que no dejan pasar fluidos.

BREAKOUTS: son fracturas por cizalla que se generan por la diferencia en magnitud entre los esfuerzos horizontal máximo y horizontal mínimo, y siempre están ubicados en la orientación del esfuerzo horizontal mínimo.

BRAZO (PAD): son los brazos de la herramienta cáliper o la herramienta de registro de imágenes, los cuales permiten que se corra dicho registro en la formación.

CUTOFF: son valores por debajo o por encima de los cuales existe variación de condiciones como litología, presencia de hidrocarburos, etc.

DEPLETAMIENTO: agotamiento del fluido y de la presión del yacimiento debido a la producción del mismo.

ENVOLVENTE DE FALLA: es la línea crítica de estado de esfuerzos. Para las fracturas que están por encima de éstas se consideran como críticamente esforzadas.

FÍSIL: material cuyos átomos cuentan con alta cantidad de energía, en general se tratan de elementos con energía nuclear.

FRACTURAS CRÍTICAMENTE ESFORZADAS: son aquellas fracturas cuyas condiciones de esfuerzo superan la envolvente de falla según el criterio de Mohr-Coulomb y están próximas a deslizarse.

FRACTURAS EN ECHELON: son fracturas de extensión que forman arreglos en escalera.

FRACTURAS INDUCIDA POR TENSIÓN: tipo de fractura en la cual el esfuerzo tangencial supera la resistencia de la roca y se induce fractura.

MUDLINE: Longitud desde la mesa rotaria al suelo.

PRESIÓN DE INICIACIÓN DE FRACTURA (LEAK OFF POINT): es la presión a la cual se comienza a perder fluido a través de la formación en la prueba de *leak off test*.

PRUEBA DE INICIACIÓN DE FRACTURA (*Leak Off Test*): conocida en español cómo prueba de goteo, es una prueba para medir el menor esfuerzo en la formación.

SÓLIDO DE POISSON: material isotrópico y elástico para el cual las constantes elásticas de Lamé son iguales, la mayoría de las rocas cristalinas presentan este comportamiento.

UNIDAD: desde el punto de vista geológico es una subdivisión en una formación de alto espesor. En el caso de éste trabajo se utilizó cómo subdivisión de la Formación Carbonera.

RESUMEN

En el presente trabajo, se realizó la evaluación del criterio de Mohr-Coulomb sobre las fracturas naturales presentes en un pozo, con el fin de evaluar si dichas fracturas se encontraban o no en estado crítico de esfuerzos, y de ésta forma poder relacionarlas con las pérdidas de circulación partiendo de que el estado crítico de esfuerzos es sinónimo de conductividad hidráulica.

Para ello se generó un modelo geomecánico a partir de registros eléctricos, se programó el criterio de falla de Mohr-Coulomb haciendo uso de Excel mediante las ecuaciones correspondientes y se evaluó la relación entre el estado crítico de esfuerzos y las pérdidas de circulación con el fin de evidenciar fracturas hidráulicamente conductivas que corresponden a fracturas críticamente esforzadas.

En el trabajo se pudo determinar la relación del estado de esfuerzos y la orientación de las fracturas naturales con las pérdidas de circulación, evidenciando fracturas críticamente esforzadas en dichas zonas de pérdida de circulación en el pozo de estudio.

Palabras Clave: criterio de falla, Mohr-Coulomb, fracturas en estado crítico de esfuerzos, pérdidas de circulación.

INTRODUCCIÓN

En la literatura en general de Geomecánica, se habla de la conductividad hidráulica sobre las fracturas cuando éstas se encuentran en un estado crítico de esfuerzos. Este estado de esfuerzos sobre fracturas ha sido evaluado con el fin de observar el aporte de productividad en reservorios con fracturas naturales, pero hasta hace poco no se había considerado la posibilidad de que dichas fracturas estuvieran relacionadas con las pérdidas de fluido durante la perforación, por lo cual el objetivo de éste trabajo es realizar la evaluación del estado de esfuerzos sobre dicha fractura y evaluar la existencia de una relación entre el fenómeno de pérdidas de fluido y las fracturas en estado crítico de esfuerzos.

Para llegar a dicha evaluación fue necesario construir un modelo geomecánico, programar el criterio de falla de Mohr-Coulomb y evaluar la existencia de fracturas críticamente esforzadas y las pérdidas de circulación lo cual se expone detalladamente en el trabajo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la relación de fracturas en estado crítico de esfuerzos con las pérdidas de circulación en un pozo de Ecopetrol S.a.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las generalidades geológicas de la Cuenca de los Llanos Orientales.
2. Elaborar un modelo geomecánico del pozo que contenga los esfuerzos principales (esfuerzo vertical, esfuerzo mínimo horizontal, esfuerzo máximo horizontal) y la presión de poro.
3. Determinar el esfuerzo normal y el esfuerzo de corte sobre plano de fractura, por medio de una herramienta computacional.
4. Programar el criterio de falla de Mohr-Coulomb, mediante una herramienta computacional.
5. Establecer una relación entre las fracturas en estado crítico de esfuerzos y las pérdidas de circulación en el pozo de estudio.

1. GENERALIDADES GEOLÓGICAS DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La Cuenca De Los Llanos Orientales es la cuenca sedimentaria más importante del país en términos de producción de hidrocarburos ya que ésta genera el mayor aporte en términos de hidrocarburo producido en el país. Ésta cuenca posee un área de 225603 km², a través de la cual están distribuidos 81 campos menores, 2 campos gigantes y 3 campos mayores, que diariamente producen alrededor de 606 mil barriles de crudo por día¹.

Su delimitación geográfica está dada al norte y al oriente por la frontera Colombo-Venezolana, al Sur por la Serranía de la Macarena, el Departamento del Vaupés, y el río Guaviare, y al Occidente por la Cordillera Oriental, cómo lo muestra la **Figura 1**.

Para el acceso a éste lugar, se destacan seis vías de acceso que son: Pamplona-Saravena, Ruta Libertadores, Sogamoso-Aguazul-Yopal, vía Alterna al Llano, Bogotá Villavicencio y Colombia-Urbe.

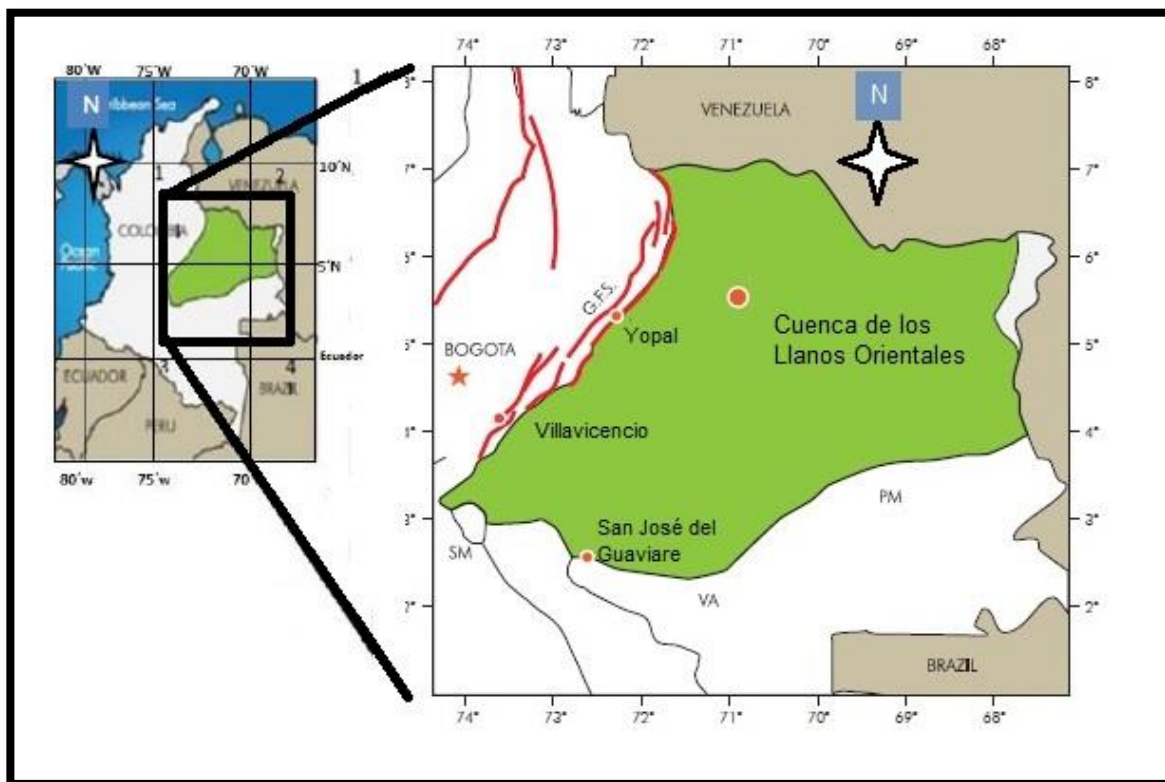
La historia de exploración de ésta cuenca se remonta al año de 1945 en el cual se iniciaron trabajos de adquisición sísmica 2D² en el Bloque Cubarral, en el cual se encuentran los campos Castilla y Chichimene.

La producción de hidrocarburos en Colombia desde los 80s depende fundamentalmente de la Cuenca de los Llanos Orientales, y el desarrollo de los campos comenzaron así: Castilla y Chichimene (1975), Caño Limón (1983), Cusiana y Cupiagua (1992), y Rubiales (2009).

¹ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca Llanos Orientales: Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. p.17 [Consultado el 30/05/2016]. Disponible en: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-yGeofisica/Tesis/5.%20Informe%20Final%20Llanos.pdf>

² MORENO SÁNCHEZ, Yustin Daniel; NIETO ZARATE, Duvan Ernesto y ESCARRAGA, Yuri Hans. Evaluación Técnico - Financiera a La Implementación De La Perforación Con Control Dinámico De Presión (MPD) En El Campo Castilla. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2014. p. 24

Figura 1. Ubicación de la Cuenca de los Llanos Orientales.



Fuente: MONCAYO, Edwar, TCHEGLIAKOVA, Nadejda y MONTES, Luis. Pre-Stack Seismic Inversion Based on A Genetic Algorithm: A Case from the Lanos Basin (Colombia) in the Absence of Well Information. C.T.F. Cienc. Tecnol. Futuro. Bucaramanga. [Consultado el 07/03/2017]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832012000100001. Modificado por los autores.

1.2 GEOLOGÍA DE LA CUENCA

1.2.1 Formación Une. Se depositó durante el periodo Cenomaniano del Cretácico, en condiciones que variaron de continental a nerítico interno, y corresponde a una arenisca cuarzosa con intercalaciones menores de lutitas y de limolitas carbonosas.

1.2.2 Formación Gachetá. Está constituida por una secuencia de lutitas de color gris con desarrollo menores de areniscas con contenidos variables de glauconita y pequeños niveles calcáreos, los cuales se depositaron en el cretácico³.

³ Ibid. p.24

1.2.3 Formación Guadalupe. Consiste de una secuencia de areniscas masivas con pequeñas intercalaciones de lutita, a veces con pequeñas capas de carbón, depositada en el cretácico⁴.

1.2.4 Formaciones Barco y Los Cuervos. La Formación Barco de areniscas cuarzosas masivas de grano fino a grueso con intercalaciones delgadas de lutitas, y Los Cuervos corresponde a lutitas de color gris intercaladas con areniscas de color parduzco, y grano muy fino a medio, las cuales se depositaron en el Paleoceno. Estas formaciones están presentes únicamente en el borde occidental de la cuenca. En el sector de Casanare, los depósitos continentales de las formaciones Barco y Los Cuervos son areniscas masivas, pobremente clasificadas en la base, para la primera de ellas; suprayacidas por lutitas de color gris y gris verdoso, con intercalaciones locales de algunas capas delgadas de carbón y delgadas intercalaciones de areniscas en la Formación Los Cuervos. En el área de Arauca la Formación Barco consta de areniscas cuarzosas masivas de grano fino a grueso, con intercalaciones delgadas de lutitas. La secuencia sedimentaria de la Formación Los Cuervos corresponde a lutitas de color gris, intercaladas con areniscas de color parduzco, de grano muy fino a medio. Ambos contactos de estas rocas con las secuencias inferiores y superiores son discordantes⁵.

1.2.5 Formación Mirador⁶. Se depositó en el eoceno tardío, y corresponde a un conjunto de areniscas masivas con diferentes tamaños de grano, decreciente de base a techo, compuestas por cuarzo, algunas veces feldespato, materia orgánica leñosa y glauconita.

1.2.6 Formación Carbonera⁷. Corresponde a depósitos transgresivos y regresivos de corta duración, que consiste en una alternancia de rocas arcillosas, limosas y de areniscas, a veces con niveles de carbón depositadas en ambientes que varían de marino transicional a continental, y está dividida en 8 miembros o unidades (C1 a C8), los cuales tienen las siguientes características:

- Unidad C8 (Unidad E4): Corresponde a una secuencia de lutitas laminares, físis y astillosas intercaladas con arcillolitas grises⁸.
- Unidad C7 (Unidad T1): Se compone de areniscas depositadas en un ambiente marino somero, deltaico y continental, grano fino a medio y a veces conglomerático separadas por niveles de arcillolitas.

⁴ Ibid. p.25

⁵ Ibid. p.21

⁶ Ibid. p.22

⁷ Ibid. p.25

⁸ ECOPETROL S.A. Superintendencia de Operaciones de Castilla – Chichimene, 2007, p. 12.

- Unidad C6 (Lutita E3): Secuencia homogénea de lutita laminar, fisil y astillosa, con intercalaciones ocasionales delgadas de limolitas grises o areniscas muy finas⁹.
- Unidad C5: Compuesta por intercalaciones de arcillolita y arenisca poco consolidada de tamaño de grano medio a grueso, y en ocasiones ligeramente calcáreas con glauconita. En el sector de Apiay es difícil diferenciarla y estaría incluida en la Conjunto C2 (Según la nomenclatura que utiliza Ecopetrol), en el cual estaría también el intervalo cronoestratigráfico correspondiente a la Unidad C4, no diferenciable en este sector, ya que litológicamente el Conjunto C2 presenta aproximadamente un espesor de 1.000 pies, correspondiente a una intercalación de arcillolitas, y areniscas de poco espesor, con un nivel un poco más arcilloso hacia el tope del mismo¹⁰.
- Unidad C4: Está compuesta por una alternancia rápida de capas de areniscas, limolitas y lutitas. El espesor máximo reportado es superior a 700 pies en el Piedemonte Llanero entre Vanguardia-1, al suroeste y Tauramena -1, al noreste. El máximo espesor registrado en este sector se encuentra en el pozo Guacavía-1 con 1.050 pies. Generalizando, la Unidad C4 presenta un espesor comprendido entre 150 y 300 pies en la parte central de la cuenca¹¹.
- Unidad C3: Está compuesta por intercalaciones de niveles de arenisca fina a gruesa, blanca a translúcida y en algunas zonas presencia de limolitas y arcillolitas de color gris verdoso y niveles carbonosos.
- Unidad C2 (Lutita E): Compuesto de Lutitas grises con intercalaciones de Limolitas, que aumenta su espesor hacia el suroccidente de la cuenca, y aumentando el porcentaje de arena hacia el norte y noreste debido probablemente al ambiente deltaico en éste sector.
- Unidad C1 (Areniscas Superiores de Carbonera): Está compuesta por intercalaciones de cuerpos arenosos separados por niveles delgados de limolitas oscuras y lutitas grises. En su parte media se encuentra una secuencia homogénea de arenas de grano fino a medio.

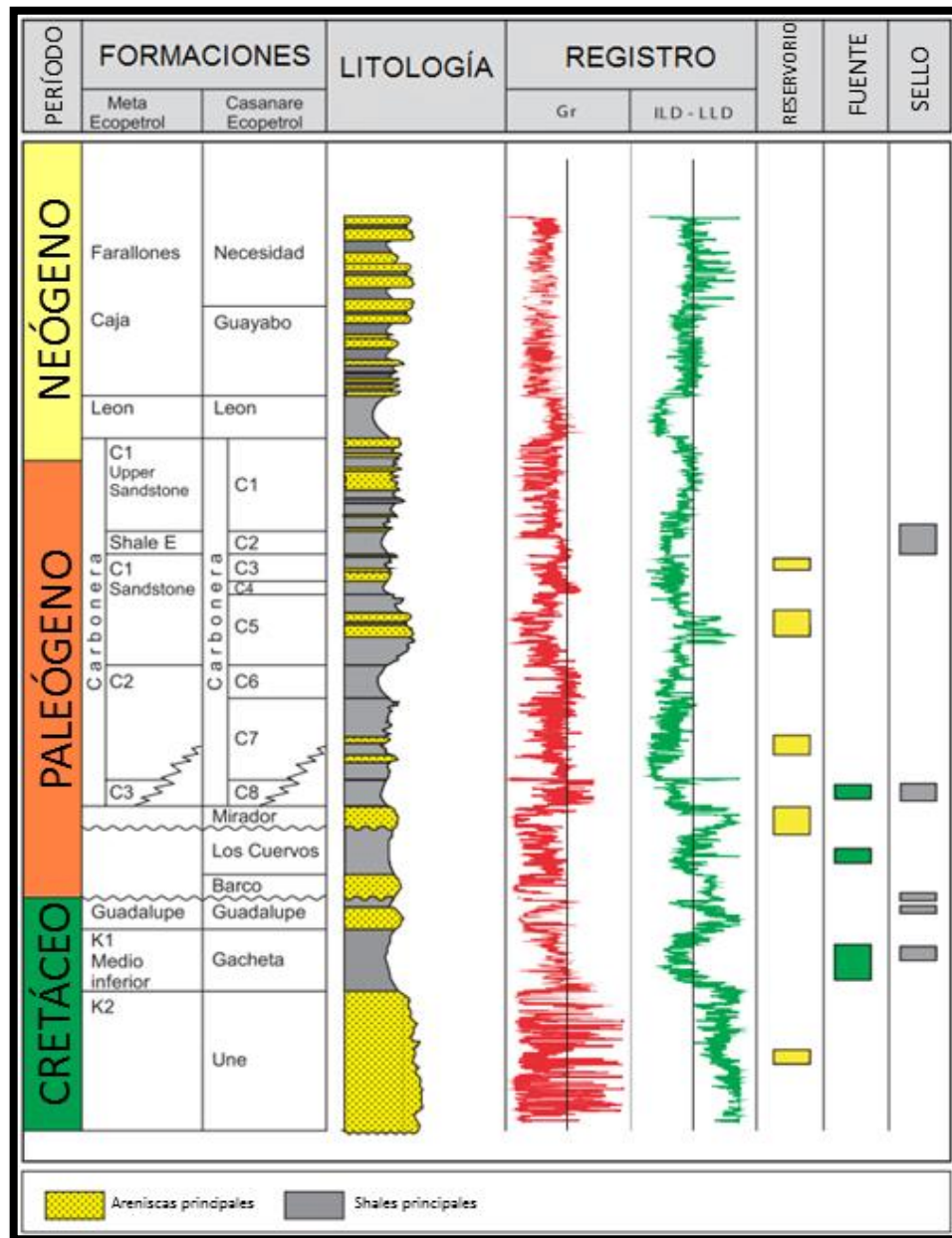
La **Figura 2**. Presenta la columna estratigráfica generalizada de la cuenca cómo se muestra a continuación:

9 MORENO SÁNCHEZ, Yustin Daniel; NIETO ZARATE, Duван Ernesto y ESCARRAGA, Yuri Hans. Op., Cit., p. 16.

10 AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS., Op., Cit., p. 15.

11 Ibid., p. 51.

Figura 2. Columna Generalizada De La Cuenca.



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca Llanos Orientales: Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. p.12 [Consultado el 30/05/2016]. Disponible en:<http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/5.%20Informe%20F-inal%20Llanos.pdf>

1.2.7 Formación León. Depositada en el mioceno, está compuesta de capas gruesas de lutitas grises en gran parte, y en el sector suroeste de la cuenca presenta gran contenido de arena. Su ambiente de depósito es marino y se considera como el último pulso transgresivo del mar en la Cuenca de los Llanos Orientales¹².

1.2.8 Formación Guayabo. Perteneciente al mioceno tardío y al cuaternario, es la última sedimentación de la cuenca, está constituida por una alternancia de arcillolitas de colores grises a rojizos muy solubles, y areniscas mal seleccionadas de finas a muy gruesas, con niveles de conglomerados en ciertos sectores y ocasionalmente niveles carbonosos, y su ambiente de depósito presenta en su base una influencia marina y en su tope un ambiente fluvial¹³.

1.3 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO

Estudios realizados a la cuenca han considerado que la Cuenca de los Llanos Orientales podría alcanzar un volumen de petróleo de hasta 124.000 millones de barriles in situ, representados hasta el momento en dos campos gigantes (Rubiales y Caño Limón), dos mayores (Apiay y Castilla), y en casi 200 campos menores que han sido trabajados en esta cuenca.

1.3.1 Roca Generadora. Se han logrado reconocer tres rocas generadoras en la Cuenca de los Llanos Orientales, repartidas en las edades Paleozoica, Cretácica y Terciaria. A pesar de esto la principal es la roca madre cretácica que se constituye principalmente por las arcillolitas de la Formación Gachetá (equivalente a la Formación La Luna), se ha reconocido como la principal roca generadora para esta cuenca. Tiene un valor promedio de TOC (Carbono Orgánico Total) de 1 - 3% y un VRe (Reflectancia de Vitrinita equivalente) de 0,62%, posee kerógenos de tipo II y III, y su espesor efectivo está entre 17 y 34 pies.

Su materia orgánica está constituida principalmente por material detrítico de vegetales superiores continentales.

1.3.2 Migración. Se han documentado dos pulsos de migración para la Cuenca de los Llanos Orientales: el primero se llevó a cabo entre el Eoceno tardío y el Oligoceno, y el último inició en el Mioceno y actualmente continúa. Esto se debe principalmente a los movimientos orogénicos del Terciario Tardío.

¹² RINCON BARRERA, Lenin Farooq. Determinación de oportunidades de hidrocarburos detrás del revestimiento (oil behind casing) en los campos operados por Perenco en la asociación Casanare, Cuenca De Los Llanos Orientales. Trabajo de grado Geología. Bucaramanga; Universidad Industrial de Santander, 2011, p.36.

¹³ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Op., Cit., p.13

1.3.3 Roca Reservorio. Las principales formaciones almacenadoras son Carbonera (principalmente las unidades C-3, C-5 y C-7), junto con la Formación Mirador, específicamente la zona de la edad del paleógeno. Sin embargo en la secuencia del Cretáceo también se ubican areniscas con excelentes condiciones para ser reservorios. El rango de porosidad varía de 10 a 30%, Mirador, Gacheta y Guadalupe.

1.3.4 Roca Sello. A nivel regional se reconoce a la Formación León como la roca sello. A pesar de esto, a nivel local se encuentra que las unidades C-2, C-4, C-6 y C-8 de la Formación Carbonera son sellos, adicional a esto las múltiples fallas presentes en las Formaciones Gacheta y Guadalupe actúan en ocasiones como fallas intraformacionales.

1.3.5 Trampas. Las trampas se han identificado como una consecuencia del desarrollo de estructuras relacionadas con los movimientos orogénicos del Terciario tardío. “Hasta el momento, la exploración se ha concentrado en las fallas normales antitéticas. Sin embargo, los anticlinales asociados a fallas inversas y estructuras de bajo relieve, así como las trampas estratigráficas, pueden representar un importante objetivo exploratorio”¹⁴.

1.4 PRODUCCIÓN DE LA CUENCA

Como se mencionó previamente, la producción de la Cuenca de los Llanos Orientales está dividida en casi 90 campos, cuya producción actual está dada en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Producción (en barriles por día) de los campos de la Cuenca de los Llanos Orientales.

Campo	Producción (BPDC)
Apiay	4.800
Castilla	19.200
Chichimene	6.600
Cupiagua	2.500
Cusiana	58.000
Rubiales	160.000
Campos Menores	343.000
TOTAL PRODUCCIÓN DE CRUDO	600.000

Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Estadísticas de Producción mensual de petróleo. 2016.

¹⁴ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Op., Cit., p. 17

2. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen las diferentes consideraciones teóricas que se tuvieron en la realización del trabajo, básicamente enfocado a los mecanismos de pérdidas de fluido, las ecuaciones y consideraciones para la determinación de los esfuerzos in situ, la programación del criterio de Mohr-Coulomb y el concepto de fracturas críticamente esforzadas.

2.1 PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN

Las pérdidas de circulación son un fenómeno que se produce durante la perforación de un pozo de petróleo y/o gas donde parte, o la totalidad del volumen del fluido migra por las paredes del pozo hacia formaciones que están siendo perforadas, por lo cual el volumen de lodo que retorna a superficie en comparación con el bombeado es menor, o nulo. Esto genera inconvenientes operacionales como problemas para preservar la integridad de pozo, mantener el control y la estabilidad del mismo, y también acarrea costos por el fluido perdido y además repercute en la seguridad dada la imposibilidad de controlar las presiones de la formación mediante presión hidrostática.

En cuanto al origen del problema, éste obedece a causas tanto naturales como inducidas¹⁵ durante la operación de perforación: dentro de las causas naturales se incluyen aquellas que se dan debido a las propiedades intrínsecas de las formaciones que son atravesadas, mientras que las causas inducidas son aquellos errores operacionales o problemas de procedimiento en el proceso de la perforación, que sumado a los cientos de pozos perforados y a los millones de barriles extraídos, generan un desequilibrio en el subsuelo favoreciendo las condiciones para que existan las pérdidas de circulación. Estos mecanismos se pueden observar en la **Figura 3**.

Las pérdidas de circulación aumentan significativamente los costos y riesgos para los perforadores alrededor del mundo y amenazan con plantear mayores retos en el futuro. La industria aborda esta amenaza con diversos materiales que fortalecen el pozo, los cuales trabajan mediante distintos mecanismos, pero comparten un objetivo en común: frenar el crecimiento de fracturas y mantener el lodo de perforación en el pozo.

En este proyecto se deben identificar las zonas en las cuales el pozo presentó este fenómeno, para poder verificar si realmente coinciden con aquellas en las cuales las fracturas naturales muestran un estado crítico de esfuerzos.

¹⁵ WILSON, A. ECD-Management Strategy Solves Lost Circulation Issues. Society of Petroleum Engineers, 2014. p. 7

2.1.1 Clasificación de las pérdidas de circulación. Las pérdidas de circulación se pueden clasificar según el parámetro que más nos interese conocer, ya sea tasa de pérdida (velocidad con que se pierde el fluido hacia la formación), volumen de fluido perdido (costos asociados al lodo) o el tiempo que duró el tratamiento (tiempo no productivo generado por este inconveniente)¹⁶.

Las clasificaciones más comunes es según los mecanismos de pérdidas mostrados en la **Figura 3** Y según los volúmenes perdidos y las tasas de pérdida mostrados en la **Tabla 2** y la **Tabla 3**.

Tabla 2. Tipos de pérdida de circulación según la tasa de pérdida.

Tipo de pérdida	Severidad
Filtración	1 bbl/hr – 10 bbl/hr
Pérdidas parciales	11 bbl/hr – 50 bbl/hr
Pérdidas totales	Mayor a 50 bbl/hr (incluye pérdidas totales)

Fuente: ABBAS, R, JAROUJ, H., DOLE, S., JUNAI, H. (2004). Una red de seguridad para controlar las pérdidas de circulación. Oilfield Review, Schlumberger. p.4.

Tabla 3. Tipo de pérdida de circulación según volumen perdido/tiempo de tratamiento.

Tipo de pérdida	Severidad de la pérdida
Pérdidas menores	6 bbl – 470 bbl, o si se controlan en menos de 48 hr.
Pérdidas severas	Más de 470 bbl, o más de 48 hr para tratarse.

Fuente: ABBAS, R, JAROUJ, H., DOLE, S., JUNAI, H. (2004). Una red de seguridad para controlar las pérdidas de circulación. Oilfield Review, Schlumberger. p.4.

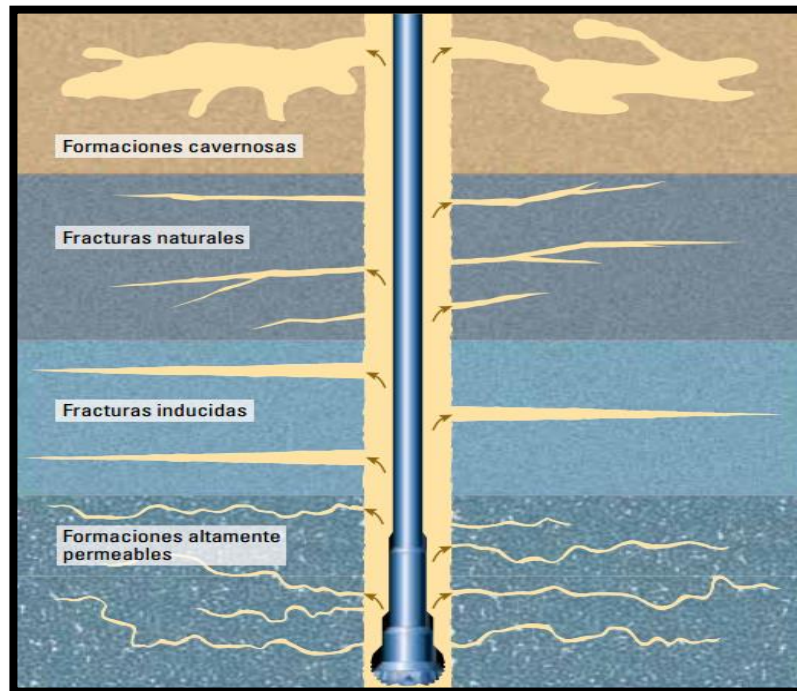
2.1.1 Consecuencias de las pérdidas de circulación. Las pérdidas de circulación además del problema que representan en sí mismas, pueden llevar a problemas adicionales dependiendo de su severidad y si no se actúa en el menor tiempo posible, podría presentarse alguna de las consecuencias que se citan a continuación:

- **Daño de formación:** Cuando el fluido de perforación ingresa a las formaciones de interés, puede dejar en las mismas componentes que llevan a la reducción de permeabilidad lo que más adelante va a disminuir su producción.

¹⁶COOK, J., Growcock, F., Guo, Q., Hodder, M., van Oort, E. Estabilización para prevenir pérdidas de circulación. Oilfield Review, Schlumberger. 2012. p.7.

- **Patada de pozo:** Al perder fluido de perforación disminuye la altura de la columna de fluido, se genera una reducción de la presión hidrostática lo que imposibilita el control de la presión de la formación y genera influjo lo que hace que el fluido llegue hasta la superficie de forma violenta.
- **Pega de tubería por empaquetamiento:** Si se reduce el volumen de fluido en el pozo, este no va a ser capaz de limpiar el hoyo adecuadamente, por lo cual se van a acumular recortes, desechos, etc., lo que lleva a un bloqueo del espacio anular.

Figura 3. Mecanismos que generan pérdidas de circulación.



Fuente: BAGGINI, S., FRATES, C., GARAND, J., MEYER, A. (2014). Sellado de fracturas: Avances en el control de las pérdidas de circulación. Schlumberger. p.2.

2.2 GEOMECÁNICA

La geomecánica es la disciplina que busca cuantificar la respuesta de la tierra a cambios en los esfuerzos, la presión del yacimiento y la temperatura de la formación, variaciones que pueden ser causadas por fenómenos naturales o impuestos por el hombre. Esta cuantificación se logra mediante la aplicación de distintos campos, tales como mecánica de sólidos y fluidos, ingeniería, geología y física.

Aunque la geomecánica está no solo relacionada, sino basada en las corrientes principales de la mecánica clásica y la mecánica de materiales, existen características específicas propias que la posicionan en su propio campo como rama de la ingeniería. La base de esta rama es la relación entre esfuerzo y deformación.

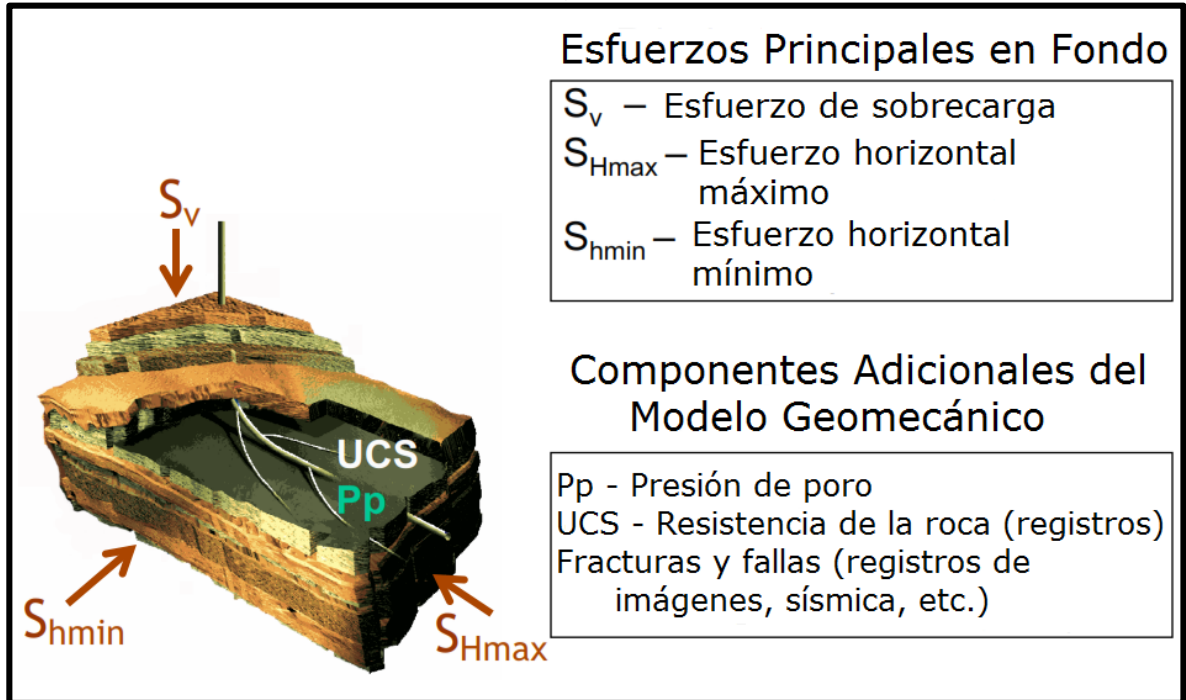
La aplicación de este campo es la base principal del proyecto, pues a partir de él, podemos determinar mediante otro tipo de herramientas como los registros eléctricos y medidas de presión, la magnitud de los esfuerzos presentes en la zona de estudio y más adelante definir como estos se comportan en los planos de las diferentes fracturas que serán analizadas, para posteriormente verificar si se encuentran en estado crítico de esfuerzos y poder relacionar este estado con las pérdidas de circulación que presentó el pozo.

2.2.1 Geomecánica aplicada a yacimientos. La temática de la geomecánica, como rama práctica asociada a la ingeniería de petróleos, está relacionada con la elaboración de modelos predictivos y consistentes de los esfuerzos in situ y de las propiedades de la roca para:

- Predecir la deformación del agujero y del yacimiento (durante perforación, completamiento y producción).
- Optimizar los planes de desarrollo del campo y encontrar soluciones ingenieriles para diagnosticar, predecir y solucionar problemas, y de este modo obtener una mayor estabilidad en el pozo.

Esto se logra integrando el estudio de las propiedades físicas de los yacimientos, el estado de los esfuerzos (magnitud y orientación), la presión de poro, fracturas naturales, fallas y la roca sello, como se puede ver en la **Figura 4**.

Figura 4. Componentes de un modelo geomecánico.



Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics (online). Campo de esfuerzos tectónicos, Curso de Geomecánica Universidad de Stanford.

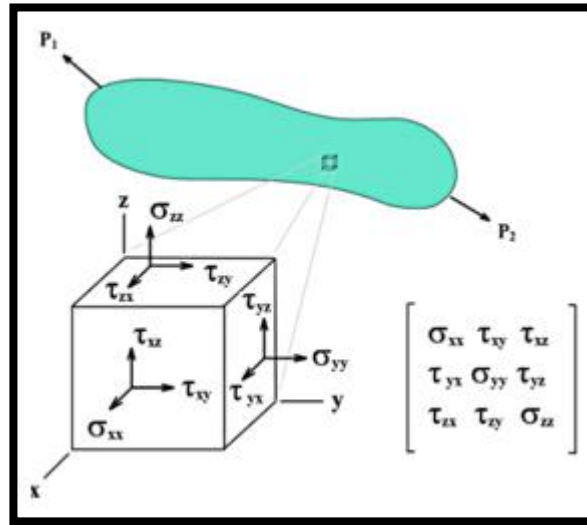
Los parámetros principales que controlan estas interacciones son el estado de esfuerzos in situ, la resistencia de la roca, propiedades y orientación de los estratos, presión de poro, distribución de fracturas y fallas, trayectoria del pozo y peso del lodo.¹⁷

2.2.2 Esfuerzo. Es la 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 a la superficie de la roca. El esfuerzo de corte (τ) se aplica a lo largo de la cara del plano.

En la mecánica de materiales, el estudio de los esfuerzos se realiza sobre un elemento infinitesimal, correspondiente a un punto determinado como lo muestra la **Figura 5** y la roca no es la excepción ya que para el estudio de los esfuerzos sobre ésta.

¹⁷ D. A. CASTILLO & D. MOOS, Reservoir Geomechanics Applied to drilling and completion programs in challenging formation: North West Shelf, Timor Sea, North Sea and Colombia, APPEA Journal 2000. p.3

Figura 5. Elemento Infinitesimal de un Cuerpo.



Fuente: Esfuerzo de los materiales.
 [Consultado el 7/07/2016]. Disponible en: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8d/Stress_tensor.png/300px-Stress_tensor.png>

A pesar de que generalmente en el análisis de esfuerzos los esfuerzos de tensión son los que se asumen como positivos, para el caso de la geología estructural y mecánica de rocas se toman como positivos los esfuerzos compresivos debido a que son los que predominan en las rocas, y aunque se asume que estos ejes principales ortogonales están orientados en sentido vertical y horizontal, esta condición no suele cumplirse.

Para definir la orientación de componente del esfuerzo por convención se usa el subíndice para identificar el plano sobre el que actúa, por ejemplo σ_x ; esfuerzo normal al plano perpendicular al eje X. En el caso de los esfuerzos de corte, estos no solo actúan sobre un plano sino que además se debe especificar la orientación en la que actúan, para esto se utiliza otro subíndice que va después del que identifica al plano, por ejemplo τ_{xy} : esfuerzo de corte sobre el plano X en la dirección del eje Y.

Según el Doctor Mark Zoback en la mecánica del medio continuo, los esfuerzos que actúan en un cuerpo homogéneo e isotrópico se pueden describir en un tensor de esfuerzos de segundo orden (o matriz de esfuerzos de 3x3), donde se define un tensor de esfuerzos de nueve componentes, donde seis componentes son independientes entre sí, y en el que para cada componente se define tanto su magnitud como dirección. El hecho de que debamos definir la dirección en la que se orienta cada esfuerzo es debido a que estos no actúan como vectores, sino como

escalares, en el cual cada esfuerzo se define como una fuerza está actuando sobre un plano específico, cómo lo muestra la **Ecuación 1**:

Ecuación 1. Comportamiento de esfuerzos generales en la Tierra.

$$[S] = \begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{XY} & \sigma_{YY} & \tau_{YZ} \\ \tau_{XZ} & \tau_{YZ} & \sigma_{ZZ} \end{bmatrix}_{xyz}$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics (online). Campo de esfuerzos tectónicos.

Donde:

S = Tensor de esfuerzos. [Adimensional]

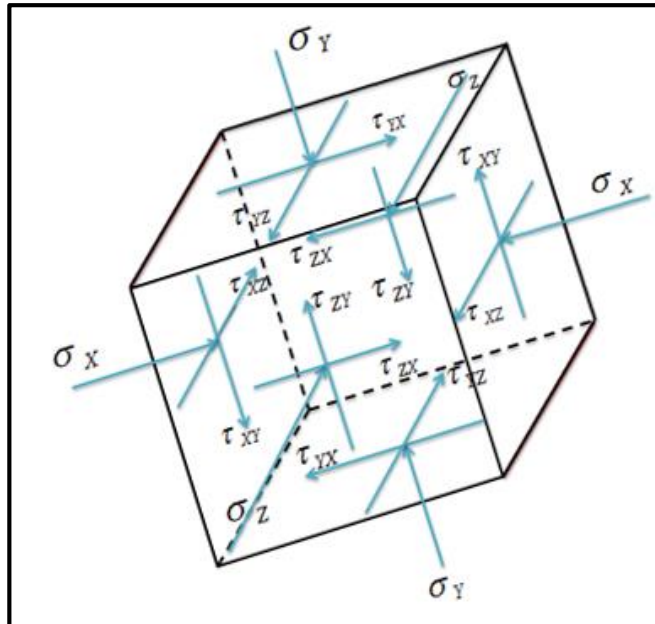
σ = Esfuerzo normal efectivo sobre la roca. [psi]

τ = Esfuerzo de corte sobre la roca. [psi]

X, Y y Z = Ejes cartesianos originales de los esfuerzos. [No tiene unidades]

Dicho tensor de esfuerzos corresponde a la **Figura 6**. donde los esfuerzos están en una orientación arbitraria y están presentes esfuerzos tanto normales como de corte.

Figura 6. Tensor de esfuerzos en orientación arbitraria.



Fuente: Presentación Estado de Esfuerzos Tridimensional. Ecopetrol S.A. Modificada por los autores.

En términos generales, a partir de todos los esfuerzos en la tierra, se determinan tres esfuerzos principales, de acuerdo con cómo se muestra la **Figura 7**, y esto es uno de los axiomas de la geomecánica, pero si se desea identificar cual es el esfuerzo que provoca cada efecto (esfuerzo normal y de corte), se aplica el teorema de Pitágoras, según la ecuación siguiente:

Ecuación 2. Teorema de Pitágoras para la Descomposición de esfuerzos.

$$P^2 = \sigma^2 + \tau^2$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics (online). Campo de esfuerzos tectónicos.

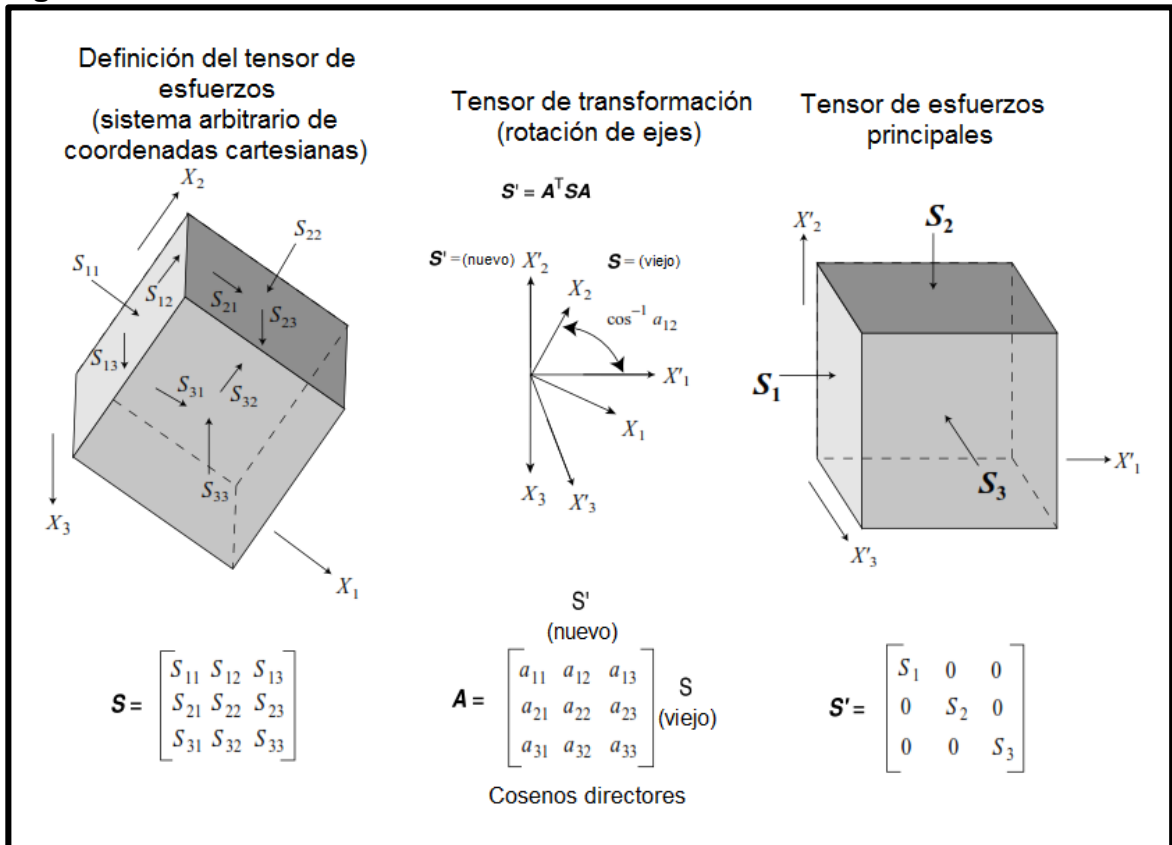
Donde:

P = Esfuerzo compresivo sobre la roca. [psi]

σ = Esfuerzo normal al Plano. [psi]

τ = Esfuerzo de corte sobre el plano. [psi]

Figura 7. Definición del Tensor de Esfuerzos.



Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 6.

En otros términos, todos los esfuerzos presentes en la tierra se llevan a un sistema en el cual sólo existen tres esfuerzos principales: Vertical, Horizontal Máximo y Horizontal mínimo, los cuales se determinan a partir de pruebas y datos geofísicos, donde el caso donde sólo están presentes los esfuerzos S1, S2 y S3 corresponden a un sistema orientado de forma ortogonal a los esfuerzos principales, los cuales debido a su simetría con la disposición de los esfuerzos, no generan esfuerzos de corte sobre el elemento infinitesimal (las caras del cubo), de tal forma que los planos de éste sistema se le denominan planos principales.

Es válido suponer que los esfuerzos tienen esta orientación si se piensa que un esfuerzo que se realiza sobre la superficie de la tierra va a tener una dirección vertical y por lo tanto los dos restantes serán horizontales debido a que los esfuerzos principales son perpendiculares entre sí. Esto se puede llevar a lo profundo de cualquier pozo notando que aún el más profundo que se ha perforado no ha logrado llegar a los trece kilómetros, algo prácticamente insignificante si lo comparamos con el radio promedio de la tierra el cual es de 6.371 km.

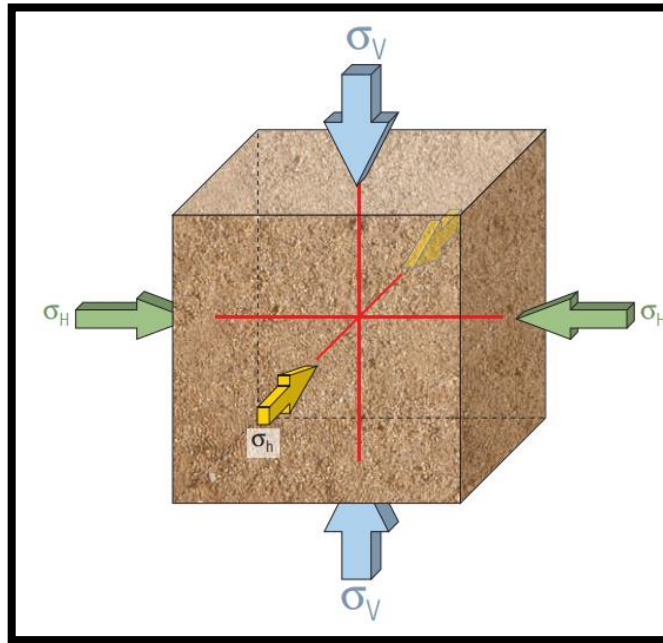
Además de esto, siguiendo con la comparación anterior, se asume que los esfuerzos in situ no presentan esfuerzos de corte, debido a que se extrapola la interacción que tiene la superficie de la corteza con los fluidos, por lo tanto se dice que las rocas siempre están expuestas a esfuerzos producidos por fluidos (aire onshore, agua offshore) y los fluidos no ejercen esfuerzos de corte sino que se propagan perpendicularmente en todas las direcciones sobre las que tienen contacto al ser esfuerzos hidrostáticos.

2.2.3 Esfuerzos principales. Según lo que ya se tuvo en cuenta, se dice que en general la superficie de las rocas es un plano principal. Un plano principal se define como el plano en el cual los esfuerzos cortantes o tangenciales desaparecen debido a su orientación concordante (de simetría) con los esfuerzos, y sólo se observan esfuerzos normales. En la práctica se definen tres esfuerzos principales (ver **Figura 8**):

- σ_v : esfuerzo vertical o de sobrecarga (overburden), como su nombre lo sugiere, es el esfuerzo de la columna litostática suprayacente al punto donde se va a determinar su magnitud.
- σ_H : esfuerzo horizontal máximo.
- σ_h : esfuerzo horizontal mínimo.

Para tener una mayor practicidad, el esfuerzo vertical hace referencia a aquel esfuerzo orientado en la dirección del eje Z, mientras que los dos horizontales corresponden a los ejes X y Y, los cuales pueden variar dependiendo de en qué sentido sea el esfuerzo predominante.

Figura 8. Esfuerzos principales que actúan sobre las rocas.



Fuente: COOK, John, et al. Las rocas importan: Realidades de la geomecánica. Obtenido el, 2007, vol. 28. p. 3.

Para los tres esfuerzos principales el tensor de esfuerzos se ve simplificado a la siguiente expresión (ver **Ecuación 3**):

Ecuación 3. Simplificación del Tensor de Esfuerzos a Planos Principales.

$$S' = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{bmatrix}_{X'Y'Z'}$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 7.

Donde:

S' = Tensor de esfuerzos simétrico a los planos principales (no se presentan esfuerzos de corte) [Adimensional]

S = Corresponde al esfuerzo efectivo y el subíndice a cada uno de los 3 esfuerzos principales. [psi]

X' , Y' y Z' = Corresponden a los ejes coordenados de los esfuerzos principales. [Adimensional]

De los esfuerzos expresados en esta matriz en la realidad sólo se puede medir directamente el esfuerzo horizontal mínimo, y los esfuerzos restantes pueden ser determinados a través de mediciones geofísicas mediante diferentes modelos matemáticos y ecuaciones que se presentarán en el transcurso de éste capítulo.

2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS ROCAS

Al referirse a las propiedades mecánicas de las rocas, nos referimos a las leyes que gobiernan la deformación y el fallamiento de las mismas en respuesta a un esfuerzo aplicado, en otras palabras, las propiedades mecánicas hacen referencia a la resistencia que tienen las rocas frente a una carga aplicada.

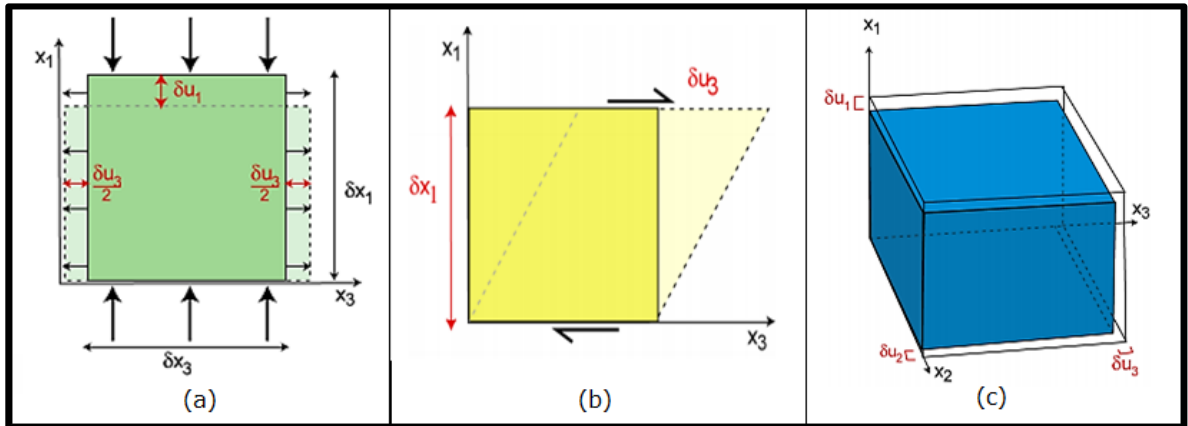
En este orden de ideas, las propiedades mecánicas se pueden dividir en dos grupos, los módulos elásticos que son los que gobiernan la deformación de la roca y las propiedades mecánicas que determinan su resistencia y por lo tanto, en que momento van a fallar.

2.3.1 Módulos elásticos. Como ya se indicó, los módulos elásticos son quienes cuantifican en qué medida y de qué manera las rocas se van a deformar en presencia de esfuerzos. Hay tres razones principales por las cuales se hace importante conocer y cuantificar estas propiedades:

- Conocer cómo será la compactación a medida que el reservorio se deplete.
- Conocer cuáles serán los efectos de la compactación en las propiedades petrofísicas de la roca, como porosidad y permeabilidad.
- Conocer cómo se van a ver afectadas otras formaciones, por ejemplo, subsidencia en la superficie o la formación de fracturas o fallas.

Si se aproxima la roca a un comportamiento homogéneo e isotrópico, se dice que los esfuerzos y deformaciones principales tienen la misma dirección. En la **Figura 9** podemos ver cómo se comporta la deformación en un material con las características previamente definidas bajo un solo tipo de esfuerzo; de izquierda a derecha se ve: expansión perpendicular al esfuerzo por causa de un esfuerzo uniaxial, deformación de corte al aplicar esfuerzo de corte simple sobre dos caras opuestas y finalmente, deformación volumétrica a partir de la compresión uniforme de todo el cuerpo.

Figura 9. Relación entre esfuerzo y deformación, en un caso de deformación idealizada.



Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 60. Modificado por los autores.

Para llevar a cabo un análisis en el cual se involucre sólo deformación, se va a tomar una deformación infinitesimal, pues, en este caso se asume una alteración insignificante como resultado del esfuerzo aplicado, por lo tanto es totalmente reversible y, es válido asumir una relación totalmente lineal entre esfuerzo y deformación, es por esto que a dichas propiedades se les denomina módulos elásticos¹⁸: hay cinco módulos elásticos usados generalmente que se pueden explicar con ayuda de la **Figura 9**:

- **Módulo de Young (E)**: se conoce como la deformación longitudinal que sufre una roca al ser sometida a compresión uniaxial (**Figura 9.a**).
- **Relación de Poisson (ν)**: este módulo también se explica con ayuda de la **Figura 9.a** y se refiere a la relación de la deformación lateral que se produce respecto a una deformación axial. En un fluido incompresible, $\nu=0,5$.
- **Módulo de Corte (G)**: su comportamiento se puede ver en la **Figura 9.c** y es la relación que existe entre un esfuerzo de corte aplicado y la correspondiente deformación que genera.
- **Parámetro o constante de Lamé (λ)**: Esta constante no tiene una representación física, en un sólido de Poisson ($\nu=0,5$), $\lambda=G$.
- **Módulo de Bulk (K)**: se refiere a la fuerza de un material sometido a la presión hidrostática, se puede ver en la **Figura 9.c**. Explicado de otra forma, es el inverso de la compresibilidad de la roca (β o C).

¹⁸ ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 61.

Es importante saber que en un cuerpo homogéneo e isotrópico, basta conocer dos módulos y a partir de estos es posible describir cómo se va a deformar el cuerpo en presencia de cualquier tipo de esfuerzo. En la **Tabla 4** se puede ver cómo se pueden determinar los módulos elásticos en función de otros.

Tabla 4. Relación entre los módulos elásticos en un cuerpo isotrópico.

K	E	λ	ν	G
$\lambda + \frac{2G}{3}$	$G \frac{3\lambda + 2G}{\lambda + G}$	-	$\frac{\lambda}{2(\lambda + G)}$	-
-	$9K \frac{K - \lambda}{3K - \lambda}$	-	$\frac{\lambda}{3K - \lambda}$	$3 \frac{K - \lambda}{2}$
-	$\frac{9K - G}{3K - G}$	$K - \frac{2G}{3}$	$\frac{3K - 2G}{2(3K - G)}$	-
$\frac{E \cdot G}{3(3G - E)}$	-	$G - \frac{E - 2G}{3G - E}$	$\frac{E}{2G} - 1$	-
-	-	$3K \frac{3K - E}{9K - E}$	$\frac{3K - E}{6K}$	$\frac{3K \cdot E}{9K - E}$
$\lambda \frac{1 + \nu}{3\nu}$	$\lambda \frac{(1 + \nu)(1 - \nu)}{\nu}$	-	$\lambda \frac{1 - 2\nu}{2\nu}$	$\lambda \frac{1 - \nu}{\nu}$
$G \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	$2G(1 + \nu)$	$G \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$	-	-
-	$3K(1 - 2\nu)$	$3K \frac{\nu}{1 + \nu}$	-	$3K \frac{1 - \nu}{1 + \nu}$
$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	-	$\frac{E}{2 + 2\nu}$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 64.

Donde:

K = Modulo de bulk.

E = Modulo de Young (estático).

Λ = Parámetro de Lamé.

V = Relación de Poisson.

G = Modulo de corte.

Pese a que los módulos son conocidos por pruebas en laboratorio, se debe tener en cuenta que no siempre es posible contar con núcleos que permitan hacer las mediciones directas de cada uno, por este motivo se han logrado relacionar los módulos elásticos con las velocidades sísmicas, es decir, velocidad compresional (V_p) y velocidad de cizalla o corte (V_s), usando las Ecuaciones 4 y 5:

Ecuación 4. Velocidad compresional a partir de módulos elásticos.

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}}$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 63.

Donde:

V_p = Velocidad de la onda compresional, [m/s].

K = Módulo de Bulk, [MPa].

G = Módulo de corte, [MPa].

ρ = Bulk Density (densidad medida por el registro), [g/cm³].

Ecuación 5. Velocidad de corte a partir de módulos elásticos.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 63.

Donde:

G = Módulo de corte, [psi].

ρ = densidad de la roca, [g/cm³].

V_s = Velocidad de la onda de corte, [m/s]

Además, la relación de Poisson se puede determinar con ayuda de las velocidades sísmicas con ayuda de la **Ecuación 6**:

Ecuación 6. Relación de Poisson en función de V_p y V_s .

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 64.

Donde:

V_p = Velocidad de la onda compresional, [m/s].

V_s = Velocidad de la onda de corte, [m/s].

ν = Relación de Poisson, [Adimensional].

Es importante aclarar que para el caso del módulo de Young, este se encuentra en forma tanto dinámica como estática y, la relacionada con los demás módulos es la dinámica, sin embargo es necesario encontrar el módulo de Young estático pues es quien representa de forma más realista el comportamiento de la roca . Para esto se han realizado varias relaciones empíricas para arcillas y areniscas, las cuales se muestran en las ecuaciones 7, 8 y 9.

Ecuación 7. Módulo de Young estático (Bradford et al. 1998).

$$E_{st}=0,4145 \cdot E_{dyn} - 1,0593$$

Fuente: TARIQ, Z., ELKATATNY, S., MAHMOUD, M. & ABDULRAHEEM, A. A holistic approach to develop new rigorous empirical correlation for static Young's modulus. SPE, 2016. p. 2.

Donde:

Est = Módulo de Young estático, [GPa].

Edyn = Módulo de Young dinámico, [GPa].

Ecuación 8. Módulo de Young estático (Wang -2000-).

$$E_{st}=1,26 \cdot E_{dyn} - 15,2$$

Fuente: TARIQ, Z., ELKATATNY, S., MAHMOUD, M. & ABDULRAHEEM, A. A holistic approach to develop new rigorous empirical correlation for static Young's modulus. SPE, 2016. p. 2.

Donde:

Est = Módulo de Young estático, [GPa].

Edyn = Módulo de Young dinámico, [GPa].

Ecuación 9. Módulo de Young estático (Canady -2011-).

$$E_{st} = \frac{\ln[(E_{dyn} + 1) * (E_{dyn} - 2)]}{4,5}$$

Fuente: TARIQ, Z., ELKATATNY, S., MAHMOUD, M. & ABDULRAHEEM, A. A holistic approach to develop new rigorous empirical correlation for static Young's modulus. SPE, 2016. p. 2.

Donde:

E_{st} = Módulo de Young estático, [GPa].

E_{dyn} = Módulo de Young dinámico, [GPa].

2.3.2 Resistencia a la compresión no confinada (UCS). Al valor de esfuerzo en el que la roca cambia de comportamiento dúctil a comportamiento frágil en un núcleo donde únicamente se aplica una carga axial, se le denomina resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS por sus siglas en inglés), es decir, la UCS (también denominado σ_c) representa el punto máximo de compresión a partir de la cual la roca va a empezar a fracturarse en un ambiente en el cual solo se le aplique esfuerzo axial¹⁹.

Existen diferentes relaciones para determinar este parámetro, las cuales han sido determinadas empíricamente para diferentes litologías en diferentes regiones del mundo, a continuación se muestran las relaciones para UCS de areniscas (**Tabla 5**) y arcillas (**Tabla 6**):

Tabla 5. Relaciones empíricas entre UCS y otras propiedades físicas de las areniscas.

Ec.	UCS	Región	Autor
1	$0,035 \cdot V_p - 31,5$	Thuringia, Alemania.	Freyburg. 1972.
2	$1200 \exp(-0,036 \cdot \Delta t)$	Bowen Basin, Australia.	McNally. 1987.
3	$1,4138 \times 10^7 \cdot \Delta t^3$	Costa del Golfo.	Inédito.
4	$3,3 \times 10^{-20} \cdot \rho^2 \cdot V_p^2 \cdot \left[\frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \right]^2 \cdot (1-2\nu) \cdot (1+0,78 \cdot V_{sh})$	Costa del Golfo.	Fjaer, Holt et al. 1992.
5	$1,745 \times 10^{-9} \cdot \rho \cdot V_p^2 - 21$	Cook Inlet, Alaska.	Moos, Zoback et al. 1999.
6	$42,1 \exp(1,9 \times 10^{-11} \cdot \rho \cdot V_p^2)$	Australia.	Inédito.
7	$3,87 \exp(1,14 \times 10^{-10} \cdot \rho \cdot V_p^2)$	Golfo de México.	Inédito.
8	$46,2 \exp(0,000027 \cdot E)$	-	Inédito.
9	$277 \exp(-10 \cdot \Phi)$	-	Inédito.

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 113.

¹⁹ Ibid., p. 86.

Tabla 6. Relaciones empíricas entre UCS y otras propiedades físicas de las arcillas.

Ec.	UCS	Región	Autor
1	$0,77*(304,8/\Delta t)^{2,93}$	Mar del Norte.	Horsrud. 2001.
2	$0,43*(304,8/\Delta t)^{3,2}$	Golfo de México.	Inédito.
3	$1,35*(304,8/\Delta t)^{2,6}$	Globalmente.	Inédito.
4	$0,5*(304,8/\Delta t)^3$	Golfo de México.	Inédito.
5	$10*(304,8/\Delta t-1)$	Mar del Norte.	Lal. 1999.
6	$0,0528*E^{0,712}$	-	Inédito.
7	$1,001*\Phi^{-1,143}$	-	Lashkaripour & Dusseault. 1993.
8	$2,922*\Phi^{-0,96}$	Mar del Norte.	Horsrud. 2001.
9	$0,286*\Phi^{-1,762}$	-	Inédito

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 114.

Donde:

UCS = Resistencia a la compresión no confinada, [MPa].

Vp = Velocidad de la onda compresional, [m/s].

Δt = Tiempo de tránsito, [μ s/ft].

ρ = Densidad de la roca, [kg/m^3].

Vsh = Volumen de arcilla (*shale*), [fracción].

E = Módulo de Young dinámico, [MPa].

Φ = Porosidad, [fracción].

2.3.3 Ángulo o Coeficiente de Fricción Interna (μ_i). El coeficiente de fricción interna corresponde a la relación entre vector normal y vector de corte a la cual ocurriría el desplazamiento de la fractura, es decir corresponde a la pendiente de una línea recta en el plano σ , τ . Ésta relación normalmente es de valor (0,6), ya que ésta relación aplica de buena forma para la evaluación de éste criterio²⁰. Sin embargo, para su determinación más exacta, se establecieron las correlaciones de la **Tabla 7**.

²⁰ Ibid., p. 89.

Tabla 7. Ecuaciones para determinar ángulo de fricción interna en función de la litología.

μ_i (grados)	Litología
$\text{Seno}^{-1}\left(\frac{V_p-1000}{V_p+1000}\right)$	Arcilla
$57,8 - 105 * \emptyset$	Arenisca
$\text{Tan}^{-1}\left(\frac{(GR-GR_{arena}) * \mu_{arcilla} + (GR_{arcilla}-GR) * \mu_{arena}}{GR_{arcilla}-GR_{arena}}\right)$	Rocas sedimentarias arcillosas

Fuente: CHANG, Chandong; ZOBACK, Mark D.; KHAKSAR, Abbas. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, vol. 51, no 3, p.233.

Donde:

V_p = Velocidad compresional, [m/s.]

\emptyset = Porosidad, [fracción].

GR = Gamma Ray, [API].

μ = Ángulo de fricción interna, [grados].

2.3.4 Cohesión (So). También llamada resistencia cohesiva, es el intercepto de la envolvente de Mohr con el eje de corte (lo cual será explicado más adelante) y depende principalmente, como su nombre lo indica, de la unión de los granos, es decir, de que tan bien cementada esté la roca. Aunque también depende en menor medida del tipo de roca, las rocas bien cementadas tienen alta cohesión, mientras que el mismo tipo de roca pero con pobre cementación, mostrará una baja cohesión.

Debido a que la cohesión no es un parámetro que pueda medirse físicamente, es más común expresar la resistencia de la roca en términos de C_o , mediante la **Ecuación 10**²¹:

Ecuación 10. Relación entre Cohesión y UCS.

$$C_o = 2S_o[(\mu_i^2 + 1)^{1/2} + \mu_i]$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 89.

Donde:

C_o = Resistencia a la compresión sin confinamiento, [MPa].

S_o = Cohesión, [Mpa].

μ_i = Ángulo de fricción interna, [grados].

²¹ Ibid., p. 89.

2.3.5 Resistencia a la tensión. Este término, aunque hace parte de las propiedades mecánicas de las rocas, tiene poca importancia por varias razones: primero, la resistencia a la tensión en las rocas es muy baja, tan solo unos pocos MPa, además, cuando hay fallas preexistentes, su valor es prácticamente cero. Segundo, las rocas nunca se encuentran bajo esfuerzos de tensión, únicamente actúan sobre ellas esfuerzos compresivos.

A pesar de esto, en ciertos escenarios específicos, se pueden presentar fracturas tensiles en la pared del pozo, de hecho las fracturas hidráulicas son ejemplo de estas, sin embargo, estos efectos solo son tenidos en cuenta en el momento de hacer una operación de fracturamiento hidráulico, mas no durante una operación de perforación.

2.4 DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES

La determinación de los esfuerzos principales es el primer paso para el desarrollo de este proyecto, pues ellos son parte clave del modelo geomecánico del pozo, además conociendo su magnitud se puede hallar el vector resultante de la unión de los tres, para más adelante introducirlos a los planos de fractura y observar como las afectan, para con esto saber cuáles se encuentran en estado crítico de esfuerzos y cuáles no.

2.4.1 Determinación del esfuerzo vertical. El esfuerzo vertical es el esfuerzo debido a la roca suprayacente al punto en el cual se va a determinar dicho esfuerzo, y es debido a la presión litostática. Para determinar el valor del esfuerzo vertical, se debe utilizar la información de un registro de densidad, aplicando la **Ecuación 11**.

Ecuación 11. Definición Matemática del Esfuerzo de Sobrecarga.

$$S_v = k \int_0^z (\rho_b(z) * g) dz$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 8.

Donde:

S_v = Esfuerzo vertical, [psi].

ρ_b = Bulk Density obtenida del registro de densidad, [g/cm³].

g = Constante de aceleración de la gravedad.

z = Profundidad del registro, [pies].

k = Factor de conversión para determinar el esfuerzo en psi.

Sin embargo, en los casos Donde no hay suficiente información, cómo regla general el gradiente del esfuerzo vertical es cercano a 1 psi/ft.

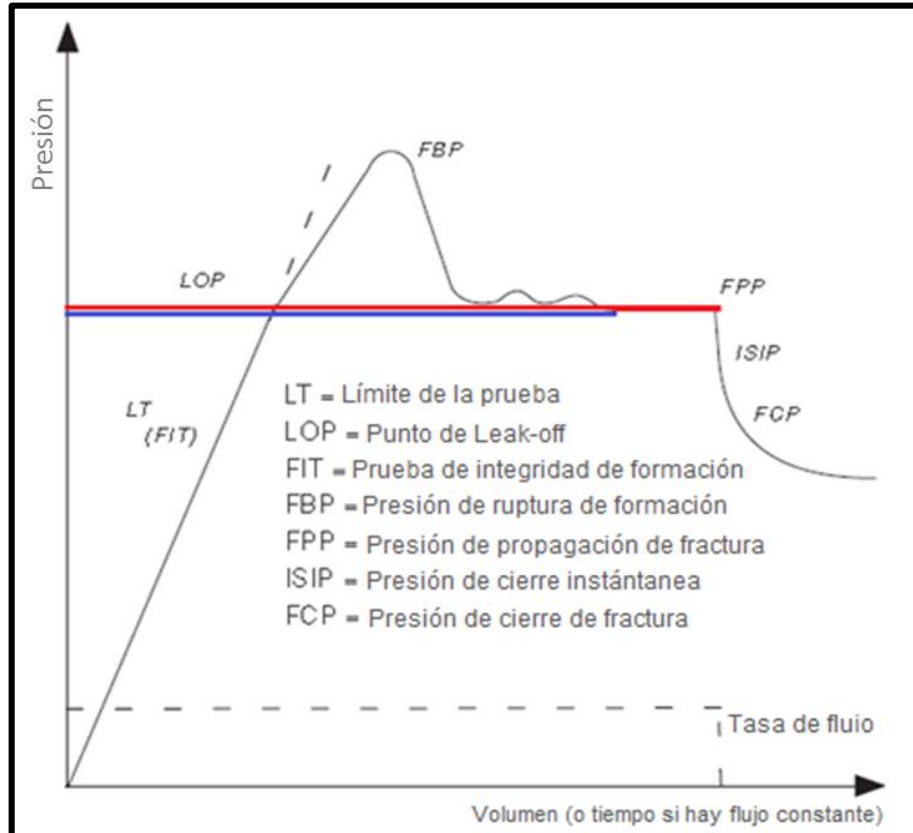
2.4.2 Determinación del esfuerzo horizontal mínimo. El esfuerzo horizontal mínimo se determina a partir de la prueba *Leak Off Test*, la cual consiste en un aumento de la presión en fondo utilizando bombas en superficie, donde se afecta la concentración del esfuerzo alrededor del pozo y se induce una fractura la cual se propaga hidráulicamente, perpendicular al menor esfuerzo presente en el sitio (Esfuerzo Horizontal Mínimo para el caso de pozos verticales), donde la presión de propagación corresponde a dicho esfuerzo horizontal mínimo.

Ésta figura corresponde a un *Leak Off Test* Extendido, el cual es la prueba idónea para la determinación del esfuerzo horizontal mínimo, ya que la prueba permite determinar la presión de propagación de fractura (presión correspondiente al valor del esfuerzo horizontal mínimo); pero por cuestiones de tiempo de duración de la prueba y de costos ésta prueba no se realiza en su totalidad, y únicamente se realiza la parte inicial de la prueba, hasta cuando se observa el *leak off point* (LOP), el cual corresponde a una aproximación -de la presión de propagación de fractura y por ende una aproximación al valor del esfuerzo horizontal mínimo, cómo se muestra en la Figura 10.

Luego de tener los datos de presión de fractura (LOP), provenientes de los *Leak Off Test* realizados a diferentes profundidades, se debe realizar una regresión con el fin de determinar el gradiente del esfuerzo horizontal máximo según lo muestra el trabajo “Desarrollo de una metodología general para el cálculo de esfuerzos in-situ en formaciones productoras de hidrocarburos”.

2.4.3 Determinación del esfuerzo horizontal máximo. Según Padilla Jorge y Badrán Nafis la determinación del Esfuerzo Horizontal Máximo es una tarea complicada, para la cual no existe una metodología en particular, y por el contrario; existen diferentes formas de determinarlo cómo lo son el uso de correlaciones y fenómenos debido a la distribución de los esfuerzos en el wellbore cómo lo son los breakouts, las fracturas inducidas por tensión y el efecto termal en el wellbore.

Figura 10. Prueba de *Leak Off Test* Extendido.



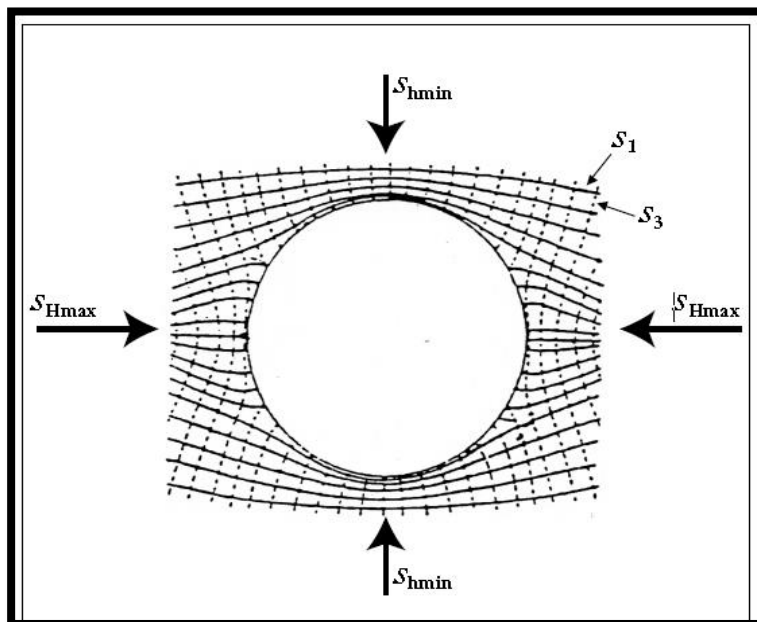
Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 211.

Para ello hay que tener ciertas consideraciones acerca de los esfuerzos en la cara del pozo, los cuales son el esfuerzo tangencial, el esfuerzo radial y el esfuerzo axial y están definidos por las ecuaciones de Kirsch.

A estos esfuerzos reorientados se les llama radial, tangencial y axial debido a la forma como están actuando sobre las paredes del pozo. Gráficamente estos esfuerzos se observan cómo lo muestra la **Figura 12** los cuales están relacionados con la presión hidrostática o (HSP por sus siglas en inglés), la cual contrarresta dichos esfuerzos.

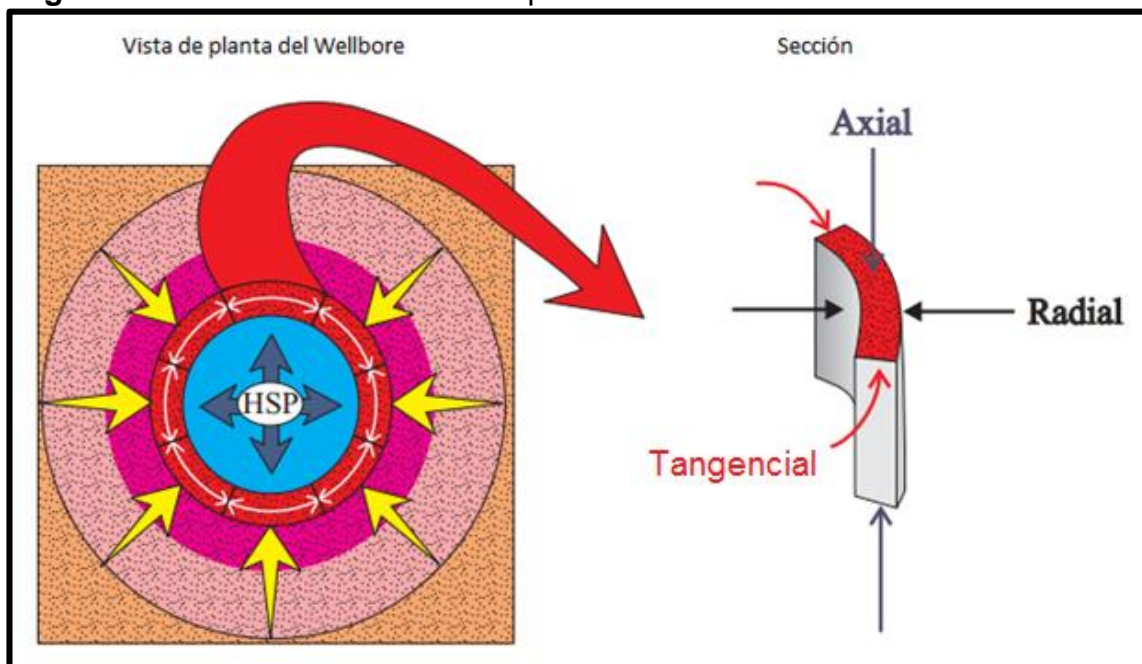
2.4.4 Esfuerzos en el Wellbore. Debido a que las propiedades físicas del fluido, no son iguales a las del material retirado, se genera una redistribución de esfuerzos en la cara del pozo (wellbore) cómo se muestra en la **Figura 11**. Los cuales se materializan básicamente mediante los breakouts y las fracturas inducidas por tensión.

Figura 11. Redistribución de Esfuerzos en el Wellbore.



Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 169.

Figura 12. Esfuerzos en la cara del pozo.



Fuente: AMOCO. Wellbore Stability, Drilling Handbook. Sección 3, p.1. [Consultado el 05/10/2016]. Disponible en Internet: <http://dl.iranrig.com/ebook/Amoco%20-%20Wellbore%20Stability.pdf>

Estos esfuerzos están definidos por las ecuaciones de Kirsch, ampliamente conocidas en la literatura las cuales se pueden ver a continuación:

Ecuación 12. Esfuerzo radial en el pozo.

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2}(\text{SHmax} + \text{Shmin} - 2\text{Pp}) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\text{SHmax} - \text{Shmin}) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) + \Delta P \frac{a^2}{r^2}$$

Fuente: TORRES, M. E. & GONZALEZ, A. J. (2003). In- Situ Stress State Eastern Cordillera (Colombia). Society of Petroleum Engineers. SPE 81074. p. 3.

Ecuación 13. Esfuerzo tangencial en el pozo.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2}(\text{SHmax} + \text{Shmin} - 2\text{Pp}) * \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\text{SHmax} - \text{Shmin}) * \left(1 - 3\frac{a^4}{r^4}\right) * \cos(2\theta) + \Delta P * \frac{a^2}{r^2}$$

Fuente: TORRES, M. E. & GONZALEZ, A. J. (2003). In- Situ Stress State Eastern Cordillera (Colombia). Society of Petroleum Engineers. SPE 81074. p. 3.

Ecuación 14. Esfuerzo axial en el pozo.

$$\sigma_{r\theta} = -\frac{1}{2}(\text{SHmax} + \text{Shmin} - 2\text{Pp}) * \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) * \text{Seno}(2\theta)$$

Fuente: TORRES, M. E. & GONZALEZ, A. J. (2003). In- Situ Stress State Eastern Cordillera (Colombia). Society of Petroleum Engineers. SPE 81074. p. 3.

Donde:

σ_{rr} = Esfuerzo radial en el pozo, [psi].

$\sigma_{\theta\theta}$ = Esfuerzo tangencial en el pozo, [psi].

$\sigma_{r\theta}$ = Esfuerzo axial en el pozo, [psi].

SHmax = Esfuerzo horizontal máximo, [psi].

Shmin = Esfuerzo horizontal mínimo, [psi].

Pp = Presión de poro, [psi].

a = radio del pozo, [ft].

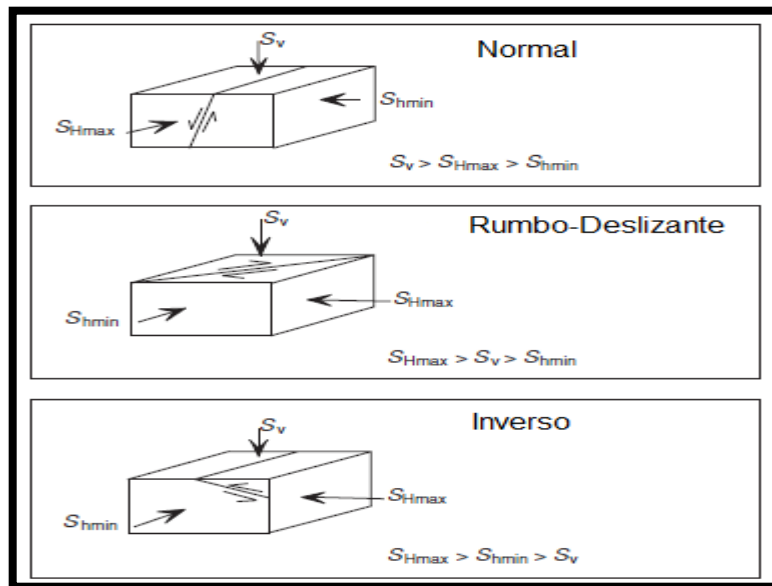
r = distancia del centro del pozo al punto de análisis, [psi].

θ = dirección del esfuerzo horizontal máximo, [grados].

2.5 REGÍMENES DE ESFUERZOS

Considerando la magnitud de los tres esfuerzos principales A.M. Anderson propuso tres diferentes regímenes de esfuerzos dependiendo de cual sea el predominante, estos se pueden ver en la **Figura 13**.

Figura 13. Regímenes de Esfuerzos.



Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 9.

Dichos regímenes corresponden a los regímenes normal, rumbo deslizante (también llamado transcurrente) e inverso; los cuales se evidencian según el orden de los esfuerzos cómo muestra la figura anterior.

Estos regímenes brindan una orientación de las direcciones óptimas de perforación y permiten además determinar qué tipo de fallas se van a generar o se están dando en la zona, mas no entender los paleoesfuerzos; por lo cual las fallas que se encuentran presentes pueden corresponder a un estado de esfuerzos anterior y no al actual.

2.6 LÍMITES SOBRE EL ESFUERZO DE LOS VALORES DE ESFUERZOS

La teoría de resistencia friccional propone que existen ciertos límites sobre la magnitud de los esfuerzos según el tipo de régimen que se presenta en la corteza.

Estas magnitudes están dadas para el régimen normal por la **Ecuación 15**; para el régimen rumbo-deslizante por la **Ecuación 16**, y para el régimen inverso por la **Ecuación 17** presentadas a continuación:

Ecuación 15. Limite friccional para el régimen normal

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_v - P_p}{Sh_{min} - P_p} \leq [(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu]^2$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 133.

Donde:

S_v = Esfuerzo vertical [psi].

Sh_{min} = Esfuerzo horizontal mínimo [psi].

P_p = Presión de poro [psi].

μ = Ángulo de fricción interna (típicamente 0.6) [adimensional].

Ecuación 16. Limite friccional para el régimen rumbo-deslizante

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{SH_{max} - P_p}{Sh_{min} - P_p} \leq [(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu]^2$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 133

Donde:

SH_{max} = Esfuerzo horizontal máximo [psi].

Sh_{min} = Esfuerzo horizontal mínimo [psi].

P_p = Presión de poro [psi].

μ = Ángulo de fricción interna (típicamente 0.6) [adimensional].

Ecuación 17. Limite friccional para el régimen inverso

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{SH_{max} - P_p}{S_v - P_p} \leq [(\mu^2 + 1)^{\frac{1}{2}} + \mu]^2$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 133.

Donde:

S_v = Esfuerzo vertical [psi].

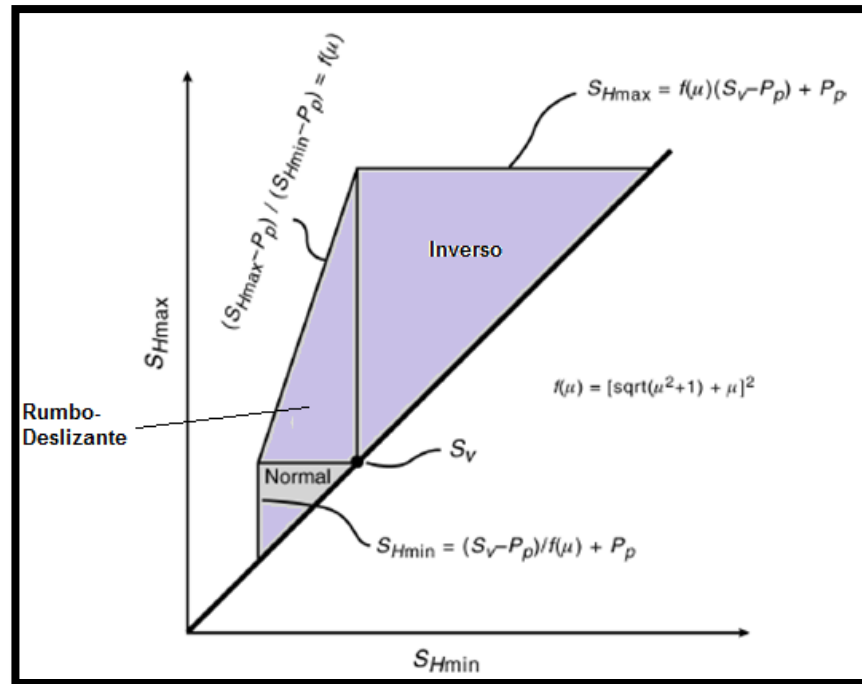
SH_{max} = Esfuerzo horizontal máximo [psi].

P_p = Presión de poro [psi].

μ = Ángulo de fricción interna (típicamente 0.6) [adimensional].

Con base en lo anterior, es posible generar un polígono con el fin de aproximarse a la magnitud del esfuerzo horizontal máximo cómo muestra la **Figura 14**

Figura 14. Construcción del polígono de esfuerzos.



Fuente: SPE. Petroleum Engineering handbook Vol 2. p. 12.

En cuanto a la construcción de éste polígono, ésta se realiza con las ecuaciones anteriormente presentadas, y teniendo en cuenta que no existen valores por debajo de la línea de 45°, ya que debajo de esta línea el esfuerzo horizontal mínimo sería mayor que el esfuerzo horizontal máximo lo cual no es posible por definición de dichos esfuerzos²².

Además, para determinar el esfuerzo horizontal máximo, se debe hacer uso del esfuerzo horizontal mínimo y las deformaciones que se generan en el pozo (breakouts y fracturas inducidas), cómo se muestra en el desarrollo del objetivo 2 (construcción del modelo geomecánico).

2.7 PRESIÓN DE PORO

Según el Doctor Mark Zoback, la presión de poro se define como la magnitud del potencial hidráulico actuando en un espacio poroso interconectado a cierta profundidad, con referencia a la superficie²³, pero se puede entender mejor cómo la presión que tiene el fluido contenido en el espacio poroso interconectado, la cual es

²² Ibid., p. 133.

²³ Ibid., p. 27.

mayor a la presión hidrostática, debido a los esfuerzos, la carga litostática y el confinamiento al que ha sido sometida la roca que contiene dicho fluido.

Se debe tener en cuenta la presión de poro pues es la que representa esfuerzos de tensión en un ambiente compresivo, esto se debe a que los fluidos presentes en el interior de las rocas tienden a empujar en sentido contrario al esfuerzo que reciben, lo que de cierta forma hace perder impacto a los esfuerzos principales y lo que realmente se tiene en cuenta es la diferencia que existe entre cada esfuerzo principal y la presión de poro. Es importante resaltar además, que la presión de poro debe ser menor a la del esfuerzo mínimo, de lo contrario la roca sufriría una especie de auto-fracturamiento hidráulico.

2.7.1 Determinación de la Presión de Poro. Para la determinación de la presión de poro, se debe tener en cuenta la presión hidrostática generada por el fluido almacenado en el espacio poroso de la roca suprayacente, ya que éste valor de presión hidrostática se requiere para determinar la presión de poro, basado en mediciones geofísicas como lo son el registro sísmico o registro de resistividad; ya que mediante el tiempo de tránsito de una onda o mediante un registro sísmico sintético (registro sísmico obtenido a partir de un registro de resistividad) se puede obtener el valor de presión de poro a diferentes profundidades.

Para obtener la presión de poro existen varios métodos, pero el método más aceptado por su sencillez y precisión es el método de Eaton, con el cual a partir de un registro sísmico se puede obtener el valor de presión de poro mediante la **Ecuación 18**:

Ecuación 18. Presión de Poro Mediante Ecuación de Eaton.

$$P_p = S - (S - P_{hyd}) * \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{log}}\right)^n$$

Fuente: PETROWIKI. Métodos para determinar la presión de poro. [Consultado el 05/10/2016]. Disponible en: http://petrowiki.org/Methods_to_determine_pore_pressure

Donde:

P_p = Presión de poro, [psi].

S = es el esfuerzo principal (Esfuerzo vertical normalmente), [psi].

P_{hyd} = corresponde a la presión hidrostática del fluido que almacena la roca, [psi].

ΔT_n = tiempo de tránsito normal para cada formación, [psi].

ΔT_{log} = tiempo registrado por la herramienta a cada profundidad, [psi].

n = Exponente de ajuste con valor usualmente 3.

Los exponentes mostrados en la ecuación son valores típicos que usualmente cambian dependiendo de la región, para ajustar la predicción de acuerdo a presión de poro inferida de otros valores.

En cuanto a la determinación de la presión hidrostática, ésta se determina a la profundidad deseada mediante la **Ecuación 19**:

Ecuación 19. Ecuación de presión hidrostática para el método de Eaton.

$$P_{hyd} = \int_0^z \rho_w(z) * g * dz \approx \rho_w * g * z_w$$

Fuente: PETROWIKI. Métodos para determinar la presión de poro. [citado octubre 5, 2016] Disponible en Internet: http://petrowiki.org/Methods_to_determine_pore_pressure

Donde:

P_{hyd} = Presión hidrostática, [psi].

ρ_w = Densidad del agua, [lb/ft³].

g = Gravedad, [ft/s²].

z_w = Profundidad, [ft].

Para la ecuación de Eaton también existe una metodología que utiliza el registro de resistividad profunda, la cual se utiliza en caso de no haber registro sínico, la correlación usada se puede ver en la **Ecuación 20**.

Ecuación 20. Presión de poro mediante ecuación de Eaton-Resistividad.

$$P_p = S - (S - P_{hyd}) * \left(\frac{R_{log}}{R_n}\right)^{1.2}$$

Fuente: PETROWIKI. Métodos para determinar la presión de poro. [citado octubre 5, 2016] Disponible en Internet: http://petrowiki.org/Methods_to_determine_pore_pressure

Donde:

S = Típicamente S_v , [psi].

P_{hyd} = Presión hidrostática, [psi].

R_{log} = Resistividad medida por el registro, [Ω .m].

R_n = Resistividad normal, [Ω .m].

En cuanto a la determinación de la resistividad normal ésta es la tendencia de resistividad de la formación, la cual usualmente se determina mediante la **Ecuación 21**.

Ecuación 21. Tendencia de Resistividad.

$$R_n = R_0 * e^{-bz}$$

Fuente: PETROWIKI. Metodos para determinar la presión de poro. [Consultado el 05/10/2016]. Disponible en Internet:http://petrowiki.org/Methods_to_determine_pore_pressure

Donde:

Rn = Resistividad normal, [Ω .m].

R0 = Resistividad en el mudline, [Ω .m].

b = Coeficiente de tendencia, [Adim].

z = Profundidad debajo del mudline, [ft].

2.7.2 Concepto de esfuerzo efectivo (σ).

El esfuerzo efectivo se define cómo el esfuerzo menos la presión de poro, y éste concepto corresponde a que los esfuerzos en la roca no los soporta solamente la matriz de la roca sino que también son soportados por el fluido en el espacio poroso de la roca, por lo cual el esfuerzo efectivo que soporta la matriz va a ser el esfuerzo menos la presión del fluido contenido en el espacio poroso; es decir la presión de poro.

Ecuación 22. Esfuerzo Efectivo.

$$(\sigma = S - \alpha * P_p)$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 65.

Donde:

σ = Esfuerzo Normal Efectivo [psi].

S = Esfuerzo normal [psi]

Pp= Presión de Poro, [psi].

α = Coeficiente de Biot, entre 0,8 y 1, [adimensional].

En cuanto al coeficiente de Biot, éste es un parámetro poroelástico éste mide la cantidad de esfuerzo que toma el fluido y depende de la relación entre los módulos elásticos de la roca y de la matriz. Para fines prácticos se puede considerar 1²⁴, aunque éste caso es el correspondiente al caso en el cual la roca es sólida, porosa y extremadamente plástica con una influencia de presión de poro.

²⁴ GALICIA MUÑOZ, Susana. Geomecánica aplicada a yacimientos naturalmente fracturados para determinación de compresibilidad de la formación. Tesis universitaria, 2009, p. 96.

En cuanto a los efectos de utilizar 1 como parámetro de Biot, es posible decir que se está teniendo un menor esfuerzo efectivo, ya que sobre el esfuerzo se está restando un 100% de la presión de poro y no un 80% como es el caso mínimo, lo que genera que los círculos de Mohr se acerquen más a la envolvente de falla, sin embargo por practicidad y según los parámetros que maneja Ecopetrol, se asume así, ya que éste es el caso más crítico de evaluación de fracturas críticamente esforzadas.

También, es válido afirmar que el coeficiente de Biot se toma como 1 ya que en el criterio se está evaluando en el plano de fractura, donde no hay matriz de roca, por lo cual asumir un valor determinado crearía incertidumbre.

2.8 DIAGRAMA DE MOHR-COULOMB

El diagrama de Mohr-Coulomb, el cual está basado en el círculo de Mohr, permite trasladar los esfuerzos de su condición de planos principales donde solo actúan los esfuerzos normales, a los planos en los que están orientadas las fracturas, para determinar cómo afectan los esfuerzos de corte a cada fractura lo cual determina su condición fractura críticamente esforzada o no.

2.8.1 Círculo de Mohr

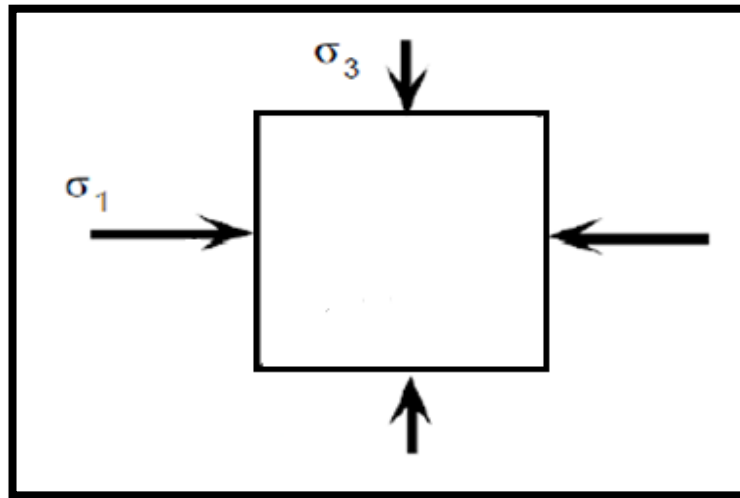
El círculo de Mohr es una representación del estado general de esfuerzos sobre un cuerpo y permite observar el estado de esfuerzos de forma gráfica sobre diferentes sistemas de referencia en un cuerpo, o en otras palabras, permite observar los diferentes estados de esfuerzo sobre un cuerpo determinado en diferentes planos; lo cual convierte al círculo de Mohr en un estado general de esfuerzos.

Antes de la época del desarrollo tecnológico y de los computadores resultaba bastante difícil realizar los cálculos de esfuerzos sobre distintos cuerpos, y debido a lo anterior Otto Mohr diseñó una herramienta gráfica la cual en la actualidad sigue siendo de gran ayuda para la observación y predicción de los estados de esfuerzo en diferentes cuerpos, dentro de ellos, la roca.

En la actualidad el círculo de Mohr sigue siendo una herramienta muy útil, ya que permite tener una representación gráfica del estado de esfuerzos cambiando el sistema de referencia, la cual permite evaluar los estados de forma intuitiva cómo conocer las direcciones principales.

Para entender un poco más el funcionamiento del círculo de Mohr se asume un cuerpo como lo muestra la **Figura 15**, el cual está sometido a dos esfuerzos principales (no se presentan esfuerzos de corte).

Figura 15. Esfuerzos principales sobre un cuerpo.



Fuente: VELANDIA P. Francisco A. Geología Estructura. UIS. Presentación.

Sobre éste se van a evaluar los esfuerzos sobre un plano cualquiera de estudio que corte el cuerpo, lo cual se puede realizar de forma matemática teniendo en cuenta el ángulo entre el esfuerzo principal mayor (σ_1) y las **Ecuaciones 23 y 24**:

Ecuación 23. Esfuerzo efectivo normal en el círculo de Mohr.

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\theta)$$

Fuente: JAEGER, J. C., COOK, N. G. W. & ZIMMERMAN, R. W. Fundamentals of rock mechanics. Blackwell publishing. 2007. p. 23.

Donde:

σ_n = Esfuerzo efectivo normal, [psi].

σ_1 = Esfuerzo máximo, [psi].

σ_3 = Esfuerzo mínimo, [psi].

Ecuación 24. Esfuerzo de corte en el círculo de Mohr.

$$\tau = \frac{\sigma_1}{2} \text{sen}(2\theta) - \frac{\sigma_3}{2} \text{sen}(2\theta)$$

Fuente: JAEGER, J. C., COOK, N. G. W. & ZIMMERMAN, R. W. Fundamentals of rock mechanics. Blackwell publishing. 2007. p. 23.

Donde:

τ = Esfuerzo de corte, [psi].

σ_n = Esfuerzo efectivo normal, [psi].

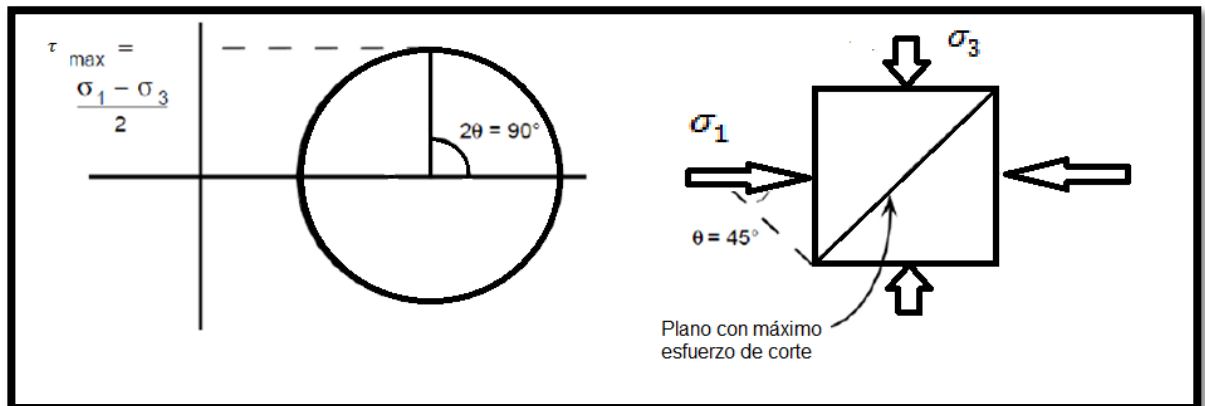
σ_1 = Esfuerzo máximo, [psi].

σ_3 = Esfuerzo mínimo, [psi].

Al realizar la representación gráfica de los planos con diferentes orientaciones, se llega a que estos puntos describen una circunferencia, lo cual se puede verificar sustituyendo los valores de esfuerzo normal y esfuerzo de corte, de tal forma que se encuentra una expresión que coincide con la ecuación canónica de la circunferencia.

Además, cómo se describió anteriormente; intuitivamente se puede evidenciar que el esfuerzo de corte máximo está presente cuando el ángulo entre el esfuerzo principal y el plano es 45° , cómo se observa en la **Figura 16**, ya que en el círculo de Mohr, si en la realidad el plano tiene inclinación Θ , en el círculo de Mohr su ubicación está a 2Θ , cómo se evidencia también en las ecuaciones anteriormente expresadas.

Figura 16. Círculo de Mohr para el Caso 45° .

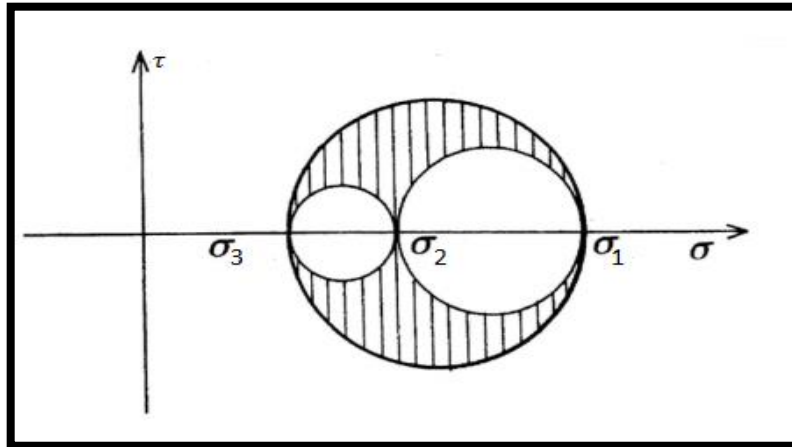


Fuente: VELANDIA P. Francisco A. Geología Estructural. UIS. Presentación.

2.8.2 Círculos de Mohr en 3D. La representación del estado de esfuerzos puede realizarse también en tres dimensiones, donde se van a presentar tres círculos cuyos esfuerzos normales sobre el eje horizontal son los valores de σ_1 , σ_2 y σ_3 , donde 1, 2 y 3 son los planos principales.

En general ésta representación va a permitir determinar el esfuerzo cortante máximo en el estado general de esfuerzos y permitirá identificar, al igual que en dos dimensiones, el estado de esfuerzos en un plano determinado que para el caso de las fracturas presentes en la tierra, estará en la región sombreada que muestra la **Figura 17**.

Figura 17. Círculos de Mohr-Coulomb en 3D.



Fuente: VELANDIA P. Francisco A. Geología Estructural. UIS. Presentación.

La deducción detallada del círculo de Mohr tanto en dos como tres dimensiones se encuentra especificada en el **ANEXO A**.

2.9 DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS NORMAL Y DE CORTE SOBRE EL PLANO DE FRACTURA

Para poder realizar la evaluación de fracturas críticamente esforzadas se requiere determinar los esfuerzos normal y de corte sobre el plano de fractura para lo cual se debe proyectar el tensor de esfuerzos respecto al plano, teniendo la orientación del plano y la orientación del esfuerzo horizontal máximo (usualmente es éste, aunque con la orientación del esfuerzo horizontal mínimo, también se puede ya que son ortogonales).

A pesar de que en el caso de la geomecánica se parte de planos principales, el análisis se realiza sobre planos no principales ya que éstos son el caso más general en la mecánica de materiales, donde los esfuerzos de corte serán 0, cómo se evidenciará en lo sucesivo de éste numeral.

2.9.1 Determinación del Vector normal al plano de fractura. Para ello se debe determinar el vector normal a la fractura (\hat{n}) mediante la **Ecuación 25**.

Ecuación 25. Determinación Vector Unitario Normal al Plano de Fractura.

$$\hat{n} = \begin{bmatrix} -\cos(S) \sin(D) \\ \cos(S) \sin(D) \\ -\cos(D) \end{bmatrix}$$

Fuente: PGE 334, THE UNIVERSITY OF TEXAS, AUSTIN. Reservoir geomechanics course (online).

Donde:

S = Rumbo de la fractura.

D = Buzamiento de la fractura.

Además, se tiene que los ejes cartesianos son: X positivo hacia el norte, Y positivo hacia el oriente y Z positivo hacia abajo.

Ya habiendo determinado el vector normal, se debe corregir dicha orientación respecto a la orientación de los esfuerzos principales, por lo cual se reemplaza Strike por el rumbo de la fractura menos la orientación del esfuerzo horizontal máximo (Strike-SHmax orientation), con el fin de que dicho vector normal esté orientado respecto a los ejes X: Dirección del Esfuerzo Horizontal máximo, Y: Dirección del esfuerzo horizontal mínimo y Z hacia abajo, en la dirección del esfuerzo vertical.

Luego de que se determina el vector normal a la fractura respecto a los esfuerzos principales, se debe determinar el vector de tracción actuante sobre el plano, el cual tiene su origen en la resultante del equilibrio de fuerzas, y se halla como dice la **Ecuación 26:**

Ecuación 26. Vector de tracción sobre el plano de fractura.

$$P_n = [S] \times \hat{n}$$

Fuente: JAEGER, J.C., COOK, N.G.W. & ZIMMERMAN, R.W. Fundamentals of rock mechanics. Blacwell Publishing. 2007. p. 18.

Donde:

P_n = Vector de tracción.

S = Tensor de esfuerzos.

\hat{n} = Vector normal unitario respecto a los esfuerzos principales.

Que expresado en su forma matricial corresponde a la **Ecuación 27.**

Ecuación 27. Forma Matricial del Vector de Tracción Sobre el Plano de Fractura.

$$\begin{bmatrix} P_{nx} \\ P_{ny} \\ P_{nz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_X & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_Y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{n}_x \\ \hat{n}_y \\ \hat{n}_z \end{bmatrix}$$

Fuente: Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 6.

Donde los subíndices X, Y y Z corresponden a las componentes en cada uno de los ejes.

2.9.2 Determinación de los Valores de Esfuerzos en el Plano de Fractura.

Luego de haber obtenido el vector de tracción, se obtiene mediante el producto punto entre el vector normal unitario y el vector de tracción la magnitud del esfuerzo normal sobre el plano de fractura, que corresponde a la Ecuación 28.

Ecuación 28. Determinación de la Magnitud del Esfuerzo Normal Sobre el Plano de Fractura.

$$\sigma_n = \hat{n} \cdot P_n$$

Fuente: JAEGER, J. C., COOK, N. G. W. & ZIMMERMAN, R. W. Fundamentals of rock mechanics. Blackwell publishing. 2007. p. 18.

Y posteriormente, aplicando el teorema de Pitágoras se obtiene la magnitud del vector de corte de acuerdo a la **Ecuación 29**.

Ecuación 29. Determinación de la Magnitud del Esfuerzo de Corte Sobre el Plano de Fractura.

$$|\tau|^2 = |P_n|^2 - |\sigma_n|^2$$

Fuente: JAEGER, J. C., COOK, N. G. W. & ZIMMERMAN, R. W. Fundamentals of rock mechanics. Blackwell publishing. 2007. p. 31.

Donde:

P_n = Vector de tracción.

\hat{n} = Vector normal unitario respecto a los esfuerzos principales.

σ_n = Esfuerzo normal efectivo sobre el plano de fractura.

τ = Esfuerzo de corte sobre el plano de fractura.

X, Y, Z = Ejes cartesianos.

Estos valores corresponden a los valores de esfuerzo normal y esfuerzo de corte sobre el plano de fractura, punto que se va a evaluar en el diagrama de Mohr-Coulomb, con el fin de observar si es una fractura críticamente esforzada.

2.10 FRACTURAS CRÍTICAMENTE ESFORZADAS

Son aquellas fracturas que debido a su orientación con respecto a los esfuerzos principales, están favorablemente orientadas a fallar (que haya deslizamiento).

Estas fracturas exhiben unas buenas características de conductividad hidráulica, por lo cual su identificación es esencial para el óptimo desarrollo de un campo desde la planeación de los pozos hasta la estimulación de los mismos²⁵.

En este caso es útil identificarlas, pues si en realidad presentan buena conductividad hidráulica, esta no sólo se verá reflejada en la producción del yacimiento, sino que también va favorecer que los fluidos de perforación escapen por estas fracturas.

2.10.1 Criterio de fracturas críticamente esforzadas. El criterio de fracturas críticamente esforzadas es un criterio el cual indica si las fracturas naturales están propensas a fallar, y del mismo modo indica si son hidráulicamente conductivas, cómo se mostró en su definición.

2.10.2 Envolvente de Falla. Corresponde a la línea recta generada a partir del coeficiente de fricción interna y la cohesión de las fracturas. Usualmente para la evaluación del criterio, la cohesión de las fracturas tiene un valor de cero (0) ya que la cohesión aplica es en los casos de material intacto, por lo cual el intercepto de la línea correspondiente a la envolvente de falla con el eje Y (τ) está en el origen del plano cartesiano.

Incluyéndose la cohesión de la fractura, se tiene que la envolvente de falla corresponde a la **Ecuación 30**.

Ecuación 30. Envolvente de Falla.

$$\tau = \mu\sigma_n$$

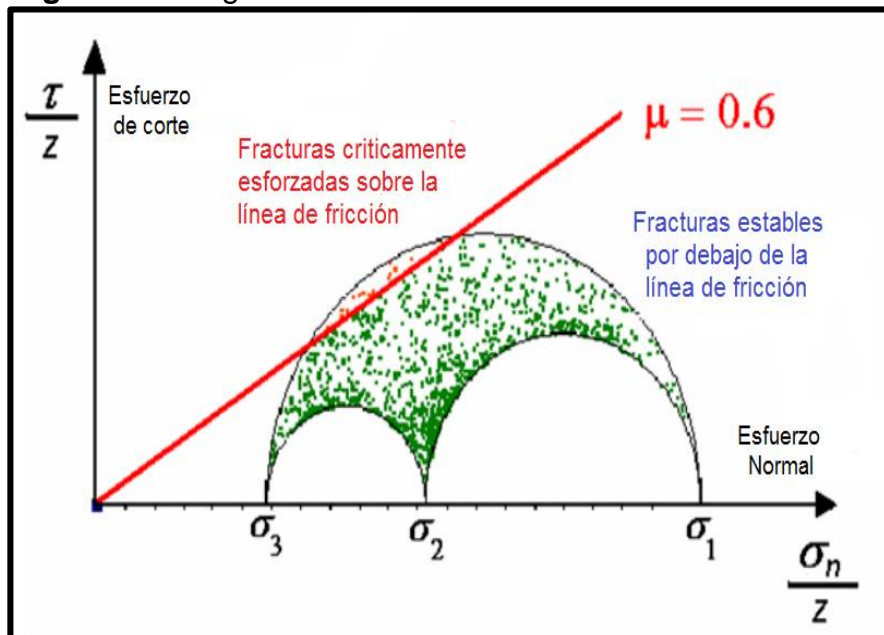
Fuente: FRANQUET, Javier Alejandro, et al. Critically-stressed fracture analysis contributes to determining the optimal drilling trajectory in naturally fractured reservoirs. En International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference, 2008. p. 6.

²⁵ TASK FRONTERA GEOSCIENCE. Critically Stressed Fractures. [Consultado el 30/05/2016]. Disponible en: <http://taskfronterra.com/wp-content/uploads/2014/12/Critically-Stressed-Fractures-Flyer-TFG.pdf>. Marzo 8 de 2016.

2.10.3 Evaluación del Criterio. Posteriormente a realizar el cálculo, se grafican dichas magnitudes de los vectores, en función de los tres esfuerzos principales en un diagrama de Mohr-Coulomb con el fin de evaluar el criterio de falla mediante el coeficiente de fricción de tal forma que se determinan como fracturas críticamente esforzadas aquellas fracturas que superan la envolvente de falla o el coeficiente de fricción de fracturas, cómo muestra la figura 6, donde los puntos de color rojo, corresponden a las fracturas críticamente esforzadas o que superan el coeficiente de fricción representado en la **Figura 18** por la línea roja con rótulo $\mu=0,6$.

2.10.4 Consideración de Margen de Presión. La recomendación del curso de geomecánica de Zoback, en su tarea alusiva a fracturas críticamente esforzadas es que se tome un intervalo de 1000 psi en consideración, lo que se traduce en otras palabras en que las fracturas que estén 1000 psi por debajo de la envolvente de falla o menos deben ser tenidas en cuenta a la hora de la evaluación de fracturas críticamente esforzadas.

Figura 18. Diagrama de Mohr-Coulomb en 3D normalizado.



Fuente: FRANQUET, Javier Alejandro, et al. Critically-stressed fracture analysis contributes to determining the optimal drilling trajectory in naturally fractured reservoirs. En *International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference, 2008.

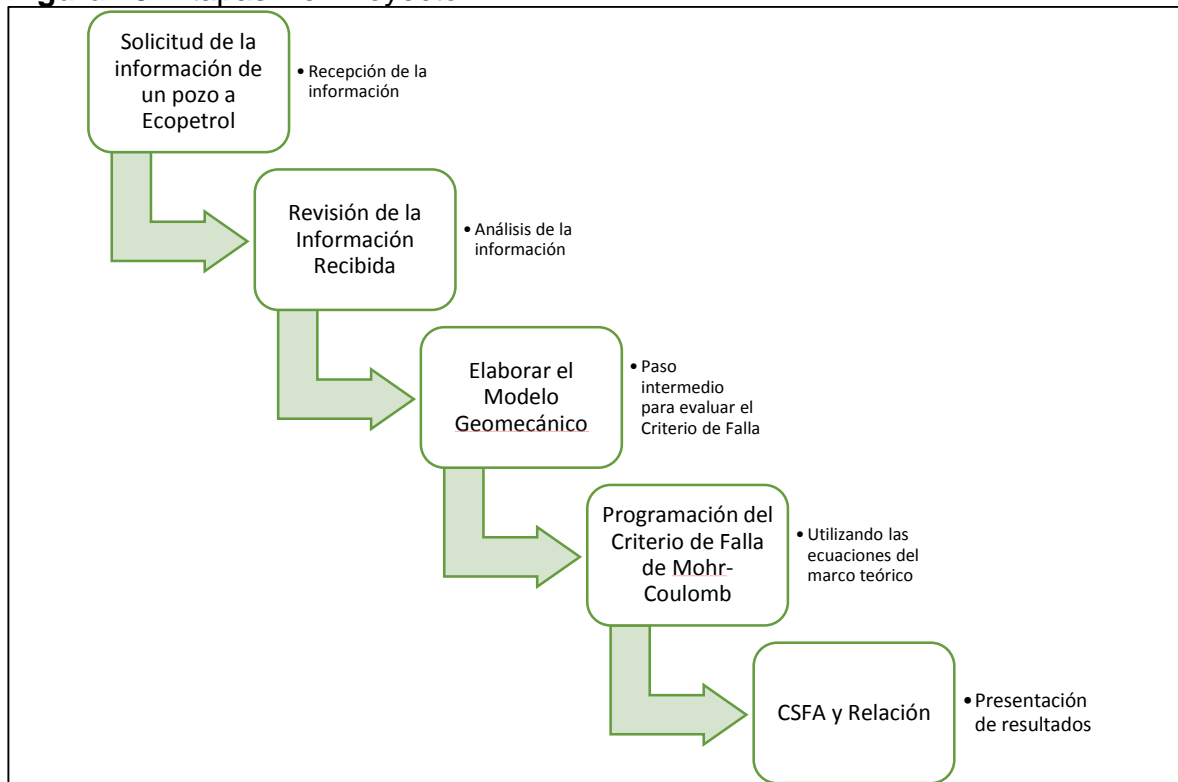
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En esta sección se detallan los criterios y variables que debía incluir el pozo suministrado por Ecopetrol S.A., para poder realizar un análisis de la información y posteriormente poder verificar la relación de las fracturas en estado crítico de esfuerzos con las pérdidas de circulación, o su ausencia.

Es por eso que en éste capítulo se realizará la presentación de cómo se realizó la investigación, a partir de que información se partió y que herramientas se utilizaron para el desarrollo del trabajo.

Para lo anterior se va a seguir un esquema con diferentes etapas, las cuales consten de lo siguiente:

Figura 19. Etapas Del Proyecto.



3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL POZO DE ESTUDIO

Únicamente se solicitó la información de un pozo cualquiera a Ecopetrol, el cual cuenta con cierta información necesaria para la realización del trabajo, de tal forma que para la selección del pozo objeto de estudio de este proyecto se tuvo en cuenta la información requerida con el fin de construir un modelo geomecánico, calibrarlo y poder realizar la evaluación de las fracturas críticamente esforzadas.

Inicialmente se tuvo en cuenta la información operacional, la cual es sumamente importante ya que permite identificar los puntos (profundidades) a las que hubo pérdidas de circulación, puntos apretados, pegas de tubería, intervalos de rimado (*backreaming*), zonas lavadas, cavernas y las condiciones de peso del lodo y densidad equivalente de circulación (ECD).

Además de la información operacional, se requirió contar con los registros eléctricos (Densidad y Sónico o Resistividad) con el fin de poder determinar el esfuerzo vertical y la presión de poro, respectivamente.

En cuanto a la orientación de las fracturas, éstas únicamente se observan a partir de registros de imagen, lo cual se convierte en un criterio más de selección del pozo; ya que se requiere que éste cuente con dicho tipo de registros.

En cuanto a la selección, se le solicitó a Ecopetrol un pozo que contara con los registros y datos anteriormente expuestos, y su información fue suministrada al cabo de que la empresa procesara la solicitud.

En resumen, la selección del pozo fue arbitraria y correspondió a un pozo seleccionado por el personal de Ecopetrol, pero teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Pozo que contara con información operacional especialmente de pérdidas de circulación.
- Pozo que contara con registros de imagen con interpretación de fracturas naturales.
- Pozo que mínimo contara con registros eléctricos de densidad, neutrón, gamma ray, resistividad y cáliper.

3.2 VARIABLES

Cómo variables de la investigación se tienen las siguientes:

3.2.1 Variable Independiente. Pérdidas de circulación, la cual se puede abordar desde el volumen de fluido perdido o la tasa de pérdida; lo cual está ligado a la precisión de la información operacional; ya que usualmente se cuantifica es el volumen perdido, y en menor cantidad de casos el tiempo que demora la pérdida para poder obtener la tasa de pérdida.

3.2.2 Variable dependiente. En la investigación se tiene cómo variable independiente la existencia de fracturas en estado crítico de esfuerzos (críticamente esforzadas) las cuales dependen de otras variables independientes como son: propiedades mecánicas de la roca, esfuerzos in situ y orientación de las fracturas. A pesar de que las fracturas críticamente esforzadas dependen de otras variables, con el fin de llevar a cabo ésta investigación se seleccionó cómo variable independiente; ya que lo que se busca identificar si existe una relación entre éste tipo de fracturas con las pérdidas de circulación.

3.3 HIPÓTESIS

De acuerdo con la literatura en general se pueden establecer diferentes causas probables a las pérdidas de circulación como son causas naturales o inducidas, las cuales están directamente relacionadas con las características de la roca y a la operación de perforación.

Dentro de las causas naturales está la presencia de fracturas naturales, las cuales según la teoría pueden ser o no hidráulicamente conductivas. Ésta conductividad hidráulica de dichas fracturas, está directamente relacionadas con aquellas fracturas que están próximas a fallar, según lo cual podrían estar directamente relacionadas con las pérdidas de circulación; situación que se pretende aborda en el trabajo.

3.4 RECOLECCIÓN DE DATOS

Inicialmente, los datos fueron suministrados por parte de Ecopetrol S.A., teniendo en cuenta los criterios que debía incluir el pozo y que posteriormente se usarían en el desarrollo del proyecto. Los archivos suministrados fueron registros eléctricos en formato de registros de pozo (.LAS) e informes en formato PDF fueron recopilados. Posteriormente se procedió a seleccionar y clasificar los datos necesarios en hojas de Excel para un desarrollo adecuado.

Respecto a la información recibida en formato PDF, corresponde a la prognosis geológica del pozo, estado mecánico final, perfil direccional, programa de perforación del clúster, interpretación de los registros de imágenes y reportes operacionales diarios de perforación.

3.5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Inicialmente se tabuló la información en Excel de los registros eléctricos con su respectiva TVD, con el fin de utilizarlos en lo requerido, cómo densidad en el esfuerzo de sobrecarga, resistividad en la presión de poro y porosidad en la tendencia de compactación.

Una vez recolectados los datos, se realizaron los diferentes cálculos de esfuerzos haciendo uso de la herramienta Excel, basados en las ecuaciones generales de la geomecánica para el cálculo de esfuerzos, presentadas en el marco teórico, según la información presentada, y en caso de no existir cierta información, ajustarlo según lo siguiente:

- **Presión de poro:** Ajustarla mediante datos de presión (MDTs) en diferentes puntos.
- **Esfuerzo vertical:** Al no presentarse registro de densidad hasta superficie, éste esfuerzo debe ajustarse mediante diferentes metodologías mostradas en el desarrollo del proyecto.
- **Esfuerzo horizontal mínimo:** Debe calcularse a partir de diferentes relaciones empíricas y ajustarse a partir de información de pérdidas de circulación.

Posteriormente se utilizó el registro de resistividad somera para generar un registro sísmico sintético y calcular las propiedades de la roca.

También, en ciertas oportunidades se utilizaron histogramas y gráficas de propiedades contra profundidad, con el fin de determinar tendencias, y valores representativos para diferentes propiedades y esfuerzos.

3.6 INTERPRETACIÓN DE DATOS

En cuanto a la presentación de resultados, en la geomecánica la forma de presentar los datos se realiza usualmente graficando propiedades contra profundidad; por lo cual usualmente los datos se procesan mediante gráficos de esfuerzo contra profundidad o presión contra profundidad, de forma similar a cómo se presentará en el proyecto.

También, se hicieron uso de diferentes herramientas como regresiones e histogramas de acuerdo a los requerimientos del proyecto.

4. CONSTRUCCIÓN Y AJUSTE DEL MODELO GEOMECÁNICO

Para la construcción del modelo geomecánico y la evaluación del estado de esfuerzos sobre las fracturas, se recibió la información de un pozo el cual únicamente tiene registros eléctricos en la fase de producción (Fase 8 ½ in), por lo cual la construcción del modelo se realizó para dicha fase y donde se requiere información de zonas sin registros, se hará uso de diferentes metodologías según aplique mejor basados en la información suministrada por Ecopetrol S.A.

Para lo anterior, se presentará un esquema del origen de la información y que se construye con ella, cómo muestran las figuras **Figura 20** y **Figura 21**.

Figura 20. Esquema de construcción modelo geomecánico parte 1.

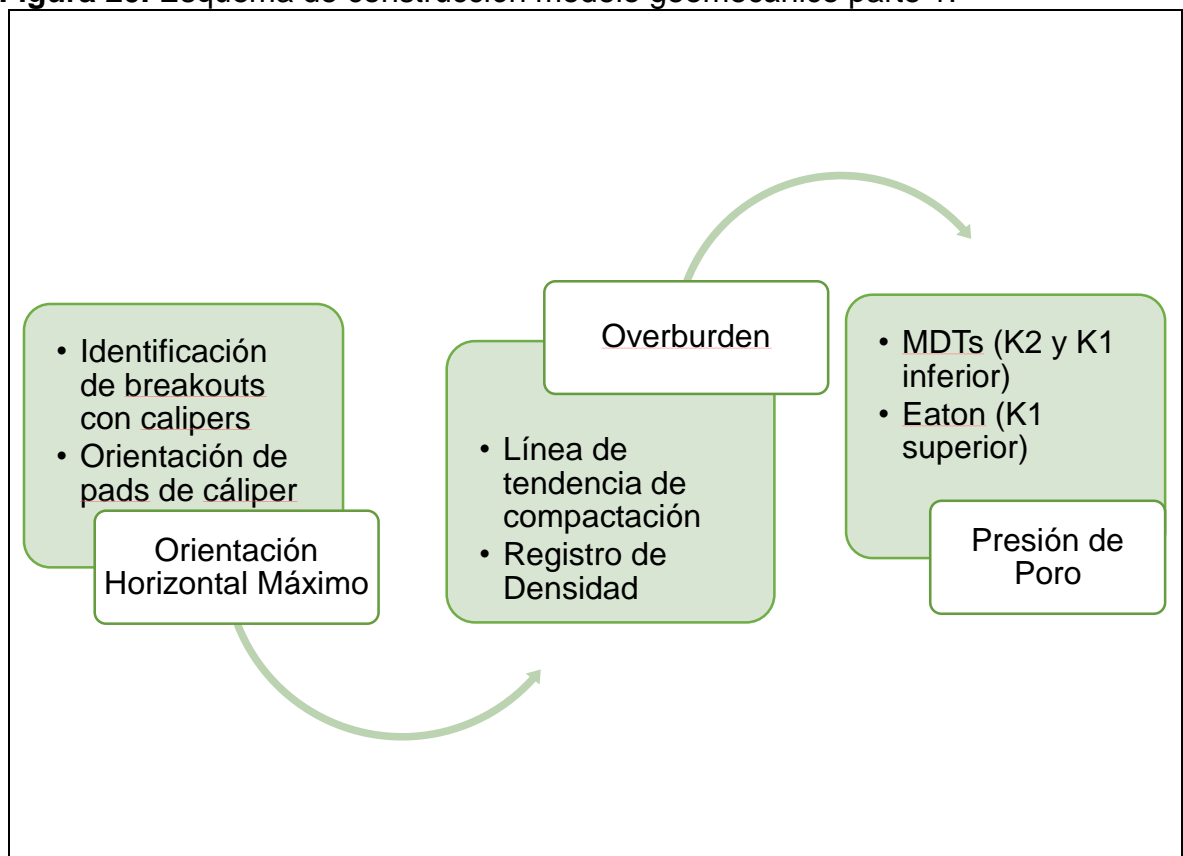
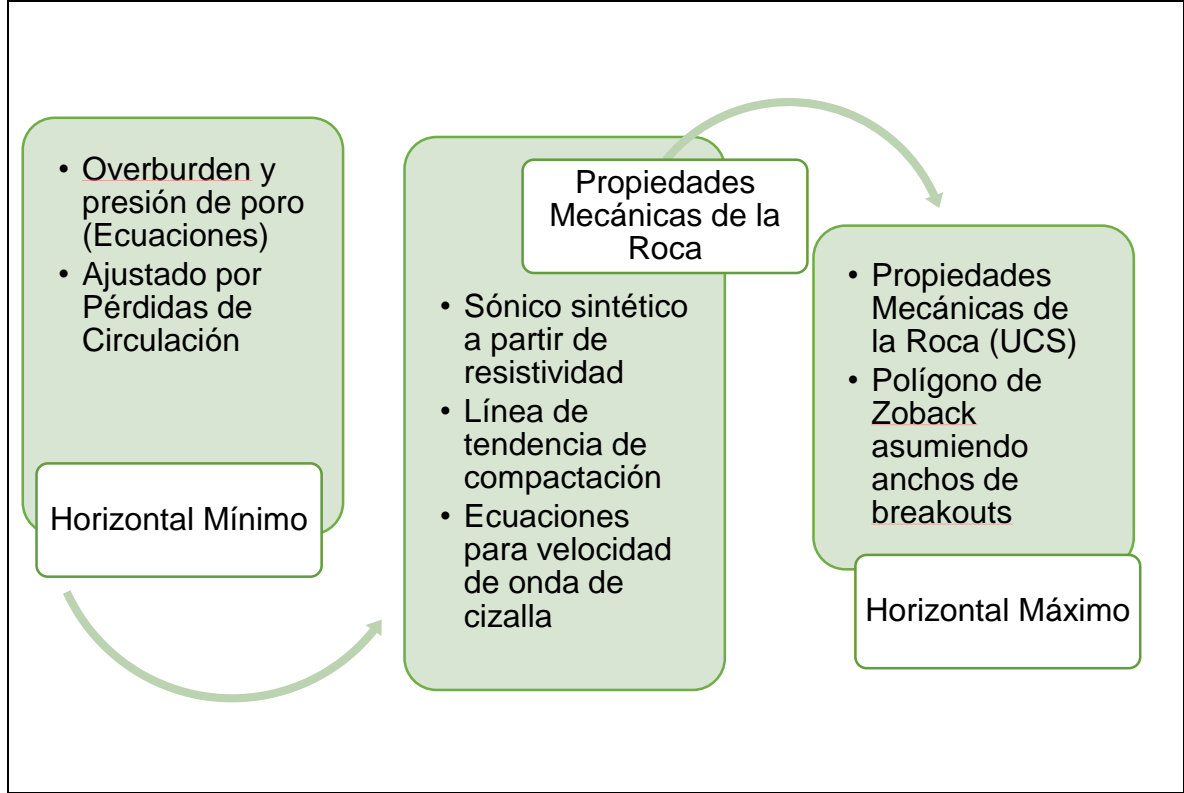


Figura 21. Esquema de construcción modelo geomecánico parte 2.



En las dos imágenes anteriores se observa los datos de entrada y la información que se requirió para construir el modelo geomecánico del pozo.

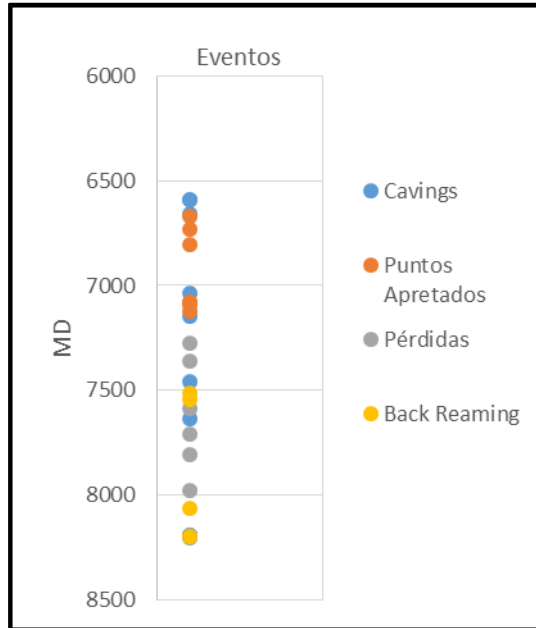
4.1 REVISIÓN DE EVENTOS OPERACIONALES

En la construcción de un modelo geomecánico los problemas operacionales resultan una herramienta importante, ya que ellos dan indicios del estado del pozo y por ende pueden ser un indicador geomecánico.

Usualmente, los eventos indicadores son: pérdidas de circulación, pegas de tubería, puntos apretados, cavernas, zonas lavadas, gas de viaje y gas de conexión. Para el caso del pozo que se trabajó, no se encontraron zonas lavadas, ni gas de viaje ni de conexión, dado que la zona es una zona de crudo pesado.

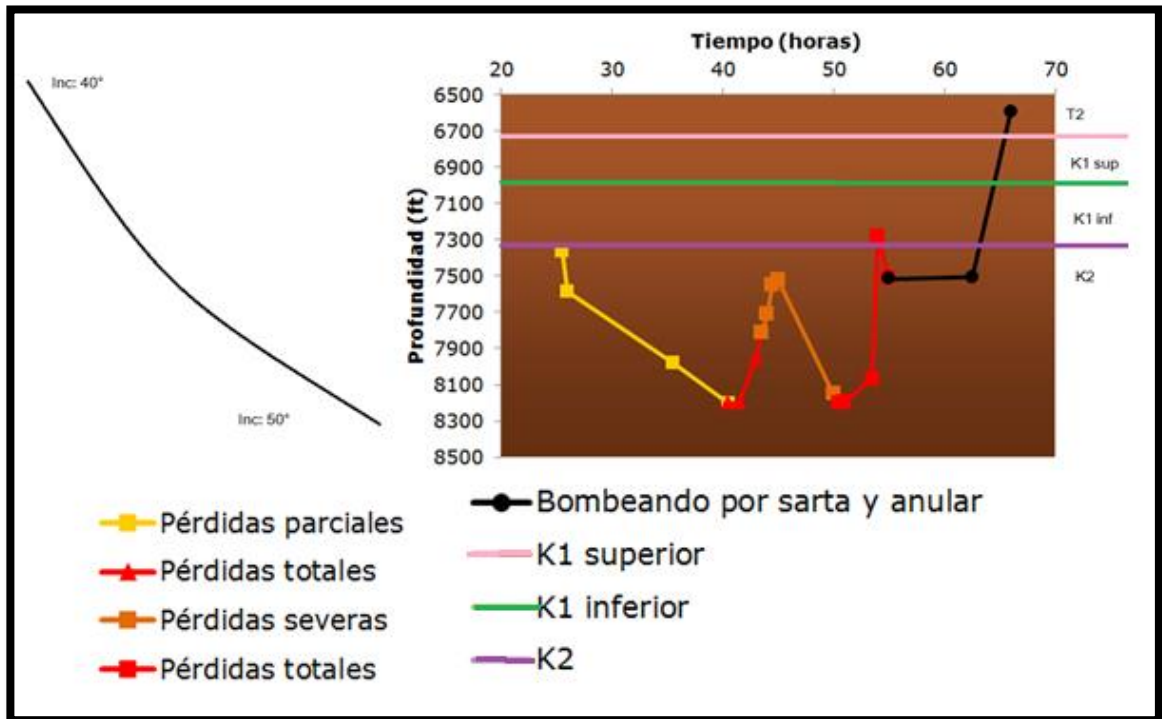
A continuación en la **Figura 22** se muestran gráficamente los eventos operacionales que se observaron en el pozo:

Figura 22. Eventos Operacionales Pozo.



De igual forma se graficó de manera que se pudiera observar el punto en el cual estaba la broca en la ocurrencia de los eventos de pérdidas en la **Figura 23** :

Figura 23. Eventos Operacionales de Pérdidas de Circulación.



En la **Figura 23** se observa la gráfica de los eventos operacionales, indicando la formación en la cual se encuentra y además la inclinación del pozo, ambos como herramienta para identificar las condiciones operacionales que se relacionan con las pérdidas de circulación y además importantes para el modelo geomecánico.

Lo destacable del gráfico anterior es que las pérdidas se generaron justo después de comenzar a perforar la Formación K2, y continuaron durante alrededor de 30 horas incluso con el uso de material de control de pérdida, lo cual significa que el estudio del estado de esfuerzos sobre las fracturas debe ser enfocado en gran medida a la unidad K2.

4.2 ORIENTACIÓN DEL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO

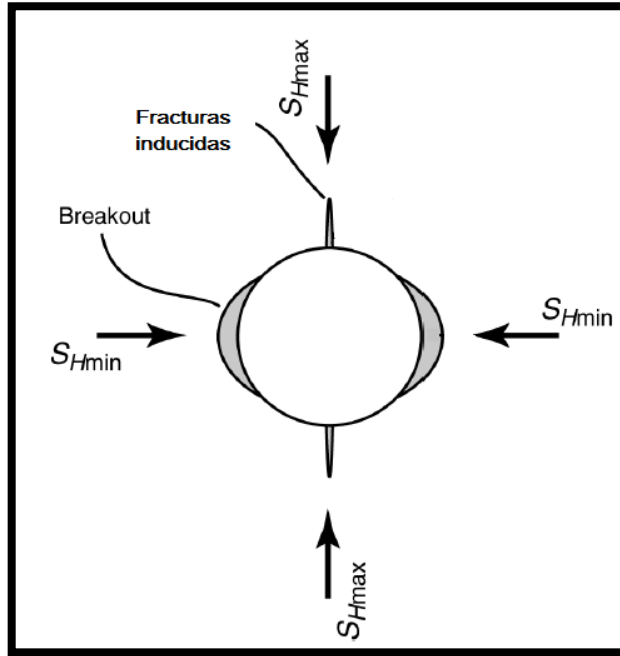
Tal como se mostró en el marco teórico, la cara del pozo al estar sometido a esfuerzos perpendiculares de diferentes magnitudes, se deforma presentando básicamente dos fenómenos, los cuales son fracturas inducidas (que no se propagan a menos que la presión hidrostática supere la magnitud del esfuerzo horizontal máximo) y breakouts.

Estos fenómenos se manifiestan principalmente en las arcillas y en rocas arcillosas y están en una posición donde las fracturas inducidas coinciden con la dirección del esfuerzo horizontal máximo y los breakouts coinciden con la orientación del esfuerzo horizontal mínimo, de tal forma que al conocer la orientación de éstos fenómenos, se conoce también la orientación de los esfuerzos. La **Figura 24** muestra lo anteriormente mencionado:

Para el caso de los pozos desviados se produce un fenómeno de fracturas inducidas consecutivas las cuales se denominan fracturas en echelon, pero no siempre son identificadas o mostradas por el registro de imagen, como es el caso de éste pozo, por lo cual se mostrará a continuación un análisis de cáliper para identificar la orientación de los breakouts y por ende la orientación de los esfuerzos.

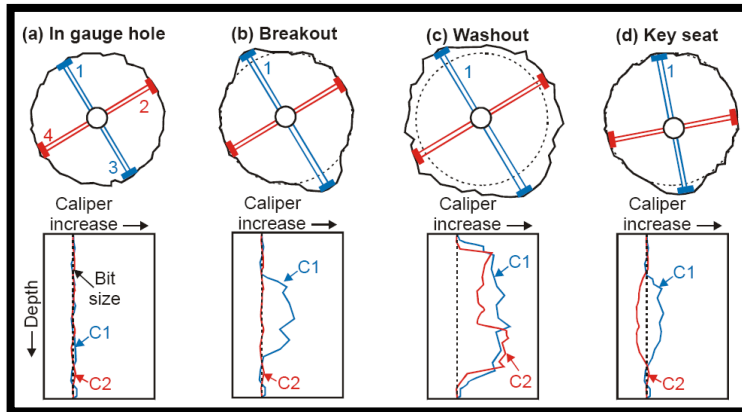
En cuanto a la identificación de deformaciones mediante el cáliper, existen ciertos patrones de comportamiento de éste registro que permiten identificar cuando existen estos breakouts, como lo muestra la **Figura 25**.

Figura 24. Orientación de Fracturas Inducidas y Breakouts Respecto a los Esfuerzos Horizontales.



Fuente: SPE 2006. Petroleum Engineering Handbook. Volumen 2.

Figura 25. Comportamiento del cáliper con deformaciones del hueco.



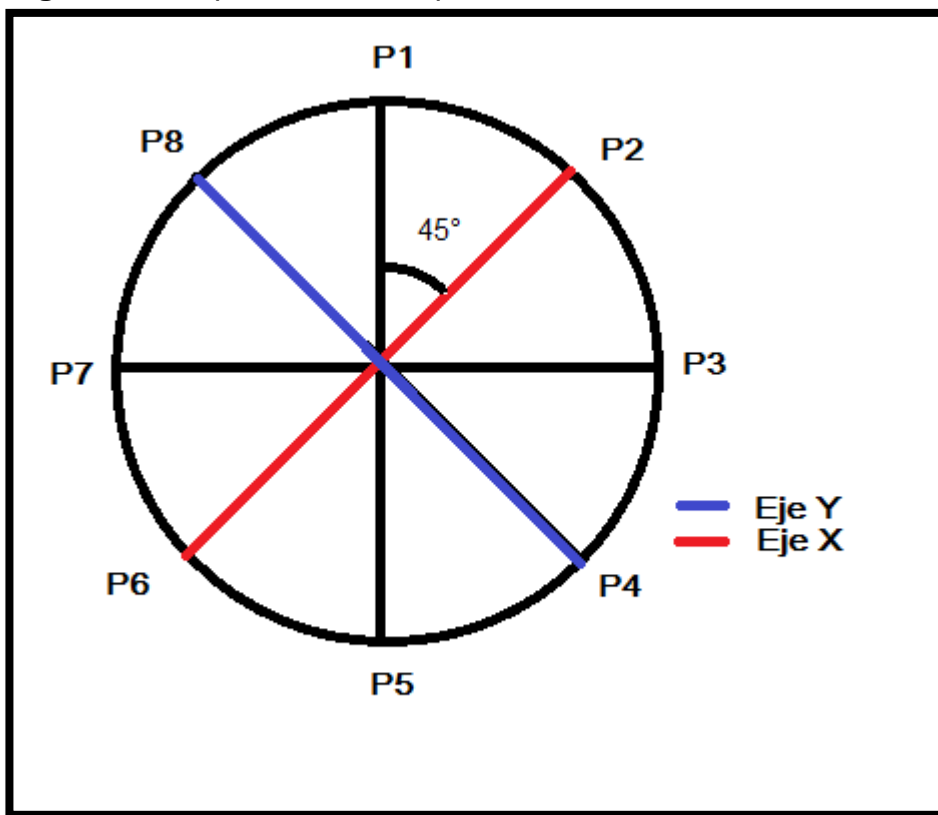
Fuente: REINECKER, J.; TINGAY, M.; MÜLLER, B. Borehole breakout analysis from four-arm caliper logs. *World stress map project*, 2003, p. 3.

En la **Figura 25** se evidencia la presencia de Breakouts cuando un par de calipers presentan un diámetro del hueco en calibre y el otro par de calipers presenta un tamaño de hueco mayor.

Esto se evidencia en la **Gráfica 1**, la cual muestra la identificación de los puntos de breakout según el comportamiento del caliper y además muestra la orientación del pad 1 en ese momento.

También es importante resaltar que el registro únicamente indica la orientación del pad 1, pero para identificar la orientación del esfuerzo horizontal máximo es necesario conocer la orientación del pad 2, el cual está a 45° en azimuth más que el pad 1, y para ello la **Figura 26** muestra la disposición de los pads de la herramienta.

Figura 26. Disposición de los pads de la herramienta.



Para el caso de ésta herramienta los pads que efectúan la función del caliper son los pads 2, 4, 6 y 8, cómo lo muestra la imagen del encabezado del registro (archivo .LAS)

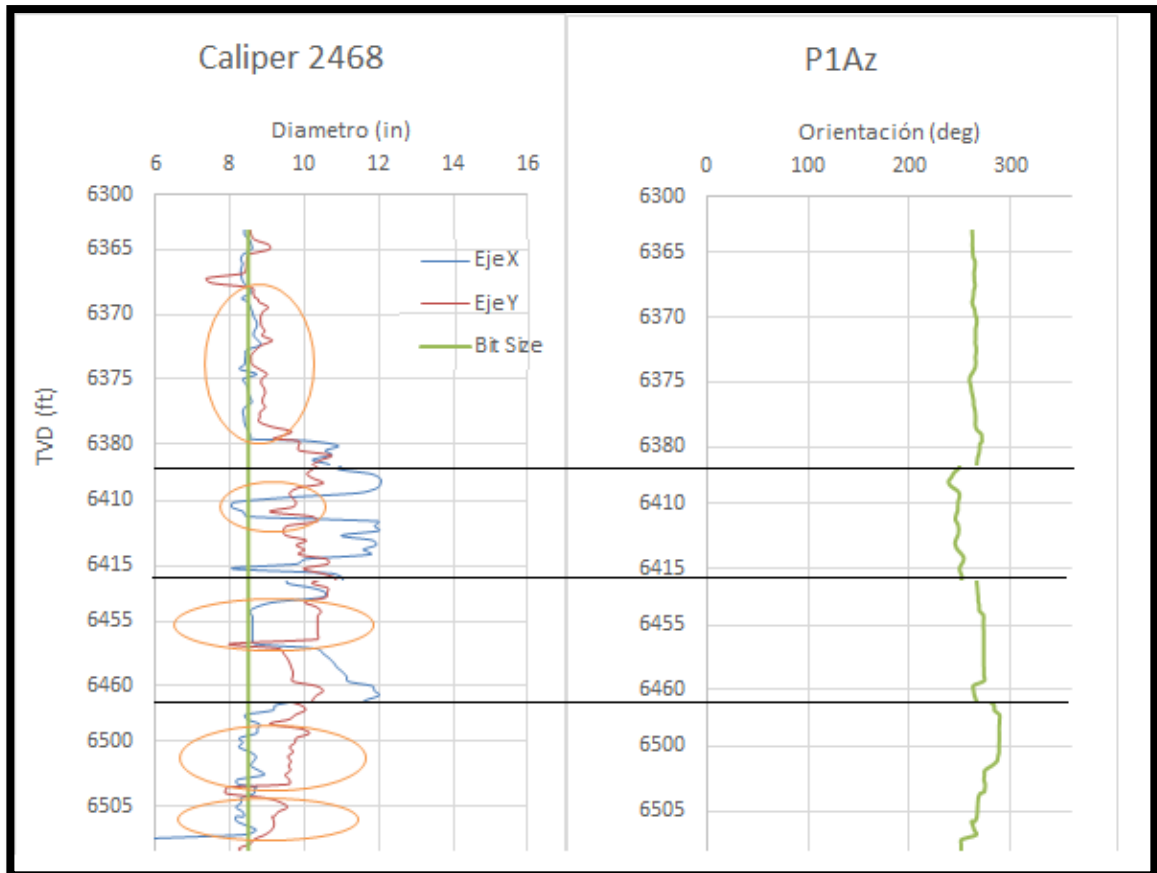
Figura 27. Encabezado de Registros.

P1AZ_C_S	.DEGA	: {F}
RAD2	.IN	: MIE Caliper 2 {F}
RAD4	.IN	: MIE Caliper 4 {F}
RAD6	.IN	: MIE Caliper 6 {F}
RAD8	.IN	: MIE Caliper 8 {F}
RAX1	.IN	: Imager Pad 1 Radius {F}
RAX5	.IN	: Imager Pad 5 Radius {F}
RAY3	.IN	: Imager Pad 3 Radius {F}
RAY7	.IN	: Imager Pad 7 Radius {F}

Fuente: Ecopetrol S.A.

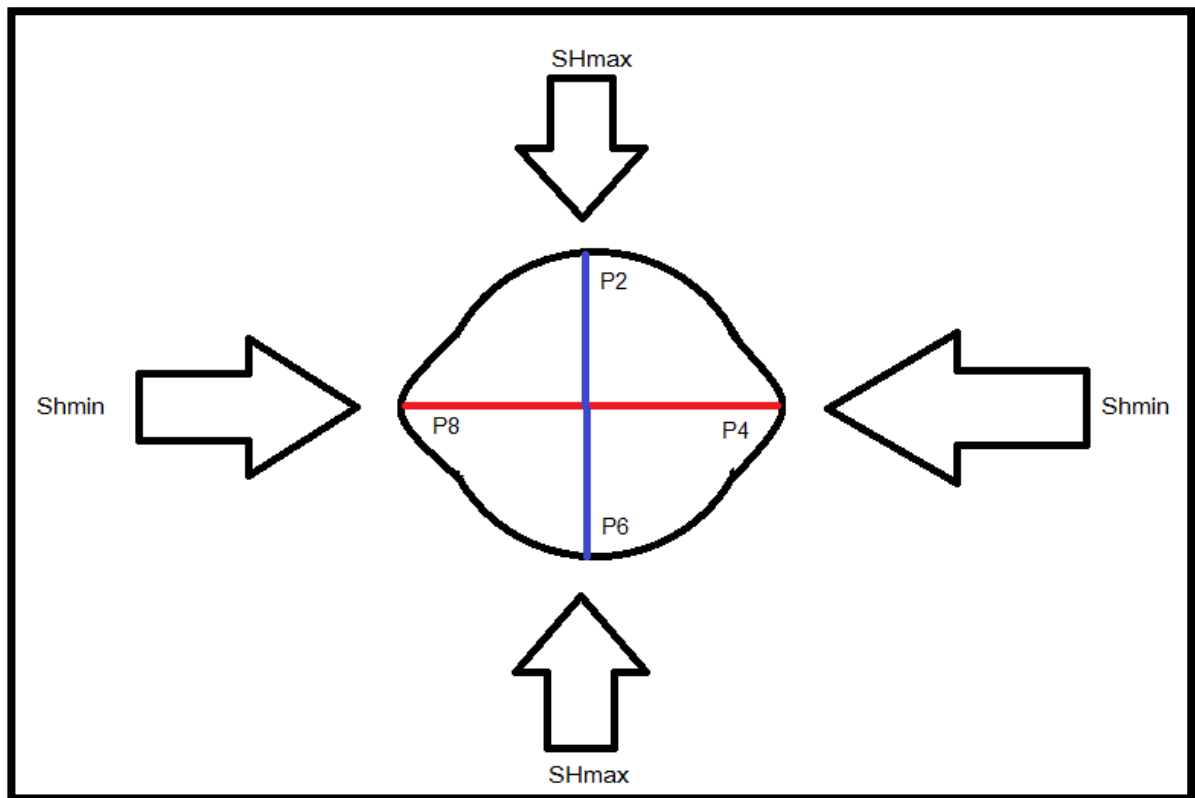
Tomando como base dichos pads y sus radios de apertura se graficaron los diámetros generados para los ejes X e Y cómo se muestra en la **Gráfica 1** y se identificaron los breakouts, la orientación del pad ortogonal al breakout y por ende la orientación del esfuerzo horizontal máximo.

Gráfica 1. Cáliper y orientación del Pad 1.



Con base en lo anterior con la información del registro cáliper se graficaron los radios de apertura de los 4 pads del equipo y la orientación del pad 1 (orientación que da el registro) y de ésta forma se logró determinar la orientación preferente de dicho pad; y además basados en la diferencia de radios, se logró determinar cuál de los pads se acomodó durante el registro en los breakouts, cómo se muestra en la **Figura 28**.

Figura 28. Ubicación del Pad 2 Respecto a los Esfuerzos Horizontales.



La figura anterior muestra que el Pad 2 y su opuesto (eje azul), que tiene menor radio de apertura tienden a acomodarse en la orientación del esfuerzo horizontal máximo, mientras que los otros pads (eje Rojo) tienden a acomodarse en la orientación de los breakouts y por ende en la orientación del esfuerzo horizontal mínimo cómo muestra la figura.

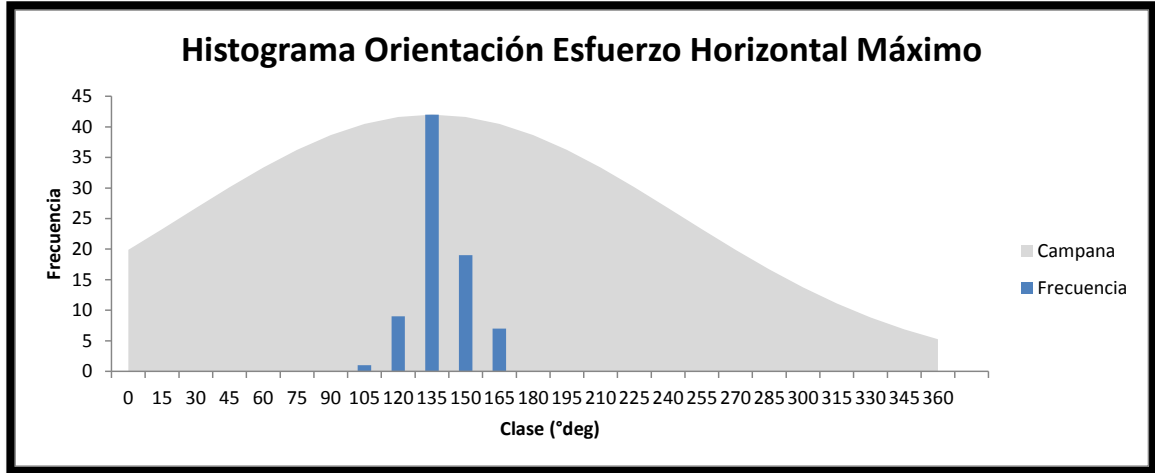
Complementando lo anteriormente enunciado, se puede observar en la que el eje X (pads 2 y 6) tienen menor radio de apertura que los pads del eje Y (4 y 8) los cuales tienen mayor radio de apertura, confirmando que el pad 2 está en la orientación del esfuerzo horizontal máximo.

Dado lo anterior, se determinó la orientación del pad 2, sumándole 45° a la orientación del pad 1, dada la configuración de la herramienta mostrada en la **Figura**

26, con el fin de determinar la orientación del esfuerzo horizontal máximo que corresponde a la orientación del pad 2 cómo se expresó en el párrafo anterior.

Para ello se tabuló las diferentes orientaciones del pad 2 en los intervalos donde se presentaron breakouts y se construyó un histograma con el fin de determinar la orientación predominante del esfuerzo horizontal máximo así:

Gráfica 2. Histograma Orientación Esfuerzo Horizontal Máximo (Pad 2).



Cómo resultado en éste numeral se obtuvo que la orientación del esfuerzo horizontal máximo es predominantemente 135°.

4.3 OVERBURDEN (ESFUERZO DE SOBRECARGA)

Dado que solamente se tienen registros de densidad en la fase del yacimiento, existen diversas metodologías para aproximarse a la magnitud del esfuerzo vertical. Algunas de éstas utilizan relaciones de compactación, tiempos de transito de ondas acústicas s y p, entre otras.

Algunos de los métodos más sencillos y que mejor aplican, es asumir un gradiente constante de 1 psi/ft cómo esfuerzo vertical en las zonas en las cuales no haya información de densidad para calcular el overburden, y donde haya registros de densidad, con la **Ecuación 11** presentada en el marco teórico; pero también es posible generar datos de densidad donde no se encuentran a partir de la tendencia normal (tiempo de tránsito normal DTC) de compactación utilizando la ecuación de Gardener (**Ecuación 31**).

Ecuación 31. Ecuación de Gardner.

$$\rho = a * V^b$$

Fuente: CRAIN. J. Crain's Petrophysical Handbook. Consultado el [29/11/2016]
Disponible en:
<https://www.spec2000.net/25-edit10.htm>

Donde:

a y b = Coeficientes empíricos con valor 0.23 y 0.25 respectivamente.

V = Velocidad compresional [ft/seg].

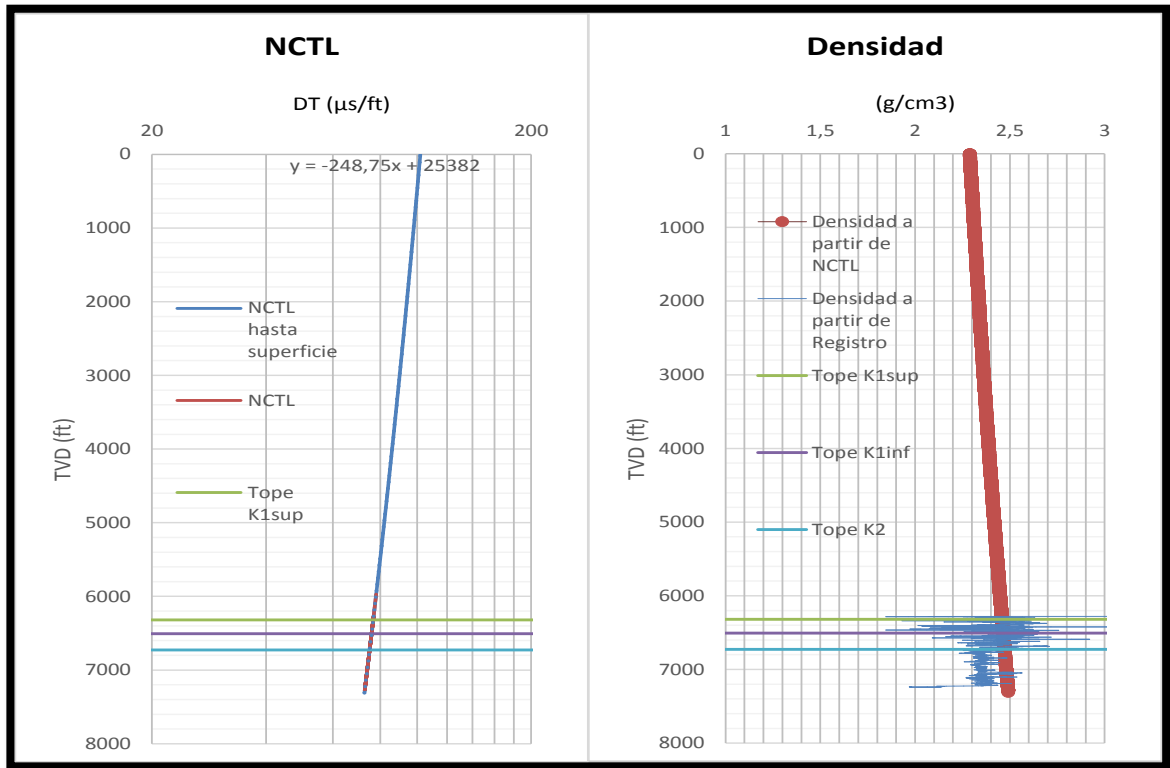
En la **Gráfica 3** se muestran la línea normal de compactación en la gráfica de la izquierda, y en la de la derecha se muestra los valores de densidad obtenidos mediante la ecuación de Gardner y también los valores de densidad medidos mediante el registro de densidad; utilizados ambos para calcular el esfuerzo de sobrecarga.

El método usado para calcular el esfuerzo de sobrecarga es emplear la **Ecuación 11** pero, se debe utilizar la información de un registro de densidad, aplicando la el cual utiliza los datos del registro de densidad donde existan, y donde no existan datos de registro (fases de 17 ½ y 12 ¼) utilizar los datos de densidad generados a partir de la ecuación de Gardner.

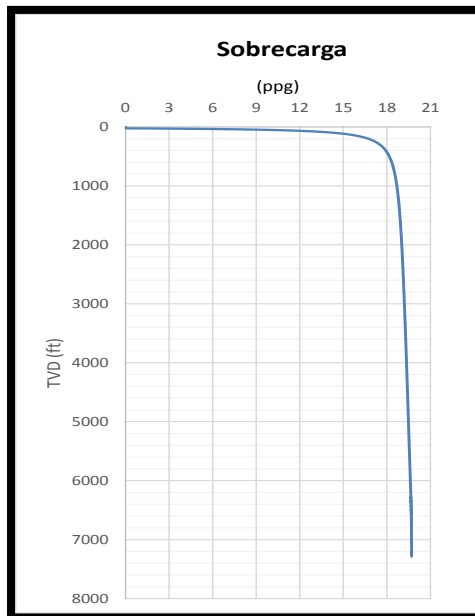
La línea de compactación fue suministrada por Ecopetrol para el desarrollo del proyecto y se considera la forma más precisa para la determinación del esfuerzo de sobrecarga. Los tiempos de tránsito normales de dicha línea se pueden extrapolar como información de densidad mediante la Ecuación de Gardner.

Al realizar la aplicación de estas fórmulas en Excel, se obtuvo un gradiente de sobrecarga cuya densidad equivalente es de 19,6 ppg, el cual varía con la profundidad como se observa en la **Gráfica 4**.

Gráfica 3. Datos de densidad y NCTL a lo largo de todo el pozo de estudio.



Gráfica 4. Esfuerzo de Sobrecarga en el pozo de estudio.



4.4 REGISTROS SÓNICOS SINTÉTICOS

Tal cómo se plasmó en el Marco Teórico, existen dos ecuaciones de Eaton, una para resistividad profunda y la otra para tiempo de transito de registro sónico compresional, y para generar los registros sónicos se utilizaron dos metodologías, dos a partir de resistividad somera a partir de las correlaciones de Faust y Smith, y uno a partir de porosidad.

4.4.1 Registro sónico sintético a partir de porosidad. A partir de porosidad se puede calcular el tiempo de transito de la onda compresional despejando tiempo de transito de la **Ecuación 32**.

Ecuación 32. Porosidad a partir del Registro Sónico.

$$\phi_{Sónico} = \frac{\Delta t_{log} - \Delta t_{matriz}}{\Delta t_{fluido} - \Delta t_{matriz}}$$

OSORIO Rafael. Perfiles Eléctricos. Consultado en Noviembre 28 de 2016. Disponible en: http://www.authorstream.com/Presentation/Rafael_Osorio-255951-registros-de-porosidad-perfiles-el-ctricos-sonico-densidad-neutron-completo-education-ppt-powerpoint y CRAIN. J. Crain's Petrophysical Handbook. Consultado el 29 de Noviembre de 2016. Disponible en; <https://www.spec2000.net/25-edit10.htm>

Donde:

$\phi_{Sónico}$ = Porosidad [Adim]

Δt_{log} = Tiempo de transito del registro sónico compresional [μ s/ft]

Δt_{matriz} = Tiempo de transito normal de la roca [μ s/ft]

Δt_{fluido} = Tiempo de transito normal del fluido [μ s/ft]

Y despejando para el tiempo de transito del registro se obtiene la **Ecuación 33**.

Ecuación 33. Tiempo de Transito a partir de Porosidad.

$$\phi * (\Delta t_{fluido} - \Delta t_{matriz}) + \Delta t_{matriz} = \Delta t_{log}$$

OSORIO Rafael. Perfiles Eléctricos. Consultado en Noviembre 28 de 2016. Disponible en: http://www.authorstream.com/Presentation/Rafael_Osorio-255951-registros-de-porosidad-perfiles-el-ctricos-sonico-densidad-neutron-completo-education-ppt-powerpoint/

Donde:

ϕ = Porosidad obtenida a partir de cualquier registro [Adim]

Δt_{log} = Tiempo de transito del registro sónico compresional [μ s/ft]

Δt_{matriz} = Tiempo de transito normal de la roca [μ s/ft]

Δt_{fluido} = Tiempo de transito normal del fluido [μ s/ft]

Al tener registros cómo neutrón y densidad, se puede generar valores de porosidad a partir de ellos con el fin de generar un registro sónico compresional a partir de dicho registro.

4.4.2 Registro sónico sintético a partir de resistividad. A partir de la resistividad somera se puede generar un registro sónico sintético basado en las correlaciones de Faust o Smith, las cuales corresponden a las ecuaciones **Ecuación 34** y **Ecuación 35** para Faust, y **Ecuación 36**. para Smith.

Ecuación 34. Velocidad Compresional Faust.

$$V_c = 1947 * Res_s^{0.1667}$$

Fuente: CRAIN. J. Crain's Petrophysical Handbook. Consultado el 29 de Noviembre de 2016. Disponible en; <https://www.spec2000.net/25-edit10.htm>

Donde:

V_c = Velocidad compresional [ft/seg]

Res_s = Resistividad somera (*Shallow resistivity*) [ohm*m]

Ecuación 35. Tiempo de Transito Faust.

$$DTC_{syn} = \frac{1 * 10^6}{V_c}$$

Fuente: CRAIN. J. Crain's Petrophysical Handbook. Consultado el 29 de Noviembre de 2016. Disponible en; <https://www.spec2000.net/25-edit10.htm>

Donde:

DTC_{syn} = Tiempo de transito sintético [μ s/ft]

V_c = Velocidad compresional [ft/seg]

Ecuación 36. Tiempo de Transito Smith.

$$DTC_{syn} = 95 * (Res_s^{-0.15})$$

Fuente: CRAIN. J. Crain's Petrophysical Handbook. Consultado el 29 de Noviembre de 2016. Disponible en; <https://www.spec2000.net/25-edit10.htm>

Donde:

DTC_{syn} = Tiempo de transito sintético [μ s/ft]

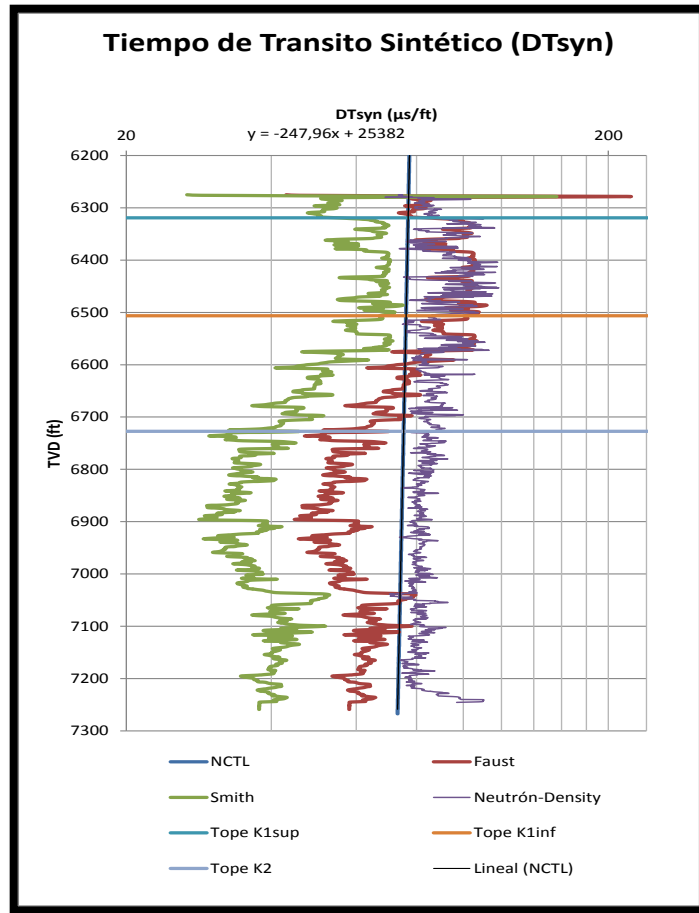
Res_s = Resistividad somera (Shallow resistivity) [ohm*m]

Con base en las ecuaciones anteriores, se graficaron y se compararon con la línea de compactación normal suministrada por Ecopetrol, obteniendo la **Gráfica 5**.

Luego de graficar los tres registros sínicos, se observa que el comportamiento que se debe presentar no es lineal como el registro sínico a partir de porosidad, y por el contrario se debe comportar como el Registro de Faust o Smith, pero teniendo en cuenta el que más ajusta de éstos dos con la línea de compactación es el de Faust, registro que se utilizó con el método de Eaton a partir del Sínico.

Otro criterio para seleccionar dicho registro es que su comportamiento debe coincidir con el comportamiento de la presión de poro, lo cual se evidenciará más adelante al graficar los MDTs.

Gráfica 5. Registros Sónicos Sintéticos.



4.5 MODELAMIENTO DE PRESIÓN DE PORO

Utilizando la Ecuación de Eaton se calcularon los datos de presión de poro para intervalos arcillosos según distintos valores de cutoff según formación como se muestra en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Valores de Cutoff para Sónico Sintético.

Formación	Valores de Cutoff Gamma Ray, [°API]
T2	>50
K1 superior	>120
K1 inferior	>120
K2	>30

Es decir, que la Ecuación de Eaton sólo se utiliza en zonas arcillosas, y según formación se definió en que puntos (según el Gamma Ray) es válido utilizar dicha ecuación.

Además, se ajustó el exponente según los intervalos arcillosos en la zona donde existían MDTs, obteniendo una curva según la Ecuación de Eaton, variando el exponente de tal forma que la curva a partir de la Ecuación de Poro de Eaton coincide con los datos de MDTs, cómo muestra la **Gráfica 6**.

El exponente n de la Ecuación de Eaton (ver **Ecuación 19**) ajustado para reproducir el comportamiento de los registros de presión de poro adquiridos en el campo de estudio corresponde a un valor de 0,5; convirtiendo la ecuación de Eaton original en la **Ecuación 37**.

Ecuación 37. Ecuación de Eaton Ajustada para presión de poro.

$$P_p = S - (S - P_{hyd}) \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{log}} \right)^{0.5}$$

Donde:

P_p = Presión de poro [psi].

S = Esfuerzo de Sobrecarga [psi].

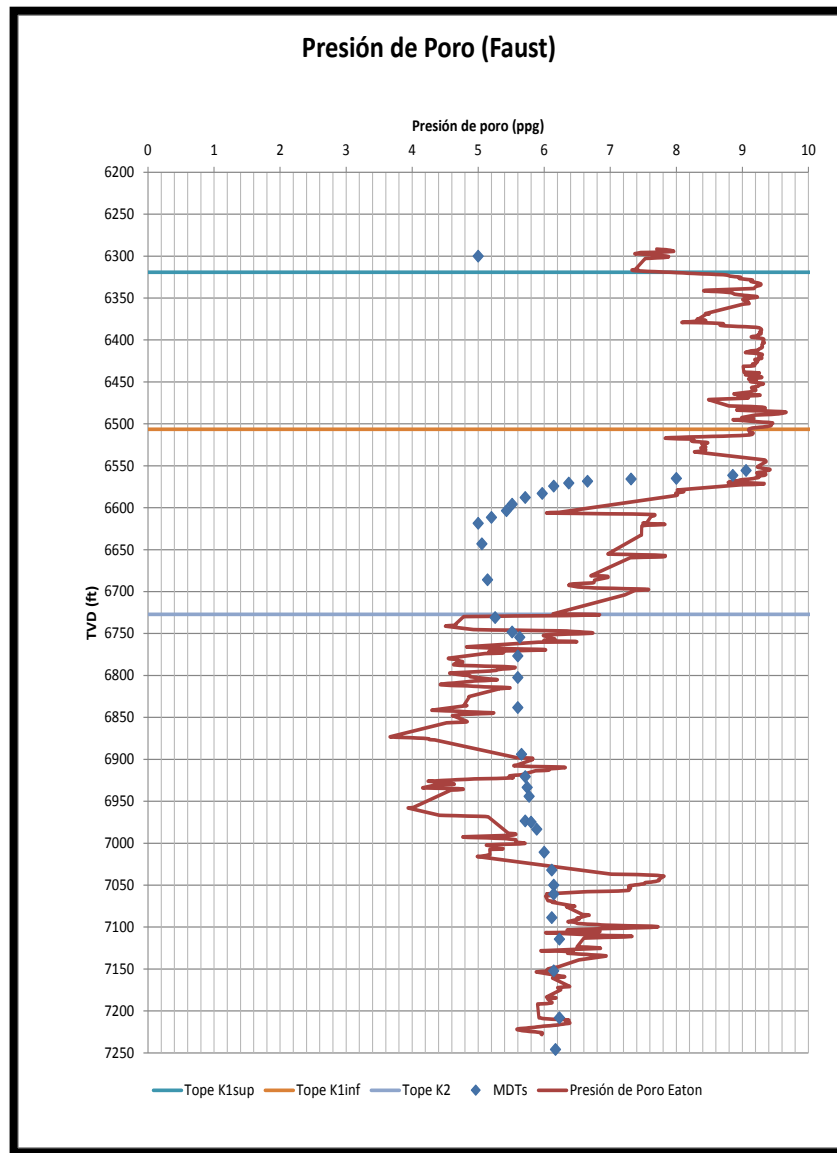
P_{hyd} = Presión hidrostática normal [psi].

ΔT_n = Tiempo de tránsito normal (a partir de la NCTL) [μ s/ft].

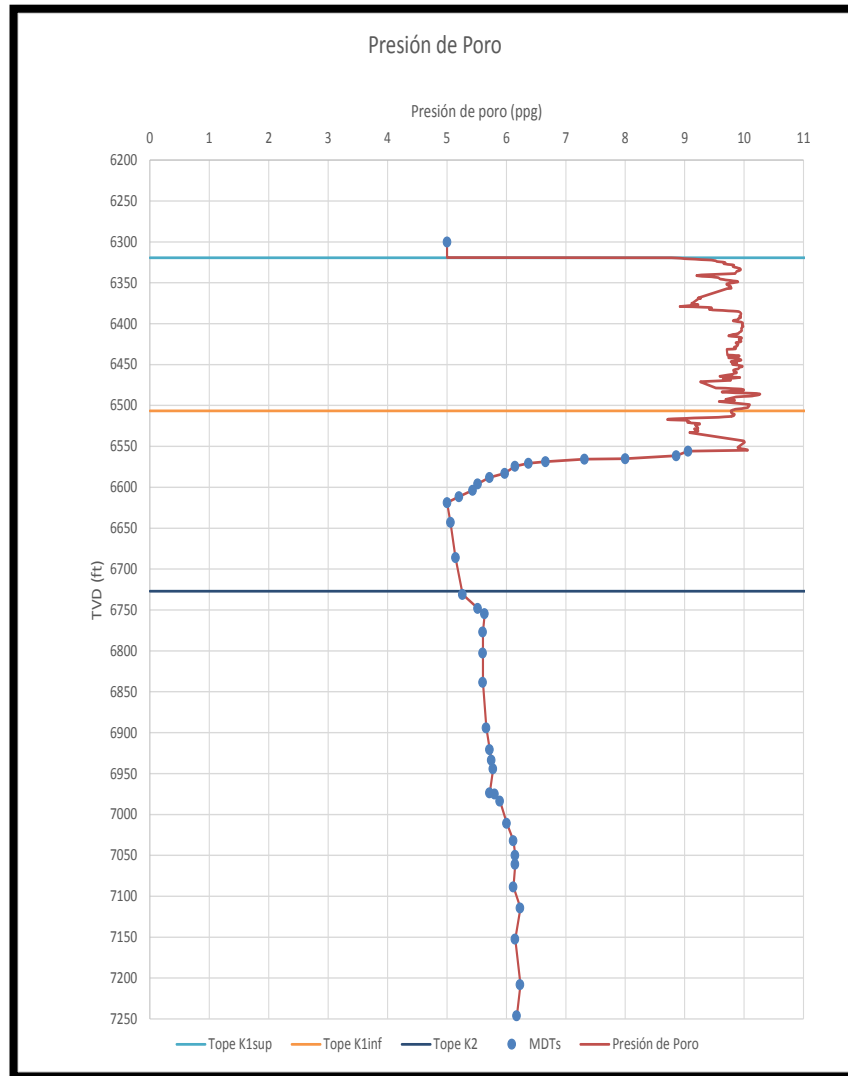
ΔT_{log} = Tiempo de tránsito a partir del registro eléctrico [μ s/ft].

Cabe resaltar que la gráfica anterior corresponde únicamente a la gráfica de ajuste del exponente de Eaton, más no a la gráfica de presión de poro, dado que la gráfica de presión de poro debe generarse a partir de los datos de MDTs donde existan, y a partir de la ecuación de Eaton en las otras formaciones, cómo muestra la **Gráfica 7**.

Gráfica 6. Ajuste Exponente Eaton para el Pozo de Estudio.



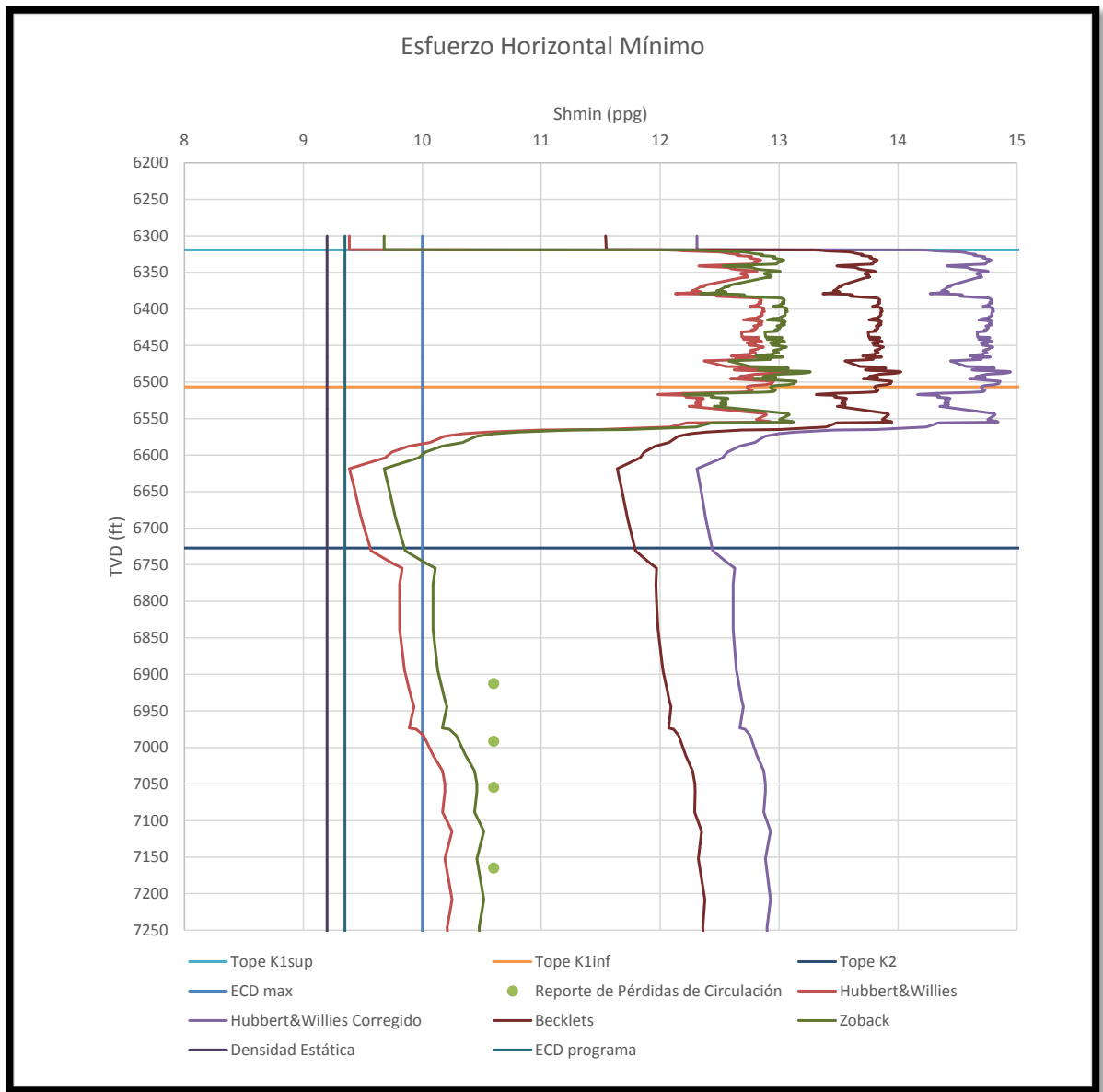
Gráfica 7. Presión de Poro en el pozo de estudio.



4.6 ESFUERZO HORIZONTAL MÍNIMO

Para la determinación del esfuerzo horizontal mínimo se graficaron los resultados de diferentes ecuaciones para determinar el esfuerzo horizontal mínimo como muestra la **Gráfica 8**.

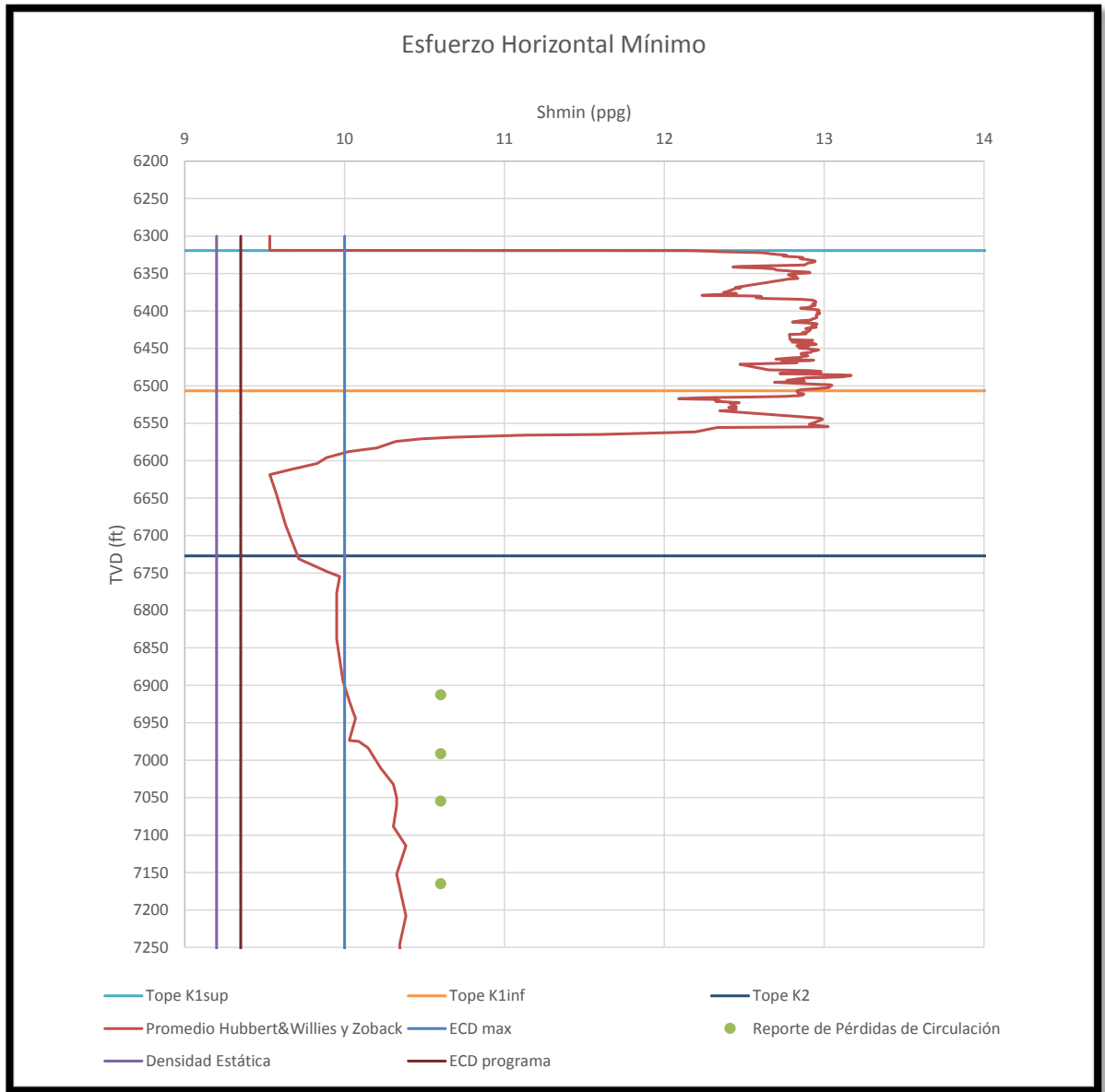
Gráfica 8. Curvas Posibles Esfuerzo Horizontal Mínimo en el pozo de estudio.



En ésta gráfica se observa que las curvas con las cuales se puede ajustar el esfuerzo horizontal mínimo con las pérdidas de circulación, las cuales pudieron ser inducidas, generando un escenario similar al de *leak off test*, para el cual corresponden a las ecuaciones de Zoback y Hubbert & Willies, por lo cual es posible considerar que el promedio de las dos es el escenario de esfuerzo horizontal mínimo más acertado.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se graficó el esfuerzo horizontal mínimo obteniendo el siguiente resultado:

Gráfica 9. Curva de Esfuerzo Horizontal Mínimo seleccionada en el pozo de estudio.



Las ecuaciones de Hubbert & Willies y Zoback (ver **Ecuación 38** y **Ecuación 39**) son una relación entre el esfuerzo efectivo vertical y el esfuerzo efectivo correspondiente al esfuerzo horizontal mínimo, por lo cual el comportamiento del esfuerzo horizontal mínimo es similar al de la presión de poro.

Ecuación 38. Hubbert & Willies para esfuerzo horizontal mínimo para Esfuerzo Horizontal Mínimo.

$$Sh_{min} = 0.3 (S_v - P_p) + P_p$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 281.

Ecuación 39. Ecuación de Zoback para esfuerzo horizontal mínimo para Esfuerzo Horizontal Mínimo.

$$Sh_{min} = 0.32 (S_v - P_p) + P_p$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 281.

Donde:

Sh_{min} = Esfuerzo horizontal mínimo, [psi].

S_v = Esfuerzo vertical, [psi].

P_p = Presión de poro, [psi].

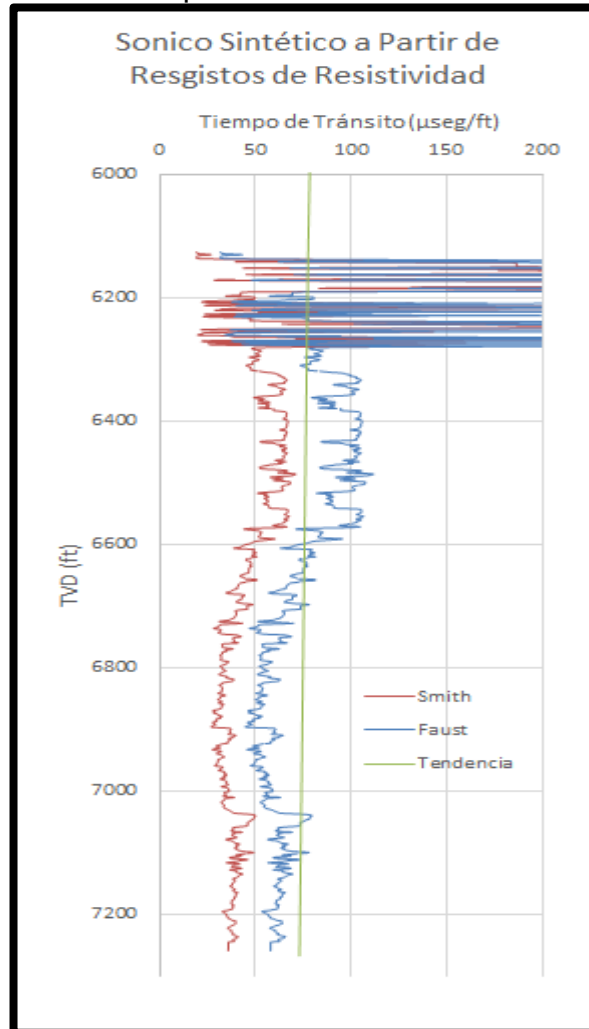
4.7 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ROCA

Debido a que no se cuenta con núcleos para hacer mediciones directas sobre estos parámetros, se debe recurrir a mediciones indirectas a partir de otras medidas para lograr determinar un valor aproximado de estas, para tal motivo se van a usar datos de los registros eléctricos como el Gamma Ray, la porosidad y la densidad.

4.7.1 Módulos elásticos. Para los módulos, como ya se referenció previamente, se pueden usar medidas de las ondas sísmicas y, aunque los registros no cuentan estos datos, es posible determinarlos usando otras relaciones.

Los tiempos de transito se obtuvieron con base en registros sísmicos sintéticos y ajustados mediante las correlaciones de Faust y Smith, pero considerando únicamente la que mejor se ajustara a la tendencia de compactación suministrada por Ecopetrol S.A.

Gráfica 10. Sónico sintético ajustado a la línea de compactación.



La línea que mejor ajustó fue la línea de Faust, y de ésta forma se calcularon las propiedades mecánicas con base en dichos valores. Una vez determinado un tiempo sónico sintético, lo que sigue es determinar las velocidades compresional (ver **Ecuación 35**) y de corte (**Tabla 9**). La velocidad compresional es simplemente el inverso del tiempo sónico, mientras que para hallar velocidad de corte existen varias relaciones dependiendo de la litología (Gamma Ray) presente.

Tabla 9. Relación entre Vp y Vs, en función del Gamma Ray en cualquier litología.

Litología	Gamma Ray, [API]	Relación entre Vp y Vs
Arena Limpia	< 30	$\frac{V_p}{V_s} = 1,33 + \frac{0,63}{3,89 - 7,07\Phi}$
Arena Sucia	30 < GR < 60	$\frac{V_p}{V_s} = 1,08 + \frac{1,61}{3,89 - 2,04V_{sh}}$
Arcilla	> 60	$V_p = 1,16V_s + 1,36$

Fuente: GREENBERG, M. L.; CASTAGNA, J. P. Shear-wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification and applications1. *Geophysical prospecting*, 1992, vol. 40, no 2, p. 195-209.

Donde:

Vp = velocidad compresional (Km/s).

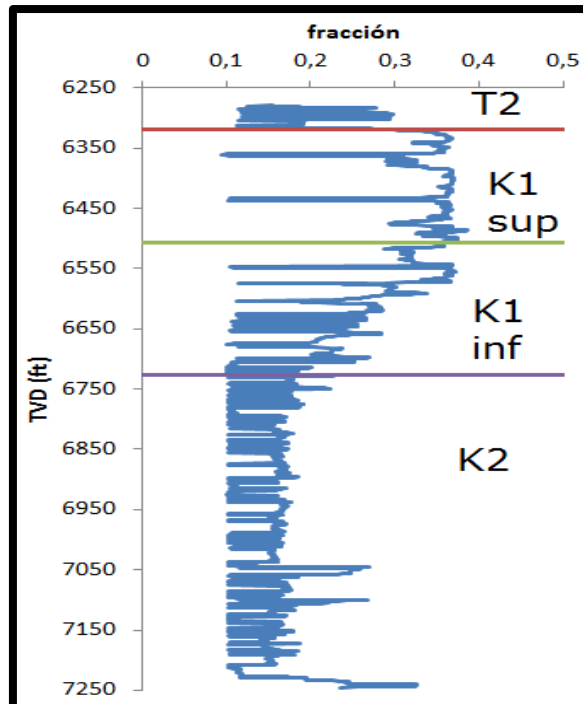
Vs = velocidad de corte (Km/s).

Φ = Porosidad [fracción].

Vsh = Volumen de arcilla [fracción].

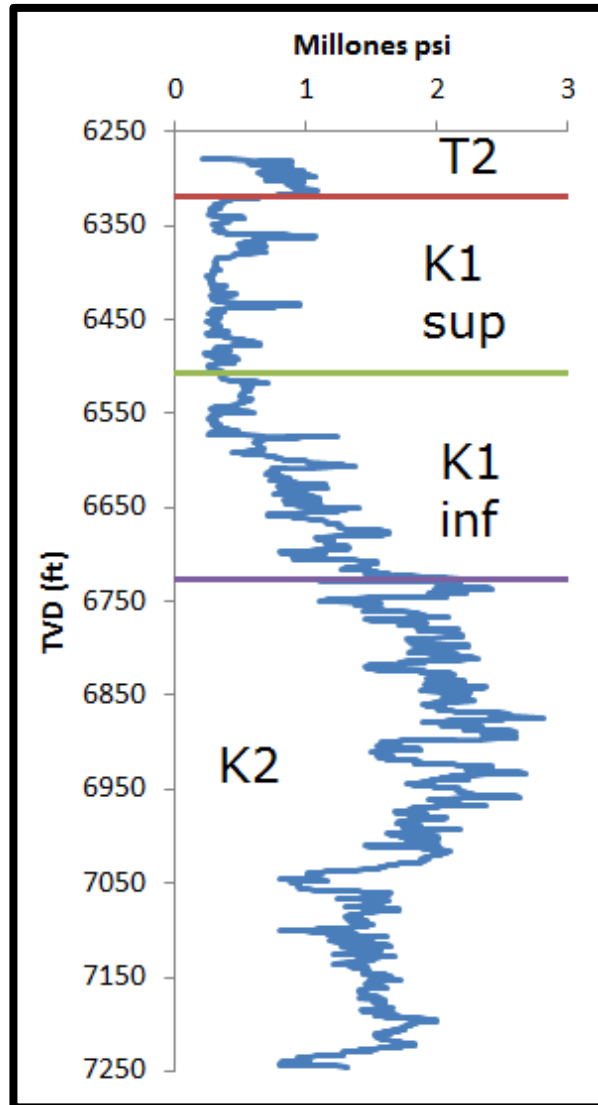
Como se mencionó previamente, la relación de Poisson se puede determinar mediante la **Ecuación 6** una vez determinada, dicha relación muestra el comportamiento que se observa en la **Gráfica 11**.

Gráfica 11. Relación de Poisson.



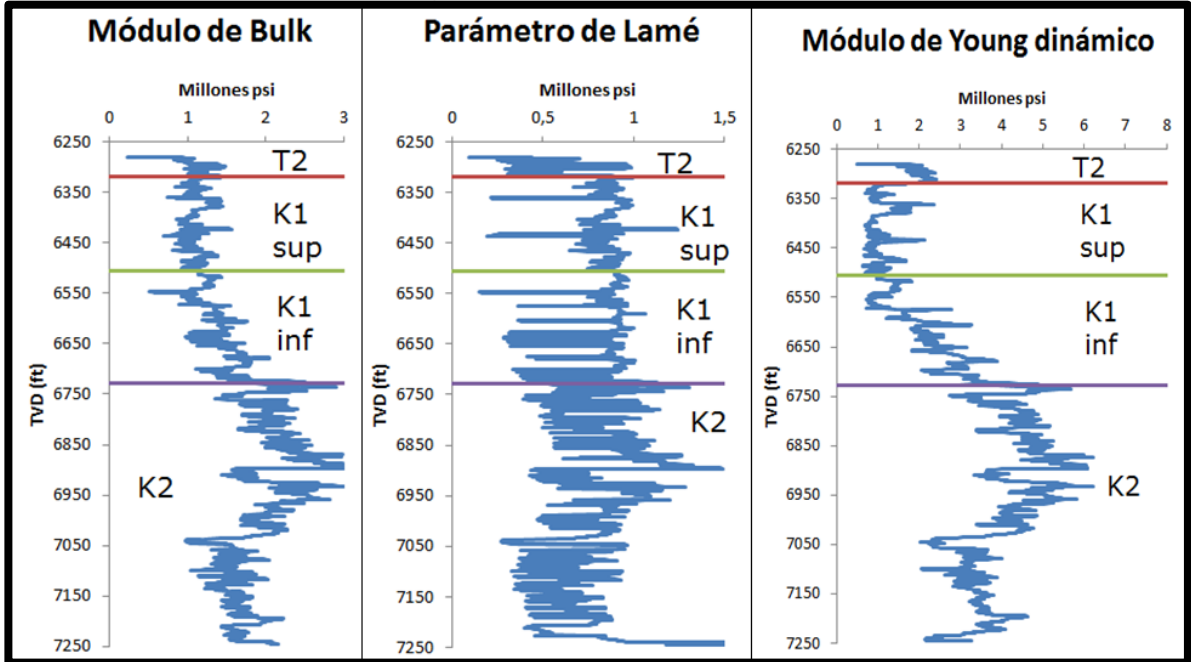
Además, la **Ecuación 5** relaciona la velocidad de corte con la densidad y el módulo de corte, por lo tanto a partir de ella y usando el registro densidad, se puede encontrar el módulo de corte, que muestra la **Gráfica 12**.

Gráfica 12. Módulo de corte.



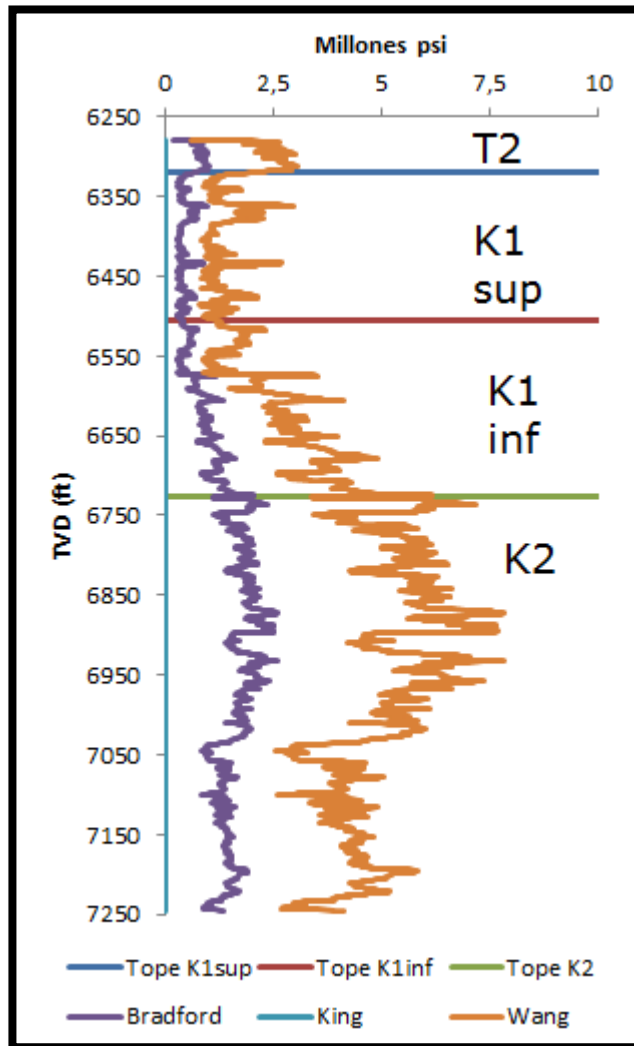
Finalmente, como ya se había mencionado, si se conocen dos módulos se pueden hallar los tres restantes usando las relaciones de la **Tabla 4**, los módulos restantes muestran el siguiente comportamiento:

Gráfica 13. Módulos de Young, Bulk y Parámetro de Lamé.



En el caso del módulo de Young estático, se probó con los tres métodos mencionados en las **ecuaciones 7, 8 y 9**. Los resultados se muestran en la **Gráfica 14**.

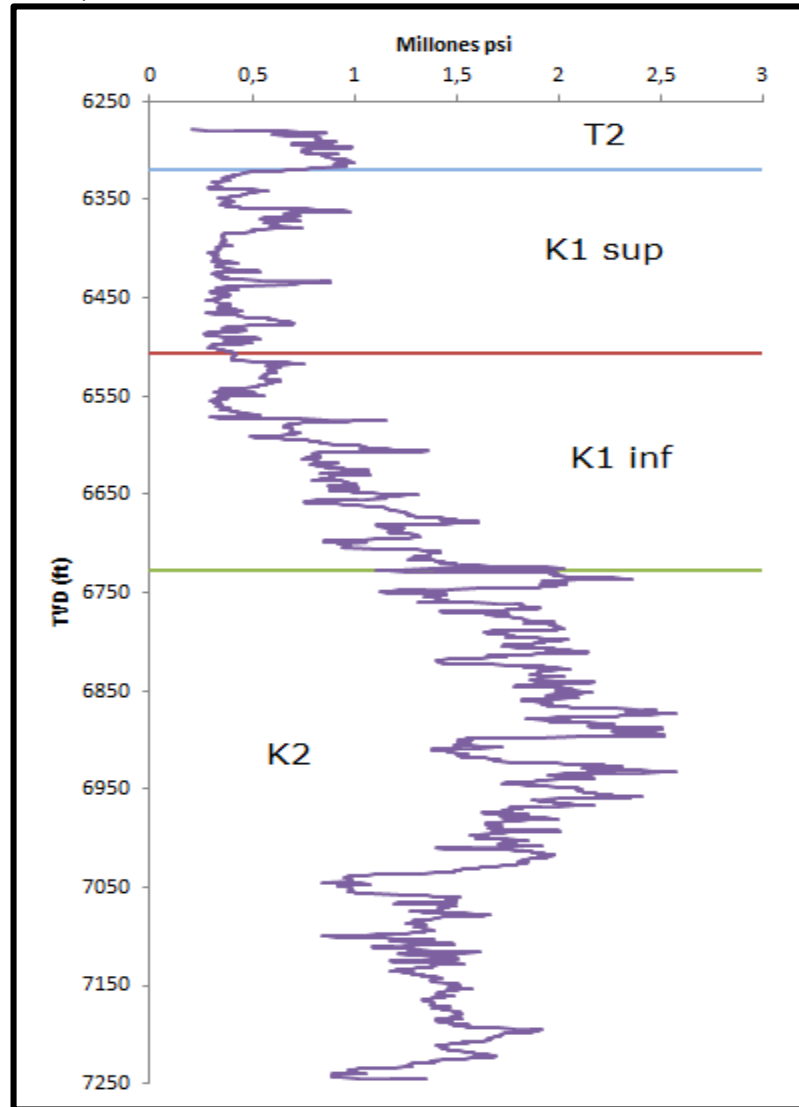
Gráfica 14. Módulo de Young estático por los diferentes métodos.



Como se puede ver, hay una gran variación en los resultados de los tres métodos y, debido a que no hay datos guías de los cuales tomar una referencia, se trabajará con la asunción general de que el módulo dinámico es 1,5 a 3 veces más grande que el módulo estático²⁶, observando las gráficas tanto del módulo de Young dinámico y los diferentes métodos para el estático, solo hay uno que cumple esta condición, por lo tanto el método elegido para representar el módulo de Young estático fue el de Bradford. Este resultado se puede ver más claramente en la **Gráfica 15**.

²⁶ TARIQ, Z., ELKATATNY, S., MAHMOUD, M. & ABDULRAHEEM, A. A holistic approach to develop new rigorous empirical correlation for static Young's modulus. SPE, 2016. p. 2.

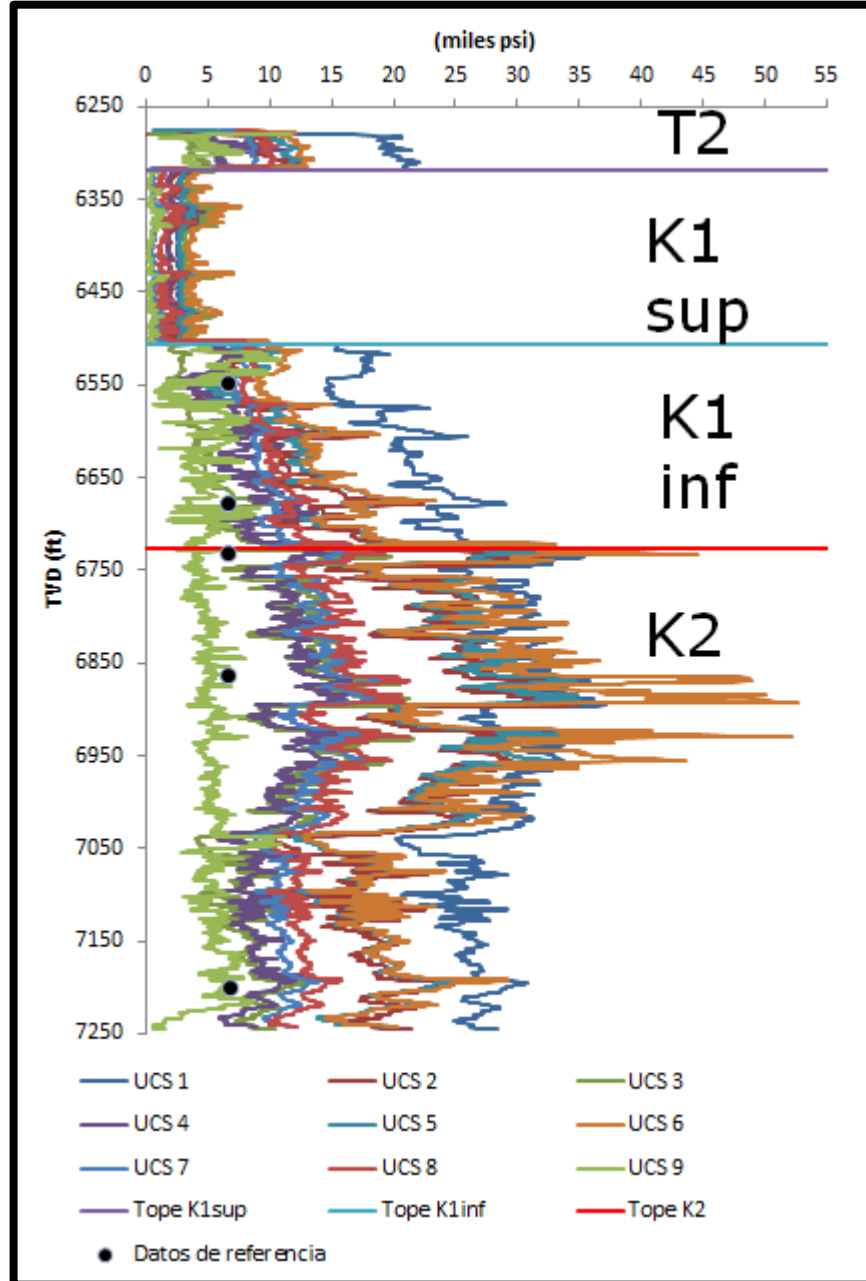
Gráfica 15. Módulo de Young estático (Bradford et al. 1998).



Para la determinación del UCS, se emplearon todas las relaciones dadas por las **Tabla 5** para las areniscas y en cuanto a las arcillas la **Tabla 6** (pág 48 y 49 respectivamente); para que más adelante se pudiera determinar cuál es la mejor opción, además se encontraron valores²⁷ de la formación Guadalupe (correspondiente a las unidades K1 y K2) que permiten elegir de manera más acertada las relaciones a trabajar. Para este caso se discriminaron las litologías teniendo en cuenta la formación que se trabaja, en específico se define como arcilla a la Unidad K1 superior y las demás como areniscas. Los valores obtenidos como resultado de todos los métodos ya nombrados se pueden ver en la **Gráfica 16**.

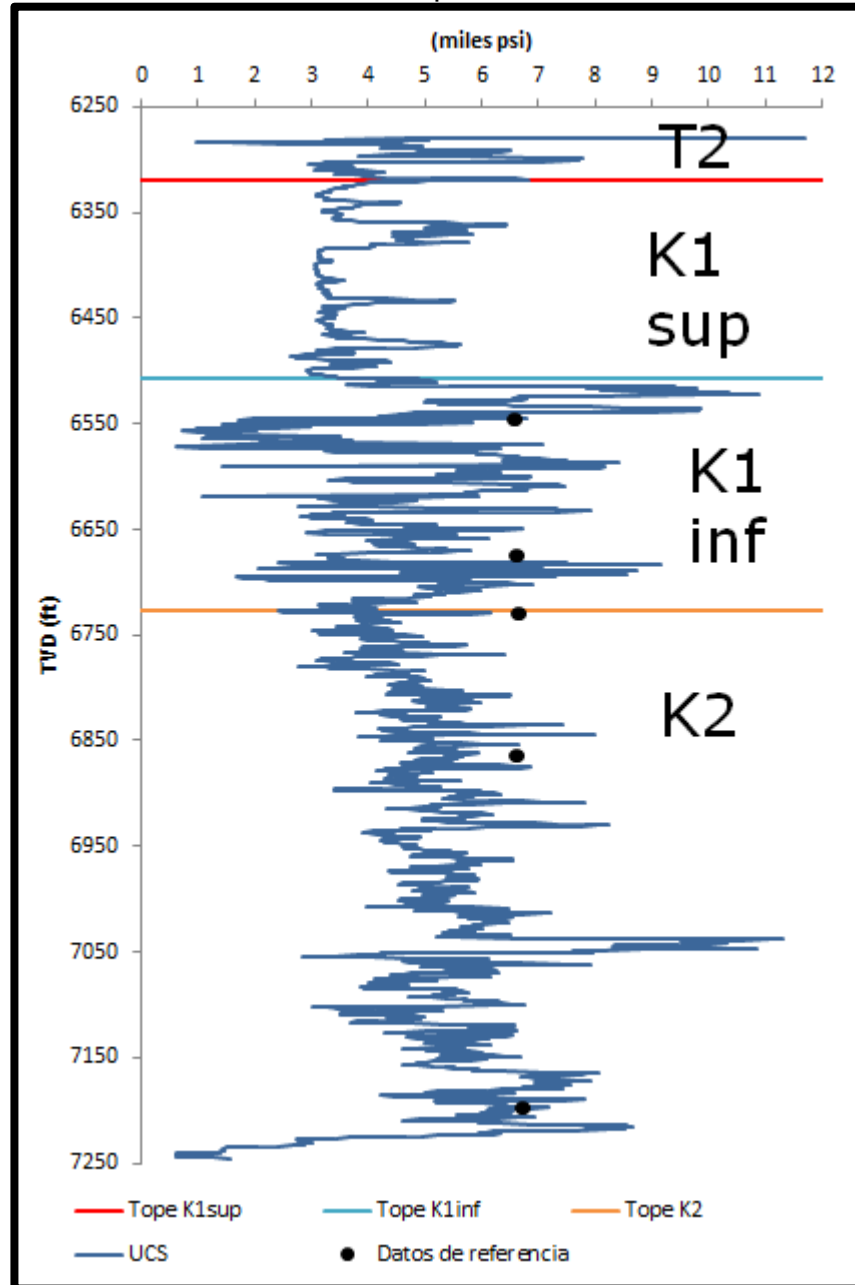
²⁷ TORRES, M. E. & GONZALEZ, A. J. (2003). In- Situ Stress State Eastern Cordillera (Colombia). Society of Petroleum Engineers. SPE 81074. p. 12.

Gráfica 16. UCS determinada por diferentes métodos.



Como se puede ver, para el caso de las areniscas, la relación que más se acerca a los datos de referencia es número 9 de la **Tabla 5**, por otro lado, para el caso de la formación K1 superior, no se encuentran datos de referencia, sin embargo más adelante al evaluar los datos en el polígono de esfuerzos, se determinó que las únicas relaciones con valores suficientemente altos como para entrar en el mismo, son los de las ecuaciones 3 y 6 de la **Tabla 6**, a partir de esto y evitando al máximo que haya una dispersión muy alta, se tomó la relación 3 del cuadro ya mencionado. Los resultados elegidos se pueden ver en la **Gráfica 17**.

Gráfica 17. UCS determinada por los métodos seleccionados.



4.7.2 Esfuerzo horizontal máximo. Tal cómo se expresó en el marco teórico, la determinación del esfuerzo horizontal máximo se puede realizar con el conocimiento de amplitud del breakout o identificando la presencia de fracturas inducidas por tensión, pero para el caso del pozo de estudio, no se presentaron dichos fenómenos, por lo cual una de las pocas herramientas es partir de que el esfuerzo horizontal máximo es aproximadamente 1,4 veces el esfuerzo horizontal mínimo²⁸.

A partir de lo anterior, y al no conocer la presencia de fracturas inducidas, y tampoco conocer el tamaño de Breakouts pero conociendo que éstas deformaciones existen, se parte de un tamaño promedio de apertura de breakout que puede ser de 30° hasta 90° que sería una estabilidad del hueco, con el fin de limitar el esfuerzo horizontal máximo, utilizando también la propiedad mecánica UCS. Para ello se utiliza la **Ecuación 40**.

Ecuación 40. Determinación del esfuerzo horizontal máximo a partir del tamaño del breakout.

$$SH_{max} = \frac{(UCS + 2P_p + \Delta P + \sigma^{\Delta T}) - Sh_{min}(1 + 2 \cdot \cos(2\theta_b))}{1 - 2 \cdot \cos(2\theta_b)}$$

Fuente: ZOBACK, Mark D. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2010. p. 223.

Donde:

SH_{max} = Esfuerzo horizontal máximo, [psi].

UCS = Resistencia a la compresión de la roca, [psi].

P_p = Presión de poro, [psi].

2θ_b = π - w_{bo}, [grados].

w_{bo} = Apertura del breakout, [grados].

ΔP = P_H - P_p, [psi].

P_H = Presión hidrostática, [psi].

σ = Esfuerzo efectivo en el pozo, sin embargo la forma más fácil de cuantificarlo es igualándolo a ΔP [psi].

ΔT = T_{mud} - T_{fm}, [°F].

T_{mud} = Temperatura del lodo, [°F].

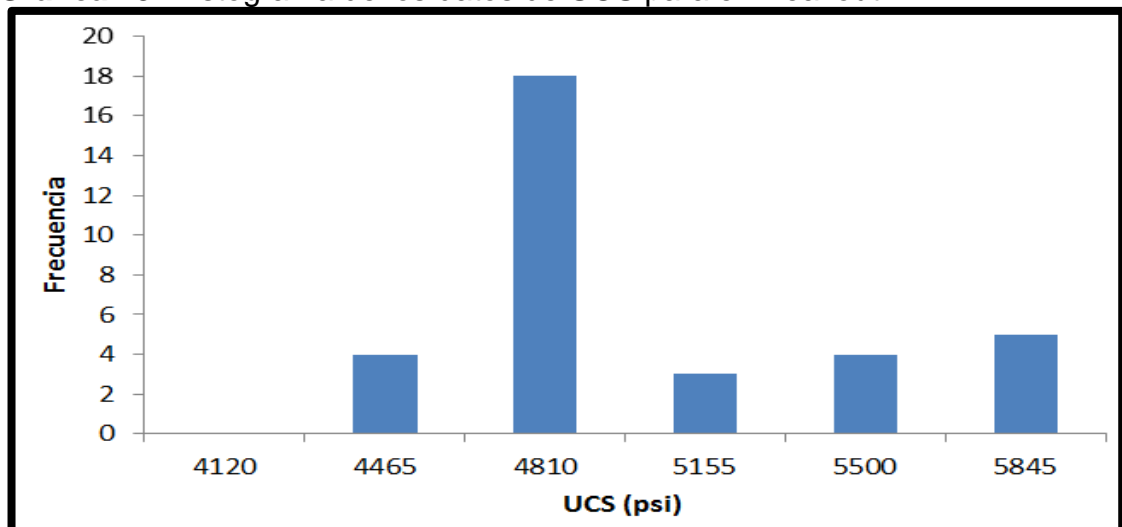
T_{fm} = Temperatura de la formación, [°F].

Con base en la **Ecuación 40** y el polígono de esfuerzos, se puede determinar los valores que puede tomar el esfuerzo horizontal máximo en las zonas donde se presentaron breakouts, asumiendo 90° como tamaño de estos, este valor, debido a que esta es la apertura que alcanzan los breakouts de la zona según información de pozos cercanos.

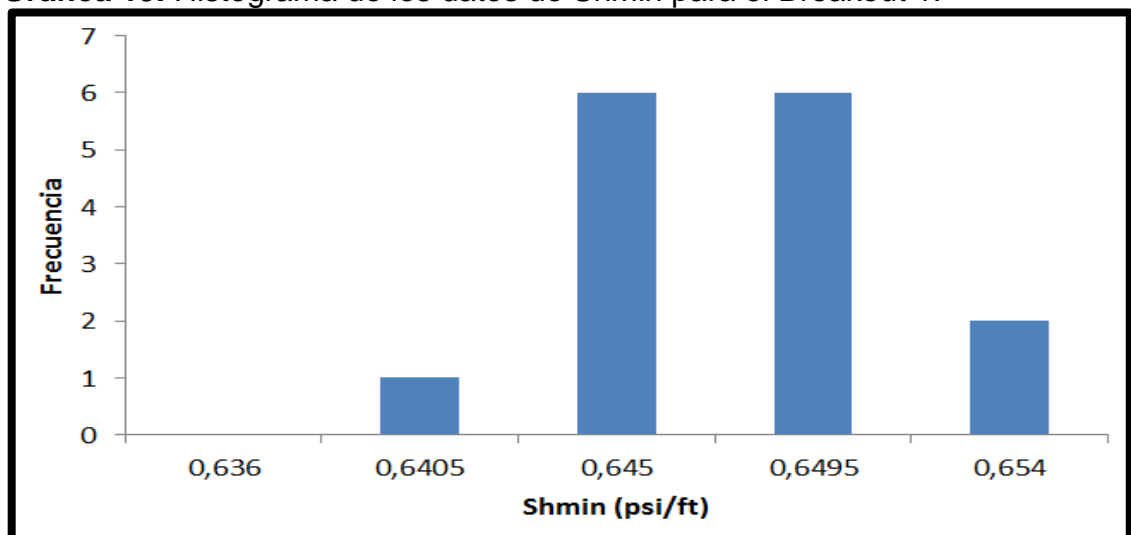
²⁸ BADRÁN LIZARAZO, N. de J. PADILLA REYES J. M. Desarrollo de una metodología general para el cálculo de esfuerzos in-situ en formaciones productoras de hidrocarburos. UIS, 2012. p. 120

Debido a que la variación tanto de UCS, como de esfuerzo horizontal mínimo no presentan gran variación para cada Breakout, se eligieron datos representativos que incluyeran el valor más repetido, así como el máximo y el mínimo, para que de esta forma se pudiera observar la variación del esfuerzo horizontal máximo. Teniendo en cuenta que todos los breakouts, excepto el número uno tienen máximo 15 datos, es fácil simplemente observando los datos elegir con cuales trabajar, sin embargo, el Breakout 1 tiene 34 datos, por lo tanto es apropiado realizar histogramas con el fin de determinar los valores a usar. Estos se pueden ver en las **Gráficas 18 y 19**.

Gráfica 18. Histograma de los datos de UCS para el Breakout 1.



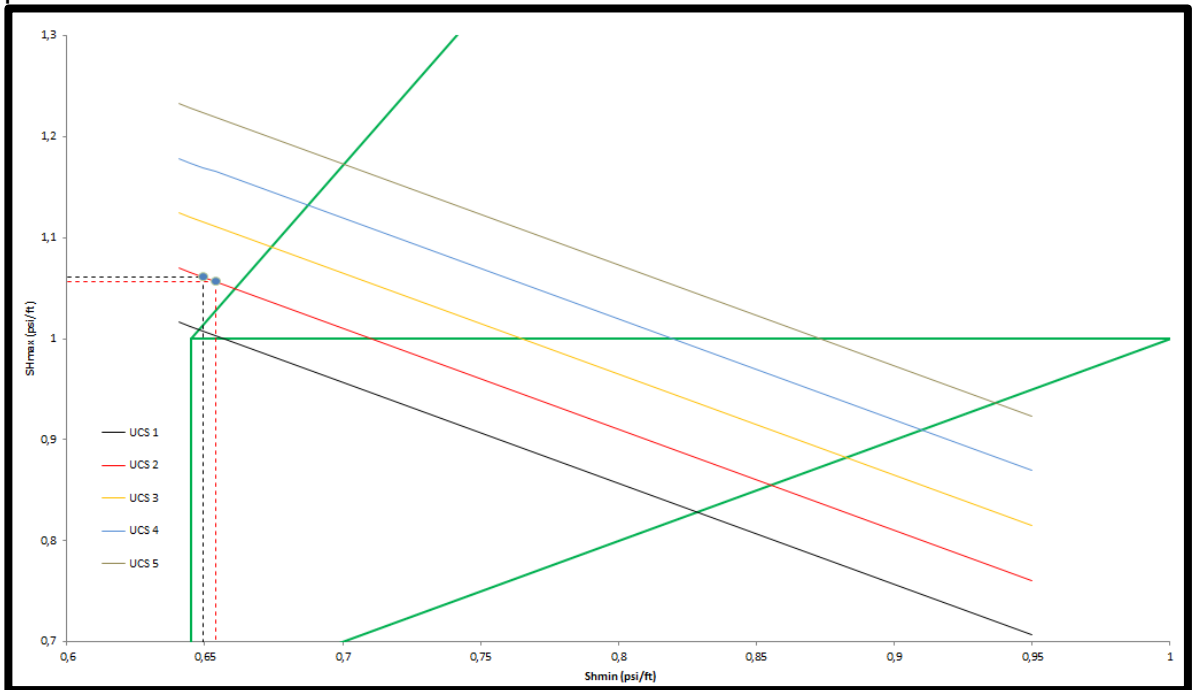
Gráfica 19. Histograma de los datos de Shmin para el Breakout 1.



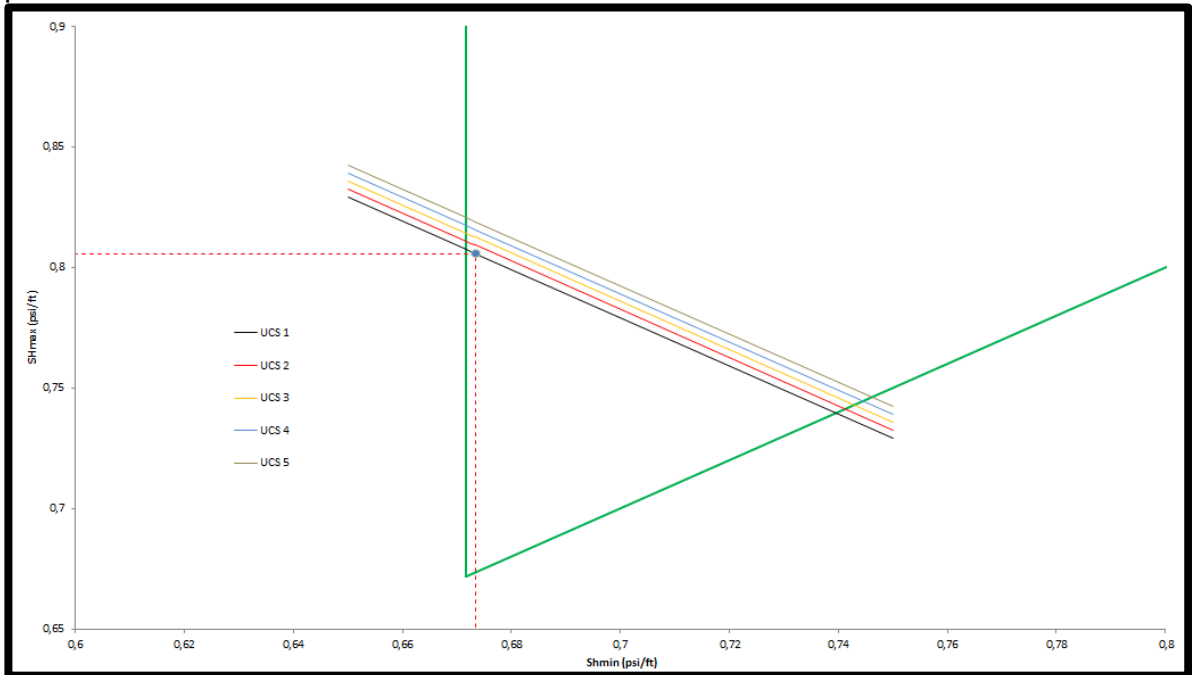
Como se puede observar, es fácil elegir el valor más representativo de UCS, sin embargo hay dos valores de Shmin con igual frecuencia, por esta razón para este Breakout en específico, se usarán ambos datos.

Los resultados del polígono de esfuerzos con los valores elegidos se pueden ver en las gráficas 20, 21, 22, 23 y 24. A pesar de que se grafican todas las opciones, los resultados de los datos elegidos se resaltaron para observar mejor los valores a trabajar.

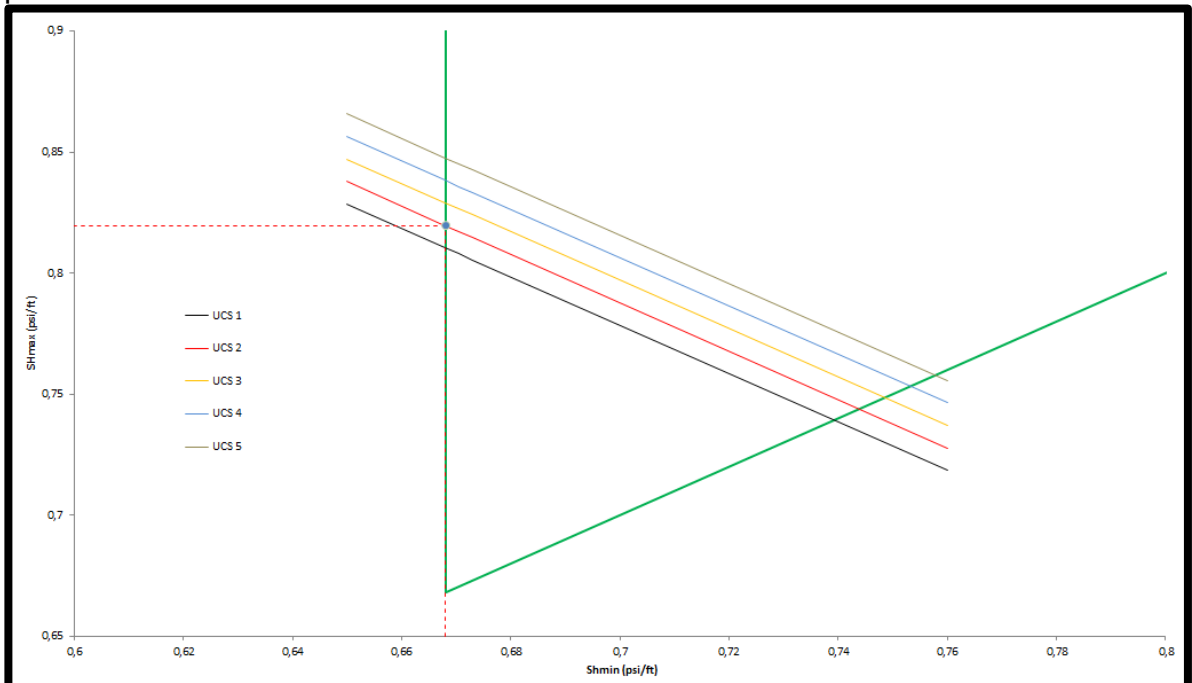
Gráfica 20. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 1.



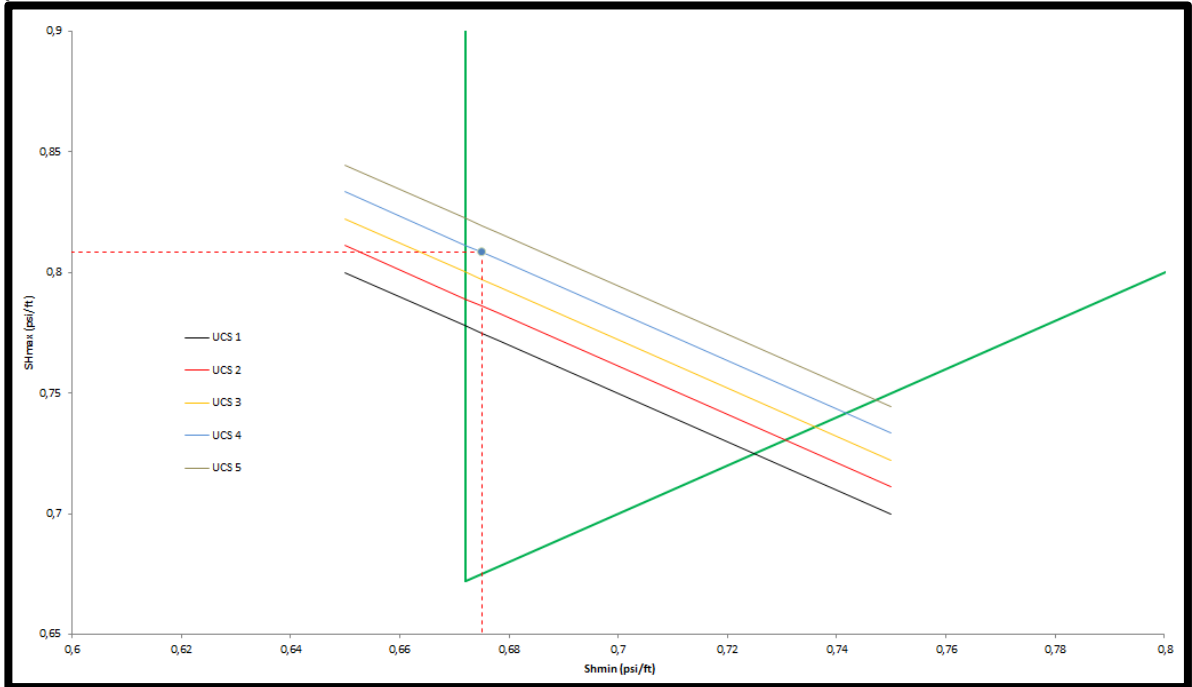
Gráfica 21. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 2.



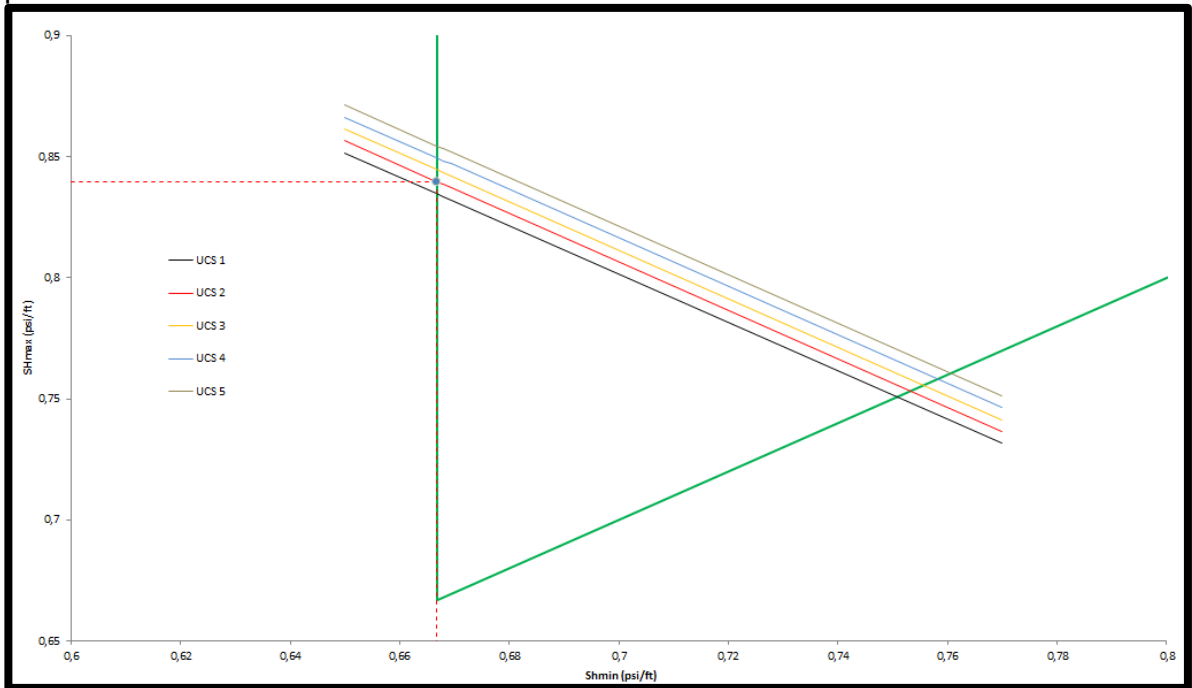
Gráfica 22. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 3.



Gráfica 23. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 4.



Gráfica 24. Evaluación del esfuerzo horizontal máximo en el polígono de esfuerzos para el Breakout 5.



Como se pudo observar, los valores de esfuerzo horizontal máximo encontrados para el primer breakout están por fuera del polígono de esfuerzos, mientras que los encontrados para los demás presentan, no sólo el mismo régimen de esfuerzos (normal como lo muestra la **Figura 13**), sino que también tienen valores cercanos. A partir de los valores escogidos de esfuerzo horizontal mínimo y UCS, se obtuvo la **Tabla 10** con los resultados de esfuerzo horizontal máximo.

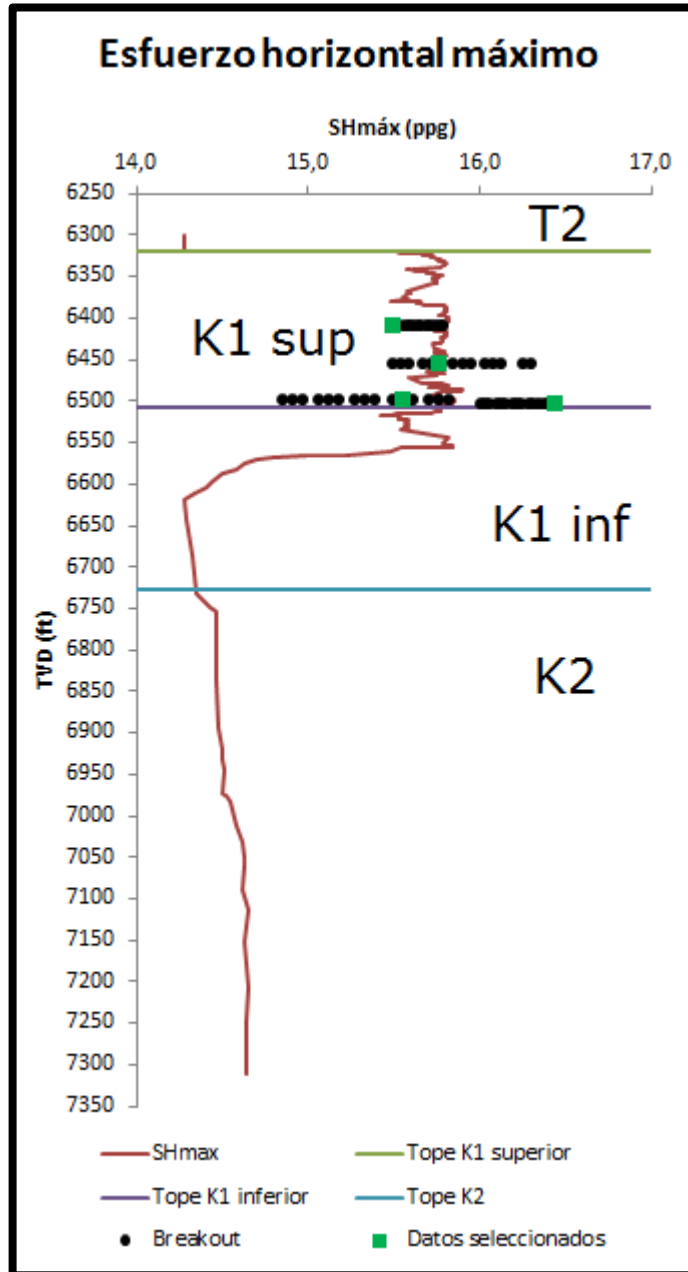
Tabla 10. Resultados de esfuerzos horizontal máximo a partir del polígono de esfuerzos y esfuerzo horizontal mínimo.

	Breakout 2	Breakout 3	Breakout 4	Breakout 5
TVD (ft)	6410	6455	6500	6505
UCS (psi)	3105	3200	3138	3472
Pporo(psi/ft)	0,5167	0,5139	0,5225	0,5094
Shmin (psi/ft)	0,6735	0,6681	0,6750	0,6668
SHmax (psi/ft)	0,8058	0,8197	0,8085	0,8545
SHmax (ppg)	15,50	15,77	15,55	16,44

Finalmente, con los valores encontrados mediante el polígono, la **Ecuación 40** y con ayuda de las ecuaciones de Kirsch, se generó una curva de esfuerzo horizontal máximo a lo largo de toda la sección de 8 ½ con los valores promedio obtenidos de la **Tabla 10**.

Vale la pena aclarar que para llevar a cabo este procedimiento se usa la ecuación de esfuerzo tangencial (**Ecuación 13**), debido a que el análisis se hace en la cara del pozo y al hacer esto las, los valores en las otras ecuaciones de Kirsch se anularían. Los resultados de esta curva se pueden ver en la **Gráfica 25**.

Gráfica 25. Esfuerzo horizontal máximo a partir de las ecuaciones de Kirsch.



A pesar de que la curva generada usando las ecuaciones de Kirsch, no reproduce exactamente el comportamiento de los datos más repetidos, en general se ajusta bien a la totalidad de los datos encontrados y presenta un comportamiento confiable. La variación en los datos es debida a que se trabaja con un grado de incertidumbre relativamente alto, pues con excepción del gradiente de sobrecarga y la presión de poro, las demás propiedades se hallaron mediante relaciones empíricas.

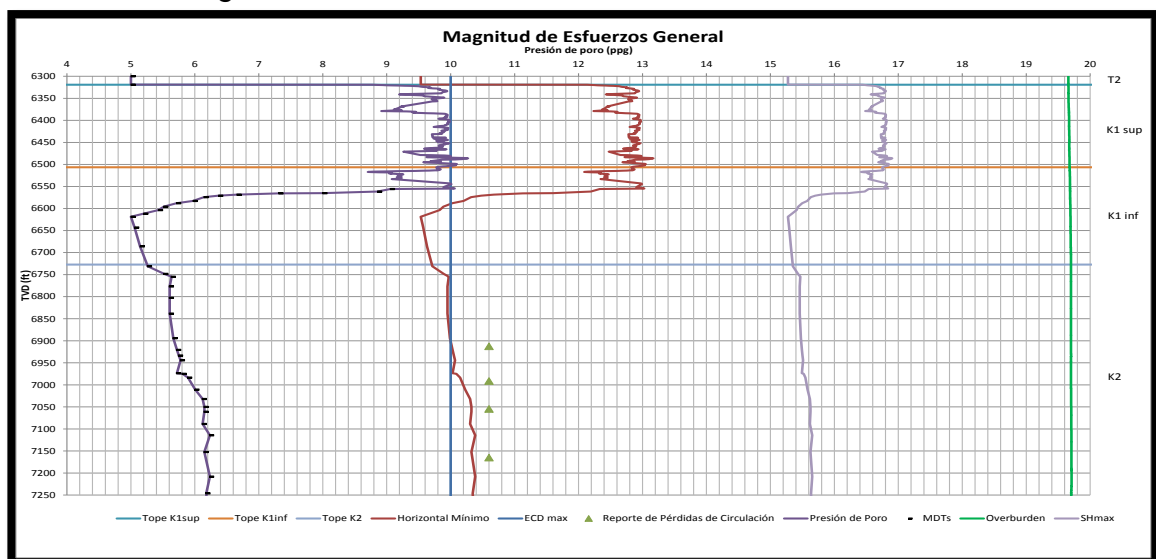
4.8 RESULTADO GENERAL DEL MODELO

El modelo geomecánico obtenido es de carácter normal (régimen de falla normal) y su esfuerzo de sobrecarga coincide con la teoría donde debe ser cercano a 1 psi/ft, y a continuación se presenta la gráfica de los valores obtenidos de los esfuerzos in situ (Overburden, Horizontal máximo, horizontal mínimo) y la presión de poro a continuación.

A pesar de las unidades de esfuerzos corresponden a unidades de presión (psi), usualmente se utiliza en forma de gradiente (psi/ft) y para fines prácticos, cómo la finalidad del cálculo de la magnitud de esfuerzos es generar una ventana operacional para el fluido las se presentan en unidades de densidad del lodo (ppg). Para realizar la conversión de psi/ft a ppg, se utiliza el factor de conversión donde 8,33 ppg equivalen a 0,433 psi/ft.

Cómo resultado se obtuvo la magnitud de los esfuerzos cómo se presenta en la **Gráfica 26**.

Gráfica 26. Magnitudes de Esfuerzos.



5. PROGRAMACIÓN CÍRCULOS DE MOHR Y CRITERIO DE MOHR COULOMB

La programación del criterio de Falla de Mohr-Coulomb y la determinación de los esfuerzos normal y de corte sobre el plano de fractura fueron realizados mediante el software Excel, aplicando todas las ecuaciones que se mostraron en el Marco Teórico, cómo se desarrolla en el presente capítulo.

Tal cómo se registró en el Marco Teórico, se debe llevar a cabo la programación del criterio de falla de Mohr-Coulomb y para determinar el criterio de fractura críticamente esforzada se debe conocer la magnitud del esfuerzo normal y el esfuerzo de corte sobre el plano de fractura.

Cabe resaltar que éste criterio únicamente se determina para fracturas naturales, ya que el tener presente éste tipo de fracturas, representa que debido a las condiciones de esfuerzos in-situ sobre ésta existe una distribución de esfuerzos que sobre el plano de fractura generan un esfuerzo normal y un esfuerzo de corte.

En cuanto a las fracturas inducidas, al no propagarse éstas en un plano asimétrico a los planos principales, sobre éstas la distribución de esfuerzos se convierte en un problema que no aborda el criterio de fracturas críticamente esforzadas, que sumado a que éste tipo de fracturas no se propaga a menos que se supere el esfuerzo horizontal mínimo, no es pertinente al desarrollo de éste trabajo.

5.1 DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS SOBRE EL PLANO DE FRACTURA

Para determinar los esfuerzos sobre el plano de fractura, inicialmente se debe determinar la dirección del plano de fractura, correspondiente a la **Ecuación 25**, la cual tal cómo se expresó en el marco teórico, se debe reemplazar el rumbo (Strike) por la diferencia entre el rumbo y la orientación del esfuerzo máximo (Strike-SHmaxOrientation). Esto se programó en Excel cómo muestra la **Figura 29** para el componente X, y de igual forma se realizó para los componentes Y y Z según la **Ecuación 25** y se muestra en las figuras **Figura 30** y **Figura 31** .

Figura 29. Programación del Vector Normal Unitario Componente X.

G3 : \times \checkmark f_x =-SENO((A3-C3)*3,1416/180)*SENO(B3*3,1416/180)							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Entradas						
2	Strike	Dip	Shmax OR	mu teórico		eje	Vector Normal
3	5,599999	54	130	0,6		x	0,667529583
4	Salidas					y	-0,45707204
5	Sn	Tau	CSF			z	-0,587783469

Figura 30. Programación del Vector Normal Unitario Componente Y.

G4 : \times \checkmark f_x =COS((A3-C3)*3,1416/180)*SENO(B3*3,1416/180)							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Entradas						
2	Strike	Dip	Shmax OR	mu teórico		eje	Vector Normal
3	5,599999	54	130	0,6		x	0,667529583
4	Salidas					y	-0,45707204
5	Sn	Tau	CSF			z	-0,587783469

Figura 31. Programación del Vector Normal Unitario Componente Z.

G5 : \times \checkmark f_x =-COS(B3*3,1416/180)							
	A	B	C	D	E	F	G
1	Entradas						
2	Strike	Dip	Shmax OR	mu teórico		eje	Vector Normal
3	5,599999	54	130	0,6		x	0,667529583
4	Salidas					y	-0,45707204
5	Sn	Tau	CSF			z	-0,587783469

Luego de determinar el vector normal al plano de fractura, se realizó la determinación del vector de tracción sobre el plano según la **Ecuación 27** haciendo uso de la multiplicación de matrices en Excel, cómo muestra la **Figura 32**.

Figura 32. Determinación de las Componentes del Vector de Tracción Sobre el Plano de Fractura.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Entradas							
2	Strike	Dip	Shmax OR	mu teórico		eje	Vector Normal	Pn
3	5,599999	54	130	0,6		x	0,667529583	3601,85612
4	Salidas					y	-0,45707204	-1358,2353
5	Sn	Tau	CSF			z	-0,587783469	-3815,0674
6	5267,59042	1274,9121	-1885,6422			Norma	1	5419,67801
7								Pn
8								
9	Tensor de Esfuerzos							
10	5395,8	0	0	Shmax				
11	0	2971,6	0	Shmin				
12	0	0	6490,6	Sv				

Se observa que en rojo está enmarcada la matriz correspondiente al tensor de esfuerzos y en azul la matriz correspondiente al vector normal unitario.

Posteriormente se determinaron las componentes del esfuerzo normal según la **Ecuación 28** cómo lo muestra la **Figura 33**.

Figura 33. Determinación del Esfuerzo Normal Mediante el Producto Punto.

	C	D	E	F	G	H	I	J
	Entradas							
	Shmax OR	mu teórico		eje	Vector Normal	Pn	Sn	Tau
	54	130	0,6	x	0,667529583	3601,85612	2404,34551	
				y	-0,45707204	-1358,2353	620,811367	
	CSF			z	-0,587783469	-3815,0674	2242,43354	
	,9121	-1885,6422					suma	
				Norma		1	5419,67801	5267,59042
						Pn	Sn	1274,9121
								Tau

En dicha figura se observa que en recuadro verde está la celda que multiplica componente a componente el vector normal unitario y el vector de tracción, y en naranja se observa la sumatoria de las multiplicaciones de las componentes que corresponden al producto punto y a su vez a la magnitud del vector esfuerzo normal sobre el plano de fractura.

Contiguo al valor de esfuerzo normal, se observa en una elipse roja el esfuerzo de corte o Tau, calculado mediante la **Ecuación 29**.

Estos dos valores de esfuerzo normal y esfuerzo de corte, van a representar un punto en el diagrama de Mohr-Coulomb, donde cada par de valores corresponden a un punto en el plano cartesiano, en el cual se va a evaluar el criterio de falla de Mohr-Coulomb.

Dicha programación se replicó la cantidad de veces necesaria para evaluar todas las fracturas presentes en el registro de imagen, generando un solo diagrama de Mohr-Coulomb para cada una de las formaciones a evaluar (T2, K1 y K2).

5.2 CONSTRUCCIÓN DE CÍRCULOS DE MOHR Y ENVOLVENTE DE FALLA.

Los círculos de Mohr, se graficaron mediante la ecuación de la circunferencia, en la cual únicamente se considera la región positiva dada la simetría del cuerpo y que los esfuerzos en todas las caras son únicamente compresivos, utilizando la ecuación de la circunferencia despejada para valores de la raíz positiva que corresponde a la ecuación, donde el eje Y corresponde al esfuerzo de corte y el eje X al esfuerzo normal sobre el plano de fractura.

Ecuación 41. Ecuación de la Circunferencia Despejada para eje Y.

$$y = \sqrt{r^2 - (x - h)^2} + k$$

Donde:

x = corresponde al esfuerzo normal

y = esfuerzo de corte.

h = coordenada del centro del círculo en dirección de las abscisas.

k = coordenada del centro del círculo en dirección de las ordenadas.

r = radio del círculo.

Esto según las ecuaciones de marco teórico en el numeral correspondiente al círculo de Mohr.

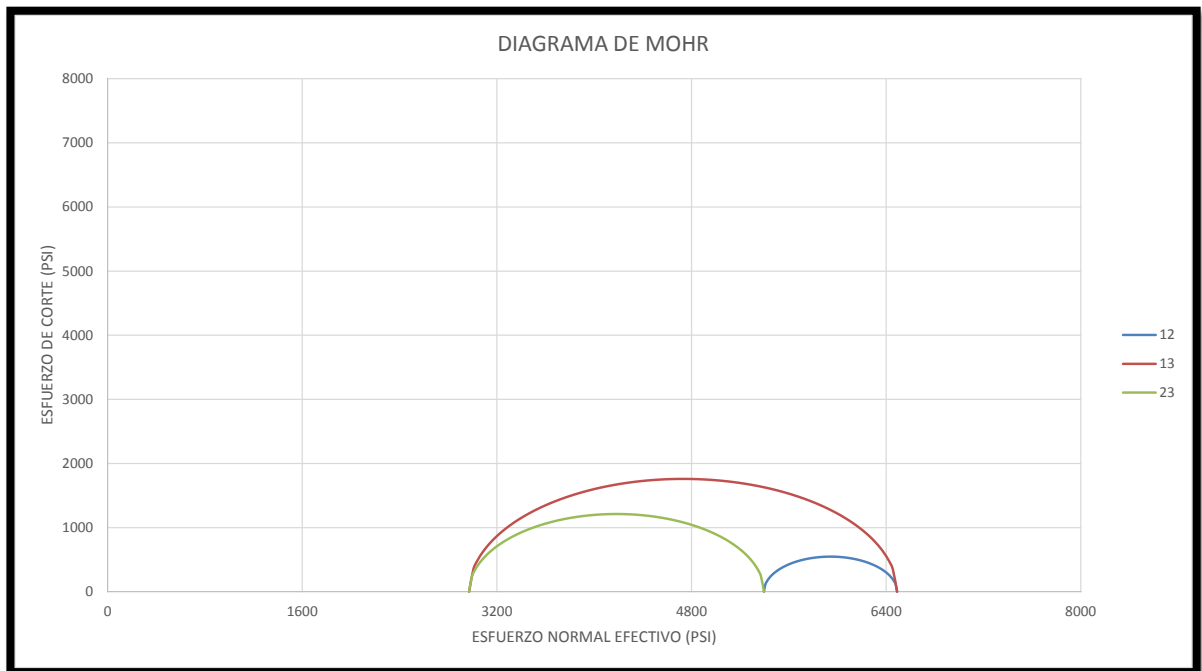
Esto se realizó asignando 100 valores en la abscisa (sigma) y evaluando los valores en la ordenada cómo muestra la **Figura 34**.

Figura 34. Construcción de Círculos de Mohr.

B3 : $=((D2^2-(A3-E2)^2))^{1/2}+F2$						
	A	B	C	D	E	F
1	Circulo de Mohr Esfuerzos 12			r	h	k
2	Sigma	Tau		547,4	5943,2	0
3	6490,6	2,28882E-05				
4	6479,652	108,9312246		Determinar el Punto con Teta		
5	6468,704	153,272		Angulo (deg)	Sigma	Tau
6	6457,756	186,7588897		54,00042092	5774,03798	520,605106
7	6446,808	214,5361096				
8	6435,86	238,6061282				

De forma similar se realizó la construcción de los círculos de Mohr, llegando a tener como resultado un diagrama de Mohr como el que muestra la **Figura 35**.

Figura 35. Diagrama con Círculos de Mohr.



Para que se generaran los círculos se asumieron ciertos valores de esfuerzos σ_1 , σ_2 , y σ_3 correspondientes a gradientes de 0,99; 0,85; y 0,54 respectivamente; siendo evaluados a una profundidad de 7820 ft para la prueba de la programación.

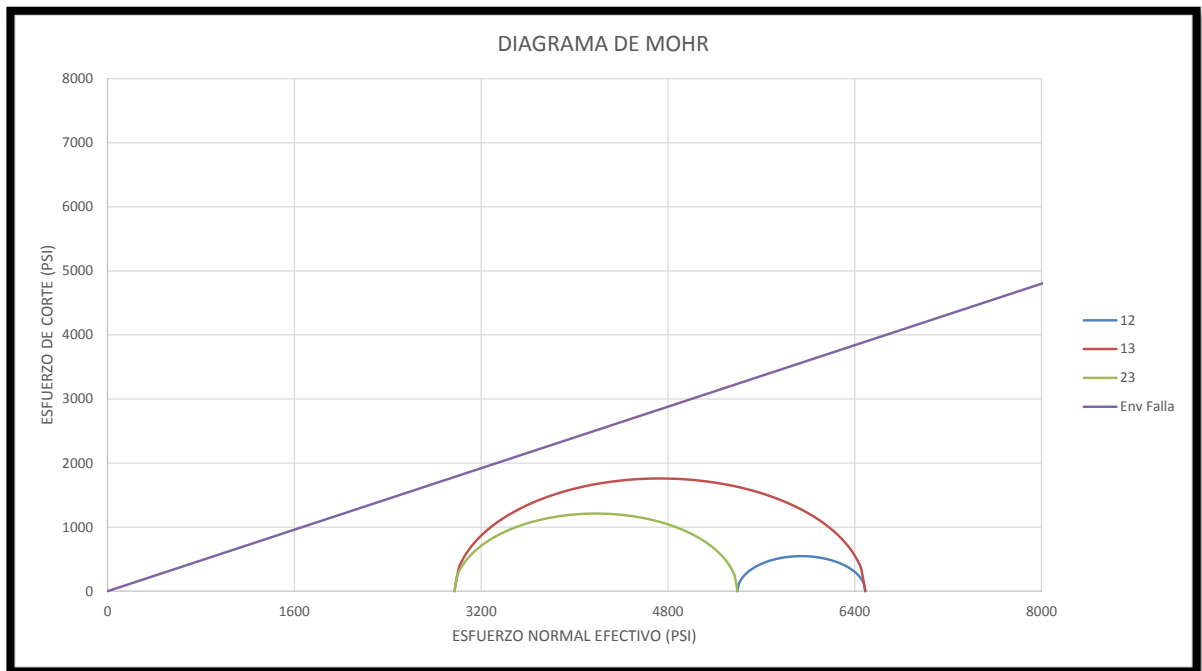
Posteriormente se programó la envolvente de falla según la ecuación **Ecuación 30**, la cual corresponde a una línea recta de pendiente μ ($\mu=0,6$ para la evaluación del criterio), y con intersección en el origen según lo muestra la **Figura 36**.

Figura 36. Programación Envolvente de Falla.

B4		=F\$2*A4+\$E\$2			
	A	B	C	D	
1	Envolvente				
2	Sigma	Tao			
3		0	0		
4	84,906	50,9436			
5	169,812	101,8872			
6	254,718	152,8308			
7	339,624	203,7744			
8	424,53	254,718			
9	509,436	305,6616			

De ésta forma, se genera la línea que pasa por el origen y tiene pendiente de 0,6 cómo lo muestra la **Figura 37**.

Figura 37. Círculos de Mohr con Envolvente de Falla.



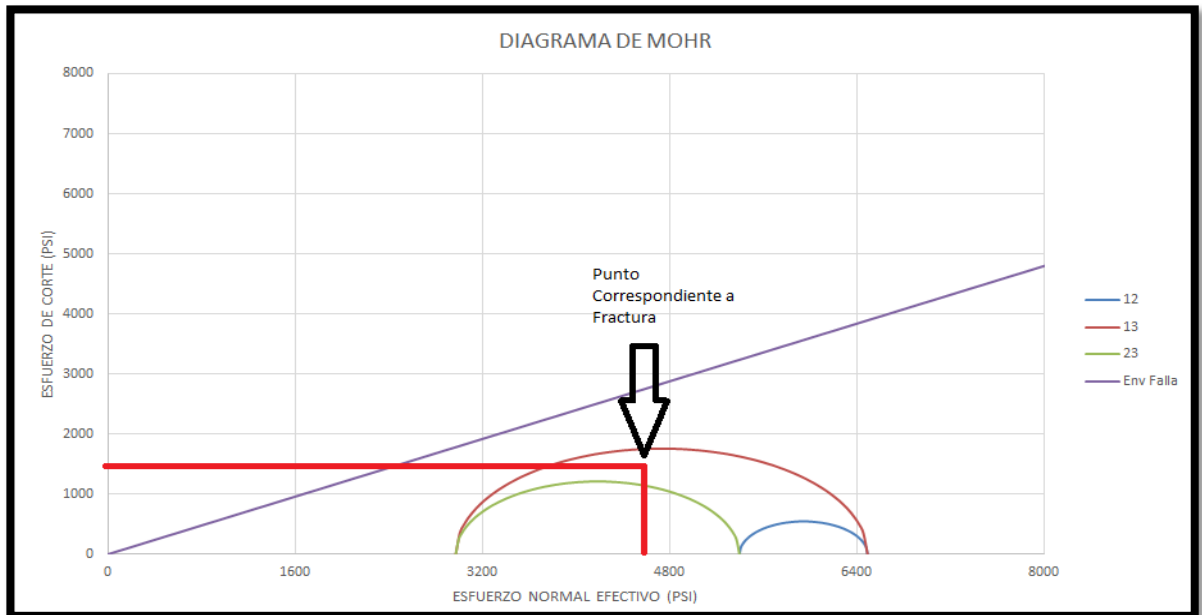
En dicha figura, la envolvente de falla corresponde a la línea de color morado, la cual indica las condiciones de relación entre esfuerzo normal y esfuerzo de cortes a las cuales la fractura debería comenzar a deslizarse o ser hidráulicamente conductiva.

5.3 INTEGRACIÓN DE ESFUERZO NORMAL Y DE CORTE, CIRCULOS DE MOHR Y ENVOLVENTE DE FALLA

Al haber construido los círculos de Mohr y programado la envolvente de falla, para evaluar el criterio de fracturas críticamente esforzadas sobre una sola fractura es necesario graficar el valor de esfuerzo normal y esfuerzo de corte sobre dicha fractura en un diagrama cómo el presentado en la **Figura 37**.

Cuando se grafican dichos valores en el diagrama, éstos van a estar por encima o por debajo de la línea de envolvente de falla, lo cual va a mostrar si se cumple el criterio de fractura críticamente esforzada.

Figura 38. Gráfica de un Punto Correspondiente a una Fractura.



Luego haber determinado sobre el plano de fractura los esfuerzos normal y de corte, éstos deben graficarse según las líneas rojas, y se generará un punto, correspondiente a cada fractura, con el cual se evaluará el criterio de falla de Mohr-Coulomb, cómo se mostró en el marco teórico.

En cuanto a la evaluación de todas las fracturas, ésta se presentará en el próximo capítulo según la información de registros de imágenes, y el tensor de esfuerzos obtenidos del modelo geomecánico.

Además, con las ecuaciones anteriores, se generó una interfaz de datos de entrada del modelo geomecánico cómo muestra la **Figura 39**.

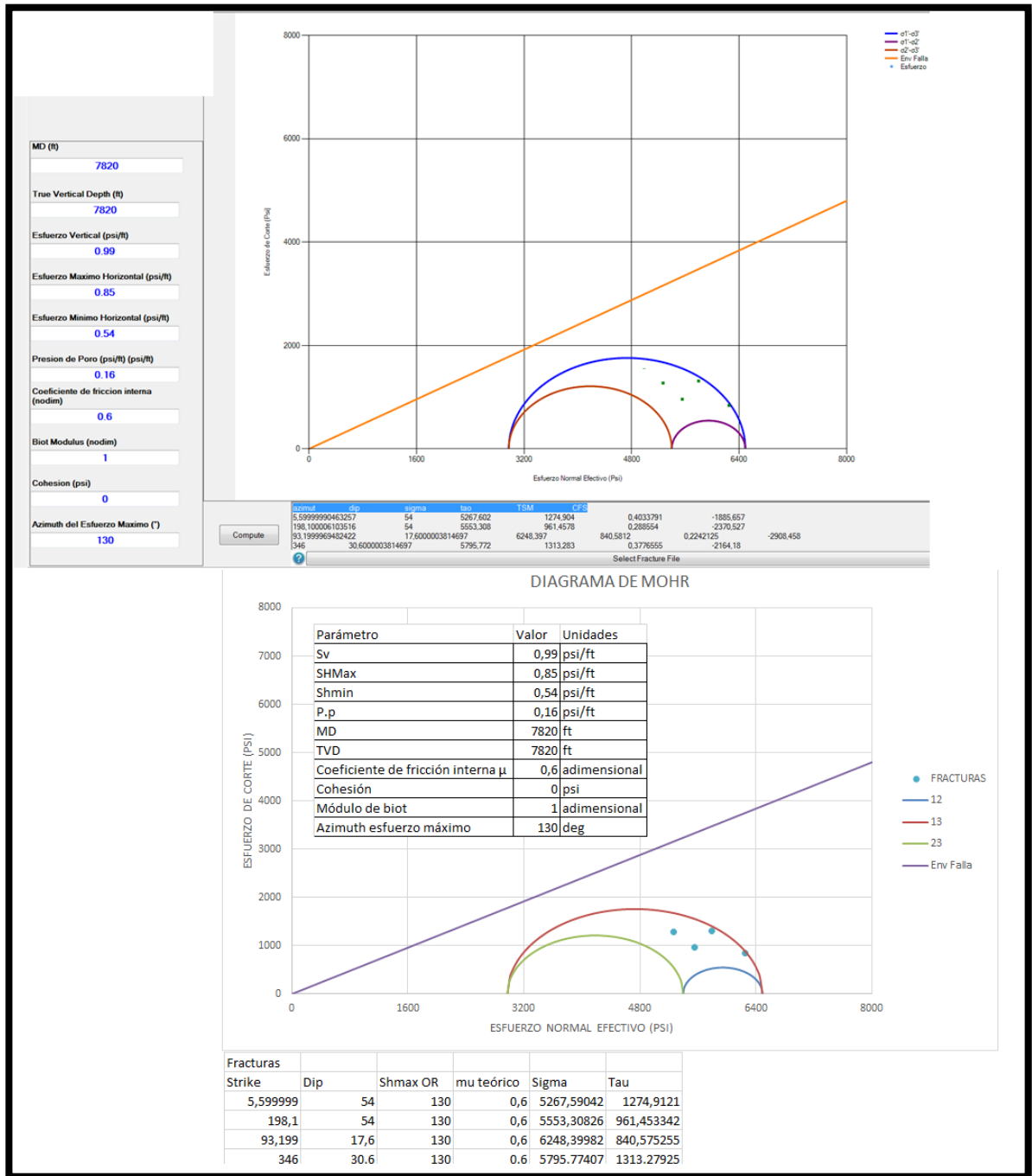
Figura 39. Interfaz de Entrada Modelo.

Parámetro	Valor	Unidades
Sv	1,02	psi/ft
SHMax	0,84	psi/ft
Shmin	0,5	psi/ft
P.p	0,4	psi/ft
MD	6724	ft
TVD	6319	ft
Coeficiente de fricción interna μ	0,6	adimensional
Cohesión	0	psi
Azimuth esfuerzo máximo	135	deg

Adicionalmente se generó una tabla de información de fracturas (rumbo y buzamiento), similar a la **Figura 38** pero para cada grupo.

La correcta programación del criterio (círculos de Mohr, envolvente de falla y esfuerzos sobre el plano de fractura) fue verificada por Ecopetrol S.A. utilizando un software propio, obteniendo una exactitud del 100% respecto a lo obtenido del software, cómo lo muestra la **Figura 40**, donde la parte superior corresponde a lo obtenido mediante el software de Ecopetrol y la parte inferior lo obtenido mediante lo que se programó.

Figura 40. Validación de la Programación del Criterio.



Fuente: Software geomecánico de Ecopetrol S.A. Modificado por los autores.

6. EVALUACIÓN DE RELACIÓN DE FRACTURAS CRÍTICAMENTE ESFORZADAS CON LAS PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN

Desde la literatura, las fracturas en estado crítico de esfuerzos son hidráulicamente conductivas, por lo cual es posible que éstas sean un mecanismo de pérdidas de circulación, y en el presente capítulo se presenta un análisis de las mismas en diferentes grupos de fracturas unos ubicados en zonas de pérdidas de fluido y otros en zonas donde no hubo pérdidas de circulación.

Cómo herramientas para la evaluación del criterio de fracturas críticamente esforzadas se requiere básicamente tener la información del modelo geomecánico (magnitudes de los esfuerzos in situ) con el fin de realizar la evaluación del criterio en las diferentes fracturas.

Las fracturas naturales identificadas por el registro de imágenes se dividieron en dos grupos generados por el analista de fracturas, identificando fracturas abiertas y parcialmente abiertas, pero dicha clasificación no es tomada en cuenta ya que el criterio de fracturas críticamente esforzadas está afectado por el estado de esfuerzos sobre la fractura y no por dicha clasificación.

La identificación y clasificación de las fracturas se muestran en la **Tabla 11**, y se clasificaron en abiertas y parcialmente abiertas y según la formación cómo se muestra a continuación.

Tabla 11. Identificación de Fracturas.

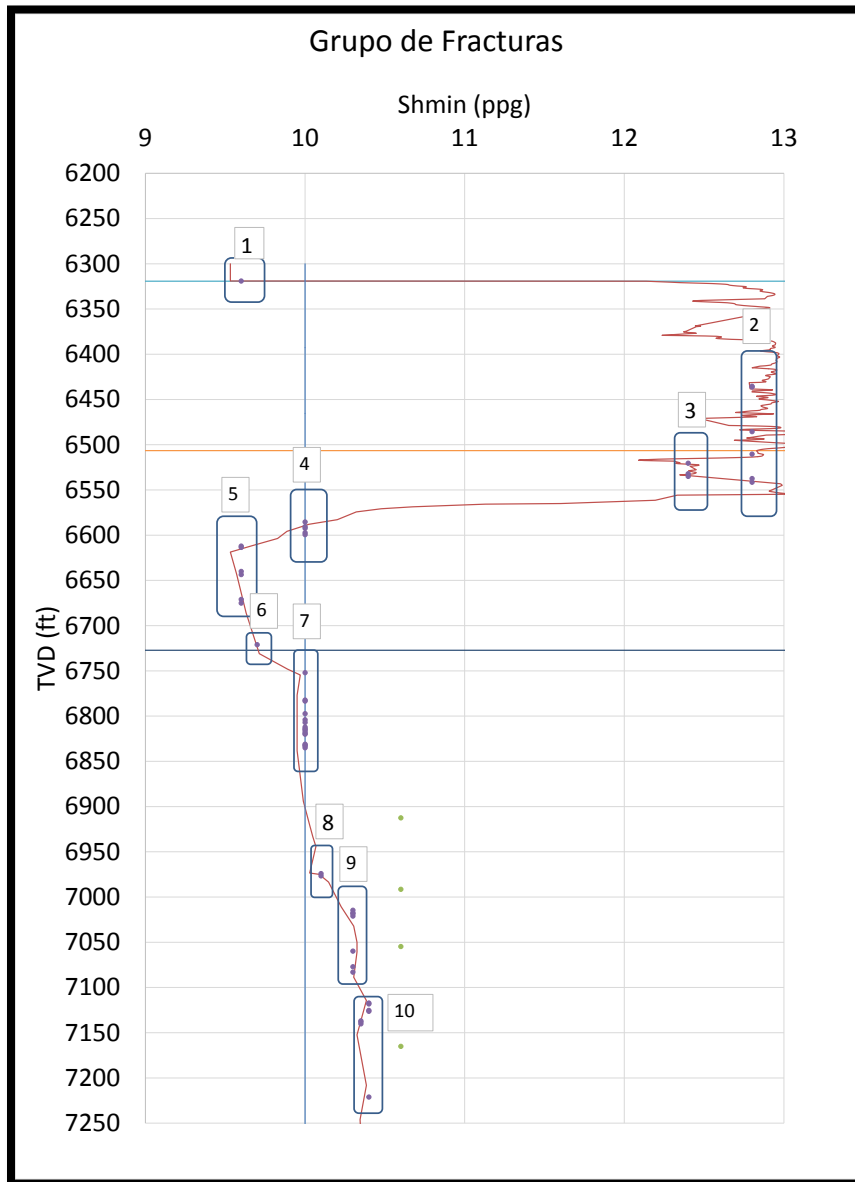
Unidades	Tope MD [ft]	Tope TVD [ft]	Fracturas	
			Abiertas	Parcialmente abiertas
T2	6683	-	0	1
K1 superior	6730	6324	0	3
K1 inferior	6989	6512	3	15
K2	7330	6746	17	16

Luego de identificar las fracturas naturales que se presentaron en el pozo, se establecieron grupos de fracturas que les aplicara el mismo modelo geomecánico, teniendo en cuenta básicamente clasificarlas con base en la curva de esfuerzo horizontal mínimo pero teniendo en cuenta que los comportamientos de presión de poro y esfuerzo horizontal mínimo son iguales dado que el esfuerzo horizontal

mínimo es función de la presión de poro, y considerando el esfuerzo de sobrecarga (overburden) cómo constante.

Teniendo en cuenta lo anterior se identificaron diferentes grupos de fracturas cómo lo muestra la **Gráfica 27**.

Gráfica 27. Grupos de fracturas.



De acuerdo con esos grupos de fracturas, se evaluaron dos posibles escenarios de esfuerzos en el plano de fractura.

Básicamente se proponen dos escenarios, uno donde la presión de poro sobre el plano de fractura está dada por la presión de poro de la formación, y otro posible

escenario donde la presión de poro (en el plano de fractura) está dada por la densidad del fluido; atribuyendo éstos dos escenarios al aislamiento del *mud cake* formado por el fluido de perforación y al puenteo de sus componentes, o a que dicho aislamiento no exista.

Para ello el escenario donde existe aislamiento se le denominará escenario 1 y el escenario donde no existe aislamiento se le denominará escenario 2.

Para la evaluación del criterio, en el caso del escenario 1 se utilizó la información correspondiente a la **Tabla 12**, mientras que para el escenario 2 se utilizó la presión de poro correspondiente a 10 ppg como ECD máximo alcanzado durante las operaciones de perforación (información suministrada por Ecopetrol).

Tabla 12. Valores de Entrada Criterio.

Grupo	TVD (ft)	Sv (ppg)	Shmin (ppg)	Presión de Poro (ppg)	Shmax (ppg)
1	6319	19,6	9,6	5	15,2
2	6491	19,6	12,8	9,9	16,7
3	6529	19,6	12,4	9,2	16,6
4	6593	19,6	10	5,7	16,4
5	6654	19,6	9,6	5,2	15,8
6	6810	19,6	10	5,6	15,2
7	6975	19,6	10,1	5,9	15,3
8	7042	19,6	10,3	6,1	15,5
9	7122	19,6	10,4	6,2	15,5
10	7159	19,6	10,4	6,1	15,5

Sumado a los valores de entrada del modelo geomecánico, se relacionan a continuación los datos de rumbo y buzamiento de la fractura según e identificó en el registro y al grupo de fractura que pertenecen según el modelo geomecánico.

Tabla 13. Datos de Fractura y Grupo.

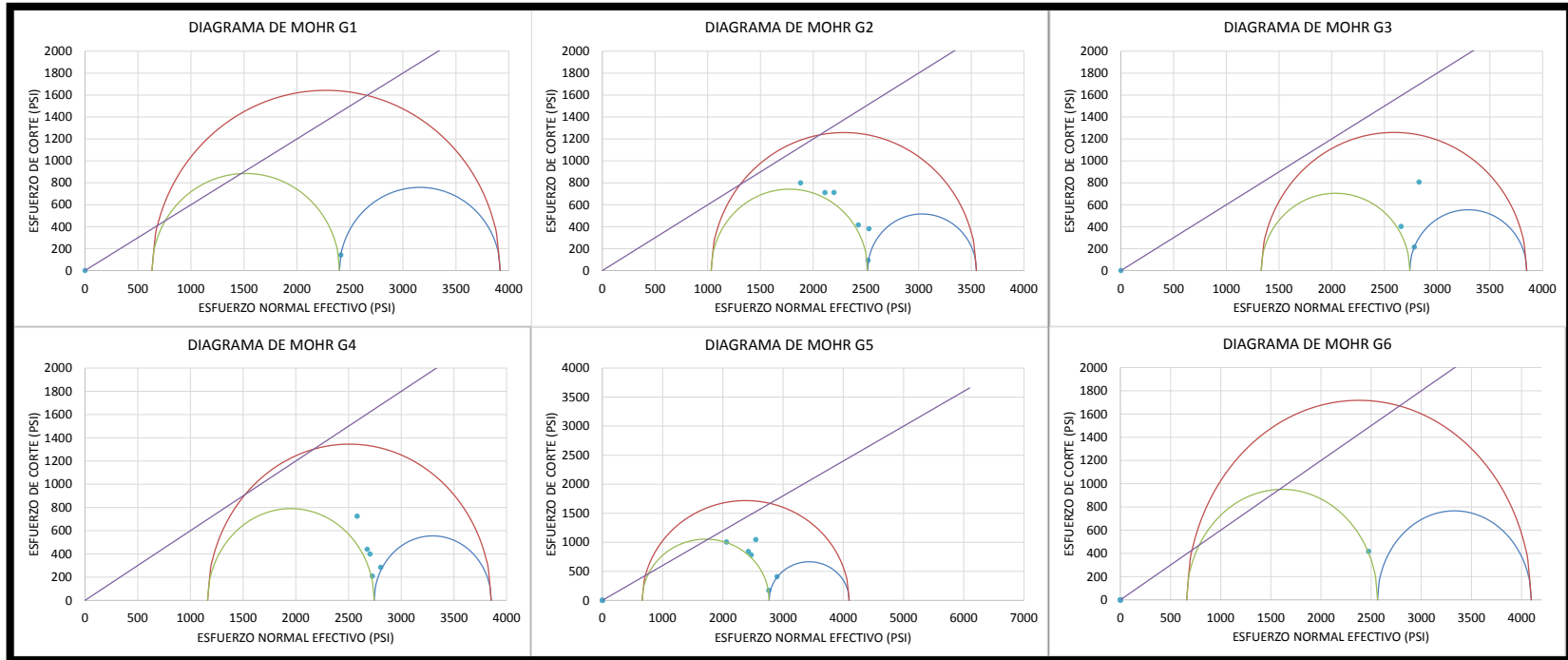
Grupo	TVD (ft)	Rumbo	Buzamiento
1	6319	44,79	84,61
2	6435,4	43,05	85,64
2	6436,13	236,28	75,46
2	6485,45	194	76,77
2	6510,3	240,86	82,08
3	6520,4	224,13	85,11
3	6532	199,11	88,21
3	6535	252,99	58,03
2	6537,3	11,85	80,67

Grupo	TVD (ft)	Rumbo	Buzamiento
2	6541,4	1,49	78,67
4	6585,4	19,08	71,65
4	6590,58	32,12	79,53
4	6592,4	30,11	79,86
4	6597,2	217,94	85,87
4	6599,3	41,38	75,68
5	6612	199,77	81,59
5	6613,42	201,92	82,78
5	6640	229,18	86,55
5	6643,5	42,62	71,5
5	6671	80,71	86,4
5	6675	16,08	67,35
5	6721	214,2	87,22
6	6752	160,97	72,58
6	6782,2	23,07	85,85
6	6783,3	36,95	71,05
6	6797,2	54,75	76,8
6	6804	48,05	62,58
6	6807	26,07	58,82
6	6812	179,45	66,72
6	6814	160,57	80,84
6	6815	247,44	69,49
6	6817	136,79	62,93
6	6819	143,76	79,19
6	6820	333,89	85,03
6	6831	234,41	81,57
6	6832	287,9	73,05
6	6833	12,37	73,25
6	6835	7,38	79,35
7	6974	9,7	67,56
7	6976,59	239,99	85,53
8	7014,56	60,43	84,64
8	7017,5	88,98	81,8
8	7018,42	10,6	73,18
8	7021,01	4,78	73,67
8	7059,79	250,31	81,8
8	7077,07	199,47	71,47
8	7083	55,1	68,3
9	7117,16	334,71	46,41
9	7118,13	168,2	62,2

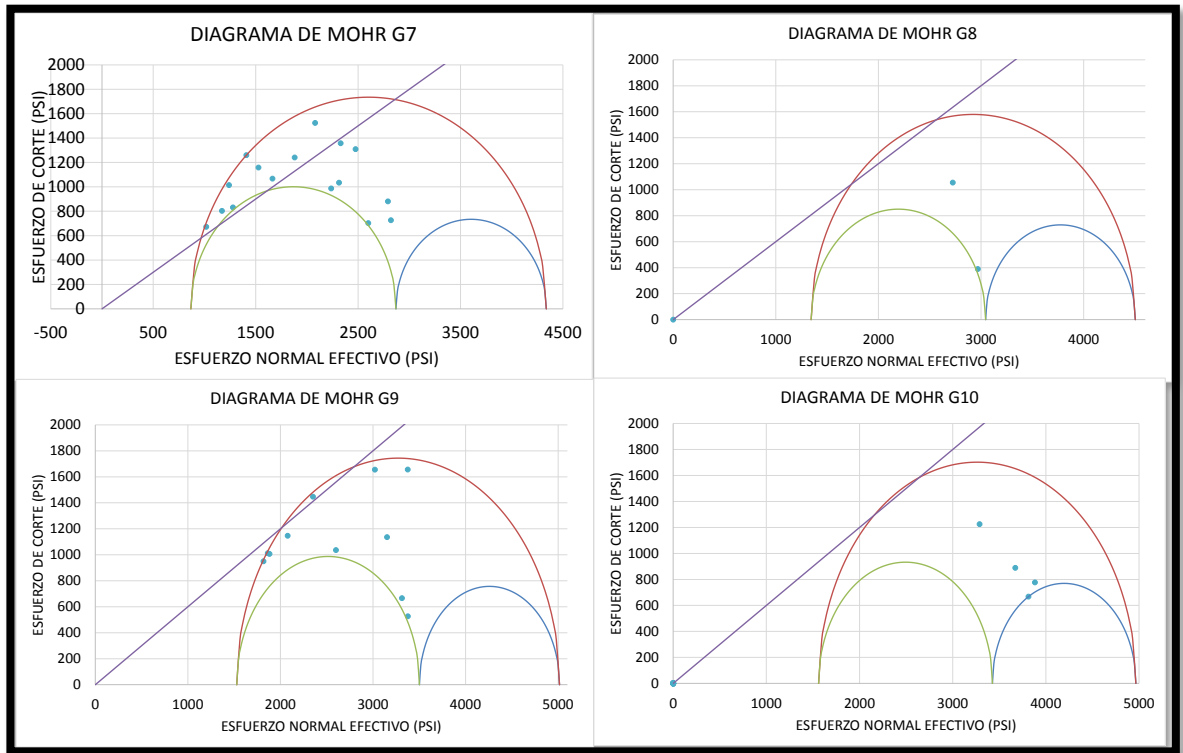
Grupo	TVD (ft)	Rumbo	Buzamiento
9	7125,25	186,35	72,55
9	7126,22	159,06	51,75
10	7136,9	26,62	60,02
10	7138,18	44,35	59,94
10	7140,12	54,17	55,72
10	7221,09	8,14	60,59

Con base en ésta información se realizó la evaluación del criterio de fracturas críticamente esforzadas, para los dos escenarios propuestos obteniendo los siguientes diagramas de Mohr-Coulomb; graficados para el escenario 1 en las y **Gráfica 29**.

Gráfica 28. Evaluación del Criterio de Falla en Zonas Sin Pérdidas de Circulación.

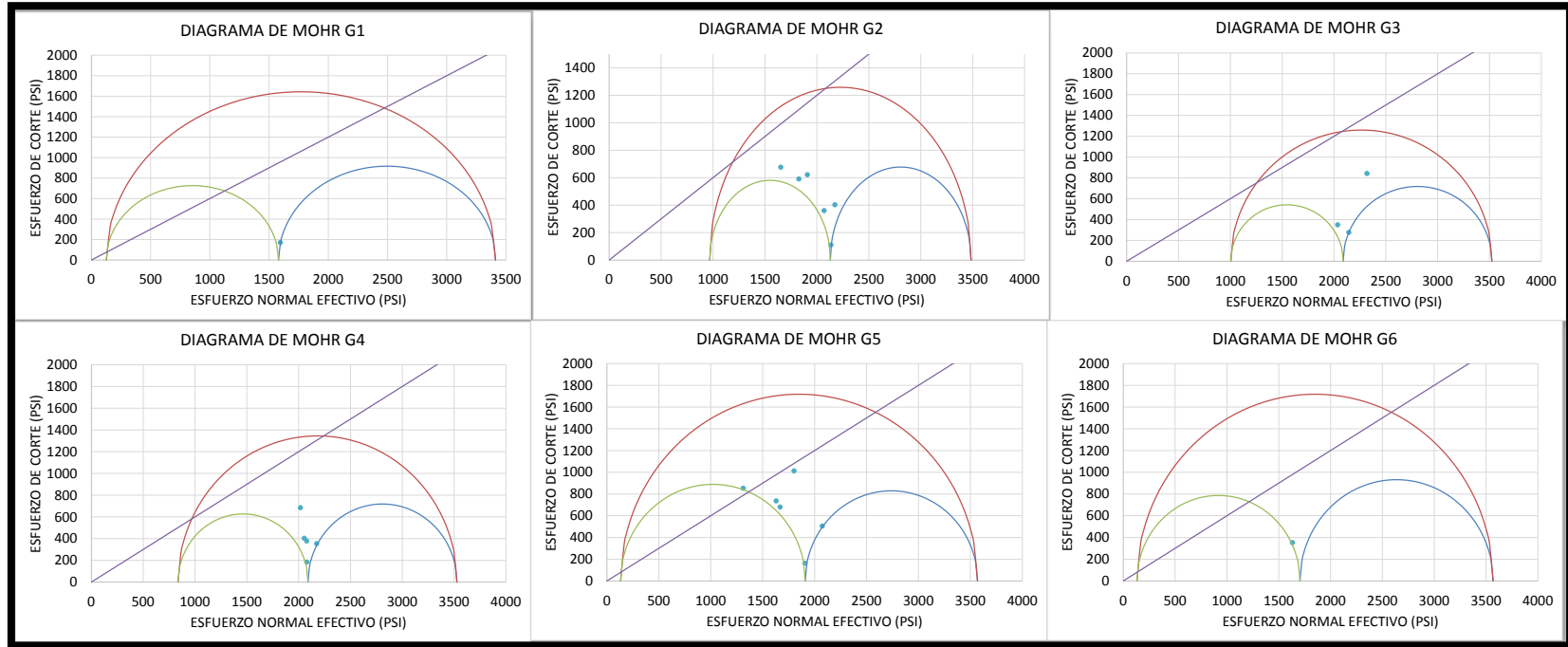


Gráfica 29. Evaluación Del Criterio de Falla en Zonas Con Pérdidas de Circulación.

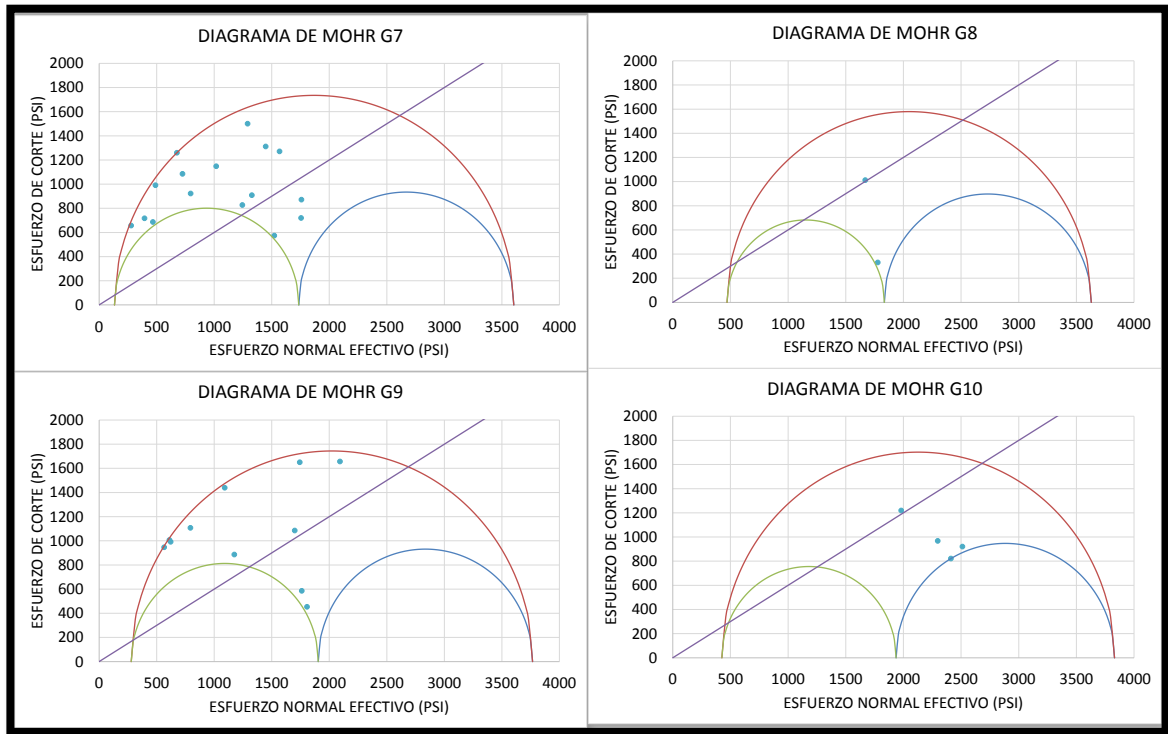


Para el escenario 2 se obtuvieron los diagramas de Mohr-Coulomb correspondientes son los de las **Gráfica 30** y **Gráfica 31**.

Gráfica 30. Evaluación Del Criterio de Falla en Zonas Sin Pérdidas de Circulación.



Gráfica 31. Evaluación Del Criterio de Falla en Zonas Con Pérdidas de Circulación.



Cómo se observa tanto en los escenarios 1 y 2, cualquier condición (aislamiento de la fractura o no) genera fracturas críticamente esforzadas en la zona de pérdidas de circulación (correspondiente a los grupos de fracturas 7, 8, 9 y 10); mientras que para los demás grupos de fracturas en el escenario 1 (aislamiento) no se presentan fracturas críticamente esforzadas para la zona sin pérdidas mientras que para el escenario 2 (no aislamiento) se presentan una única fractura críticamente esforzada correspondiente al grupo 5.

Por lo tanto, es posible afirmar que las fracturas críticamente esforzadas están relacionadas con las pérdidas de circulación, es decir que las fracturas críticamente esforzadas son hidráulicamente conductivas durante la perforación.

Además, es válido afirmar que un escenario donde no se forme revoque o no exista puenteo, genera reactivación de ciertas fracturas, dado que en el escenario dos se presentaron fracturas críticamente esforzadas que no se presentaron en el escenario 1.

También, a continuación en la **Tabla 14** se presenta una tabla del esfuerzo normal y esfuerzo de corte efectivo sobre el plano de fractura para los escenarios 1 y 2 y su comparación con la presión de poro:

Tabla 14. Comparación de esfuerzo normal y de corte con la presión de poro.

Grupo	Presión de Poro (ppg)	Escenario 1		Escenario 2	
		Esfuerzo normal efectivo (ppg)	Esfuerzo de corte efectivo (ppg)	Esfuerzo normal efectivo (ppg)	Esfuerzo de corte efectivo (ppg)
1	5	7,34	0,43	5,04	0,43
2	9,9	7,53	0,28	6,56	0,28
2	9,9	7,55	1,14	6,59	1,14
2	9,9	6,51	2,11	5,56	2,11
2	9,9	7,16	1,23	6,21	1,23
3	9,2	7,83	1,19	6,10	1,19
3	9,2	8,19	0,63	6,46	0,63
3	9,2	8,32	2,37	6,59	2,37
2	9,9	6,21	2,09	5,26	2,09
2	9,9	5,52	2,35	4,58	2,35
4	5,7	7,53	2,12	5,82	2,12
4	5,7	7,88	1,16	6,17	1,16
4	5,7	7,80	1,28	6,09	1,28
4	5,7	7,94	0,61	6,23	0,61
4	5,7	8,17	0,83	6,46	0,83
5	8,2	7,04	2,45	4,74	2,45
5	8,2	7,18	2,27	4,88	2,27
5	8,2	8,00	0,50	5,70	0,50
5	8,2	8,39	1,18	6,09	1,18
5	8,2	5,93	2,90	3,65	2,90
5	8,2	7,33	3,02	5,05	3,02
6	5,6	7,08	1,20	4,81	1,20
7	5,9	4,35	3,30	1,47	3,26
7	5,9	7,37	1,99	4,37	1,93
7	5,9	5,33	3,51	2,43	3,47
7	5,9	6,54	2,92	3,59	2,86
7	5,9	6,99	3,70	4,08	3,67
7	5,9	5,87	4,30	3,02	4,29
7	5,9	3,98	3,55	1,15	3,55
7	5,9	3,30	2,27	0,46	2,22
7	5,9	7,87	2,48	4,91	2,47
7	5,9	6,57	3,83	3,68	3,80
7	5,9	4,69	3,01	1,81	2,94
7	5,9	3,60	2,34	0,75	2,27
7	5,9	6,29	2,78	3,36	2,70

Grupo	Presión de Poro (ppg)	Escenario 1		Escenario 2	
		Esfuerzo normal efectivo (ppg)	Esfuerzo de corte efectivo (ppg)	Esfuerzo normal efectivo (ppg)	Esfuerzo de corte efectivo (ppg)
7	5,9	7,94	2,04	4,96	2,03
7	5,9	3,49	2,85	0,66	2,84
7	5,9	2,86	1,89	0,04	1,88
8	6,1	7,51	2,91	4,36	2,91
8	6,1	8,18	1,07	5,03	1,07
9	6,2	9,25	1,44	5,06	1,44
9	6,2	7,12	2,84	2,94	2,84
9	6,2	5,15	2,76	0,97	2,76
9	6,2	4,97	2,60	0,79	2,60
9	6,2	9,02	1,81	4,86	1,81
9	6,2	5,64	3,11	1,49	3,11
9	6,2	8,55	3,08	4,40	3,08
9	6,2	9,11	4,47	4,99	4,47
9	6,2	6,35	3,91	2,22	3,91
9	6,2	5,03	2,73	0,91	2,73
9	6,2	8,14	4,47	4,02	4,47
10	6,1	9,89	9,89	6,07	2,40
10	6,1	9,88	9,88	6,44	1,80
10	6,1	9,88	9,88	6,63	2,09
10	6,1	9,77	9,77	4,97	3,26

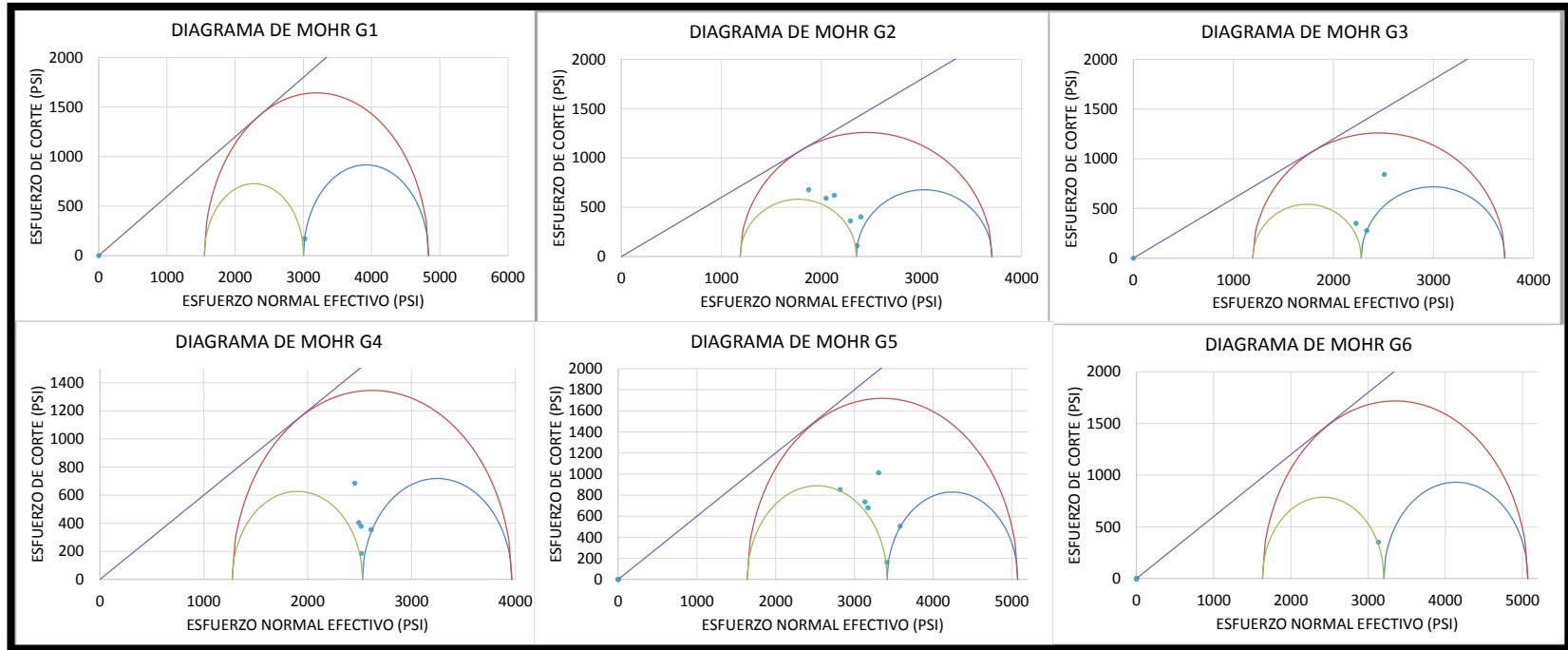
Cómo se observa en el cuadro anterior, los valores de esfuerzos normales y de corte corresponden a valores de esfuerzo normal y de corte efectivo sobre el plano de fractura, superiores al valor de presión de poro.

Además de lo anterior, se generó una evaluación de sensibilidad sobre la presión de poro, con el fin de identificar a que densidad del lodo las fracturas no se reactivarían, es decir donde la envolvente de falla se convirtiera en una recta tangente al círculo de Mohr entre el esfuerzo horizontal mínimo y el esfuerzo de sobrecarga.

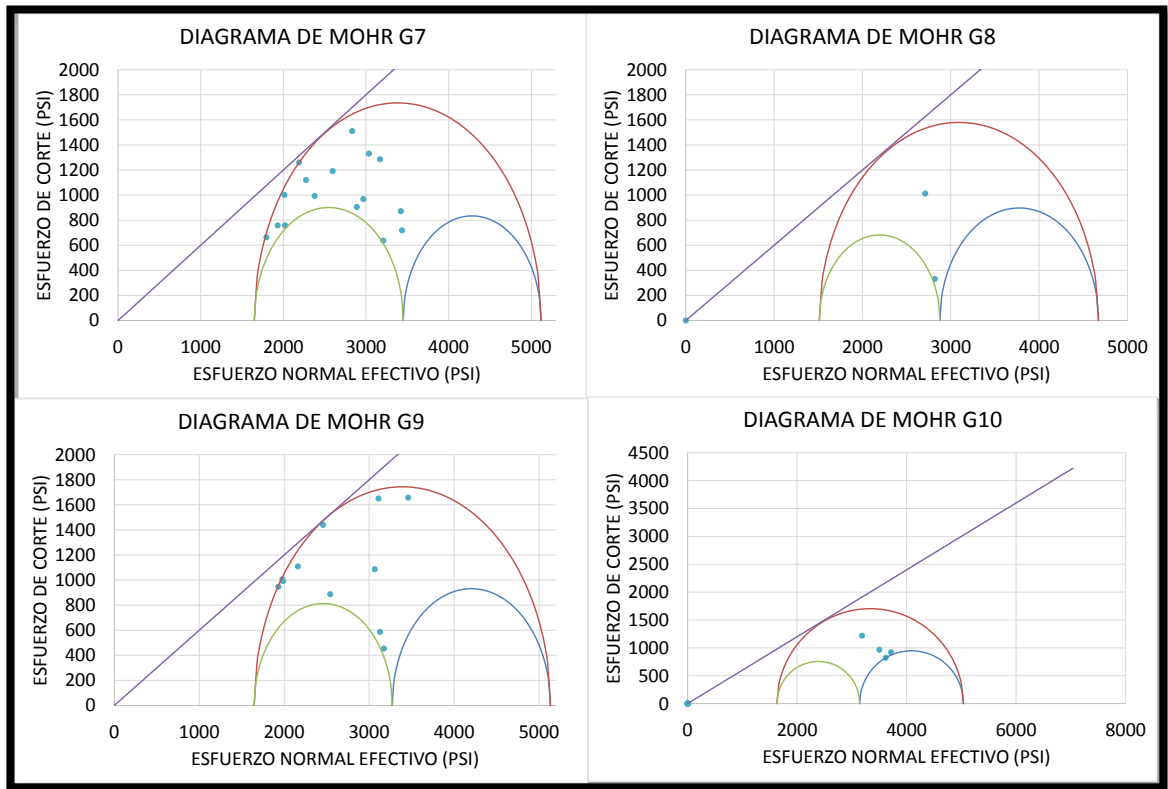
Los diagramas de Mohr-Coulomb obtenidos corresponden a las condiciones de presión de poro en las cuales no habría reactivación de fracturas y se muestra la envolvente tangente al círculo del diagrama, es decir la presión de poro a la que no habría fracturas hidráulicamente conductivas, y se presentan en las **Gráfica 32** y **Gráfica 33** cómo diagrama de Mohr-Coulomb, que llevado a su profundidad

correspondiente se presenta con la **Gráfica 34** la cual corresponde a lo tabulado en la **Tabla 14**.

Gráfica 32. Diagramas de Mohr para Gradientes de Reactivación de Fracturas Grupo 1 al 6.



Gráfica 33. Diagramas de Mohr para Gradientes de Reactivación de Fracturas Grupo 7 al 10.



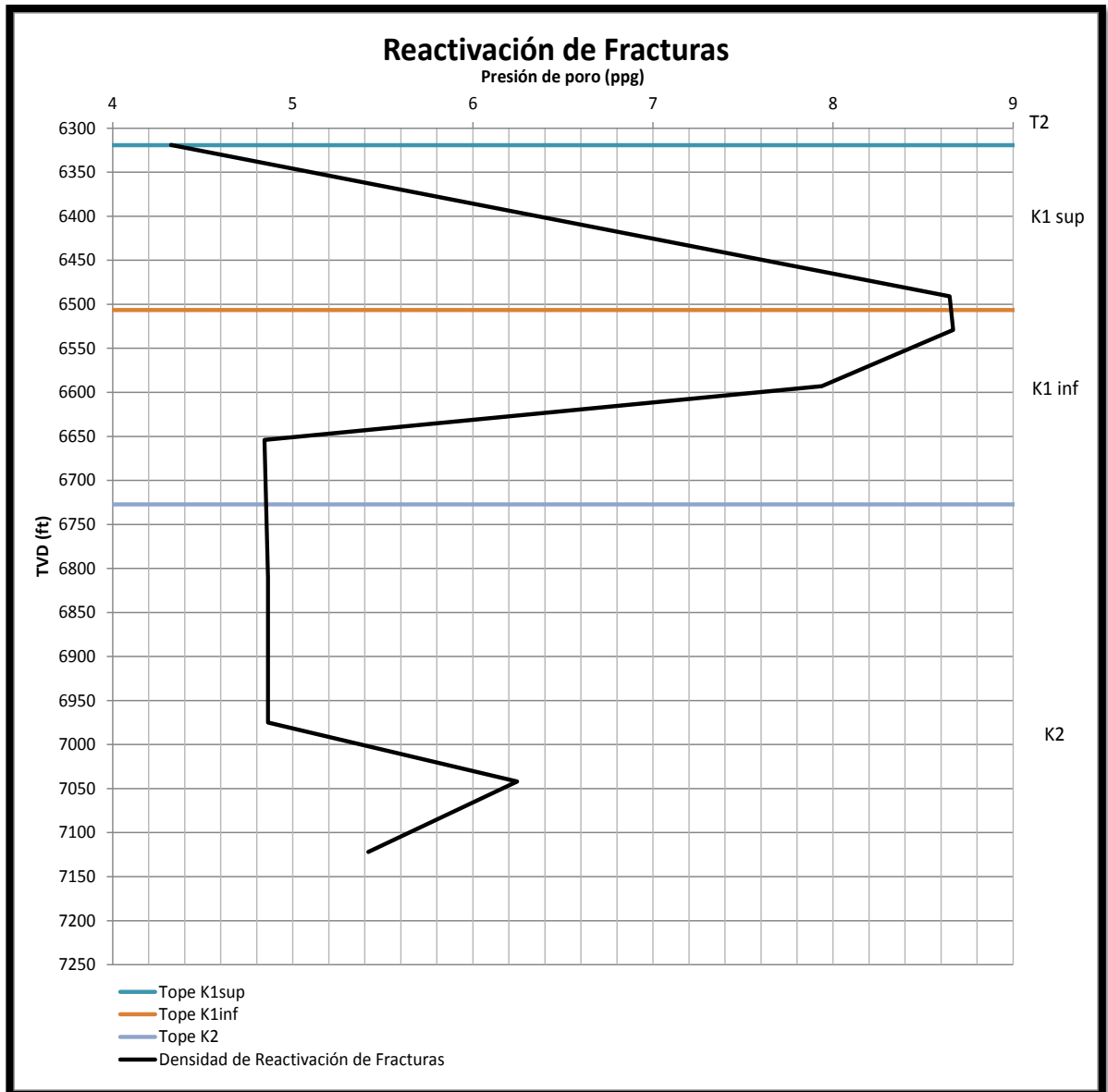
Las condiciones de presión de poro correspondientes a **Gráfica 32** y **Gráfica 33** corresponden a la presión de poro mostrada en la **Tabla 15** es decir que dicha tabla predice la presión del lodo a la cual ocurrirá la reactivación de las fracturas naturales.

Tabla 15. Gradiente de reactivación de fracturas.

Grupo de Fracturas	TVD (ft)	Gradiente de Reactivación (psi/ft)	Densidad de Reactivación (ppg)
1	6319	0,225	4,32
2	6491	0,45	8,64
3	6529	0,451	8,66
4	6593	0,413	7,93
5	6654	0,252	4,84
6	6810	0,253	4,86
7	6975	0,253	4,86
8	7042	0,325	6,24
9	7122	0,282	5,41
10	7159	0,31	5,95

Dicha información fue graficada con el fin de mostrar de una forma más amigable la densidad del fluido de perforación a diferentes profundidades que debería ser utilizado, cómo muestra la **Gráfica 34**, ésta da una representación de como a lo largo de la fase de 8 ½ in, debería ser la densidad del fluido de perforación para que las fracturas presentes en las formaciones no tengan tendencia a deslizarse, es decir, no estén en estado crítico de esfuerzos.

Gráfica 34. Densidad del fluido de perforación para que ocurra reactivación de fracturas naturales.



7. CONCLUSIONES

- La geología de la fase 8 ½ in (Formación K2) es determinante en la presencia de fracturas naturales y por ende en las pérdidas de circulación.
- Formaciones como las arcillas favorecen la manifestación de deformaciones en el hueco (breakouts se presentan en éste tipo de litología).
- En el pozo de estudio se presentó un régimen normal de esfuerzos ($S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$) donde ($S_v=19.2$ ppg, $S_{Hmax}=15$ ppg y $S_{Hmin}=11$ ppg) en densidad equivalente.
- La orientación (azimut) del esfuerzo horizontal máximo es de 135° (S45°E).
- El estado de esfuerzos sobre una fractura en el pozo de estudio depende de los esfuerzos in situ y de la orientación relativa de la fractura respecto al esfuerzo horizontal máximo, cuyo valor es de 15 ppg en densidad equivalente en la formación K2.
- La integración de la envolvente de falla, los círculos de Mohr y el estado de esfuerzos de la fractura en conjunto en esta herramienta, permite la evaluación del criterio de falla de Mohr-Coulomb, para la identificación de fracturas críticamente esforzadas.
- El estado de esfuerzos sobre las fracturas generan pérdidas de circulación asociadas a fracturas críticamente esforzadas, en la Formación K2 (6725 ft TVD y mayores profundidades).
- Independientemente que las fracturas estén aisladas o no, las fracturas en la Formación K2 (6725 ft TVD y mayores profundidades) son hidráulicamente conductivas y se generarán pérdidas de circulación con solo superar la presión de poro.

8. RECOMENDACIONES

- Mejorar la adquisición de datos mediante registros Sonic Scanner, pruebas de núcleos y registros de imagen que identifiquen deformaciones como breakouts y fracturas inducidas.
- Disminuir el rango de incertidumbre del modelo geomecánico a 0,5 ppg, haciendo uso de datos adquiridos y un modelo geomecánico sensible al depletamiento del yacimiento.
- Evaluar las condiciones de fricción interna del plano de fractura utilizando un rango de variación (entre 0,6 y 1) para la envolvente de falla.
- Ajustar el esfuerzo horizontal mínimo (10 ppg como densidad equivalente en K2) haciendo uso de información de hidráulicas, con la presión de operación medida en fondo o mediante pruebas de inyectividad y pruebas de iniciación de fractura (*leak off test*) extendidas.
- Evaluar si las condiciones de aislamiento hidráulico de fracturas están asociadas a su clasificación como abierta o parcialmente abierta.
- Mantener una presión de yacimiento mayor a 5 ppg (presión referida en términos de densidad del fluido) con el fin de evitar pérdidas en producción al disminuir la conductividad hidráulica de las fracturas.
- Perforar “Bajo balance” o con una densidad equivalente operacional menor a 4,8 ppg en caso de ser técnicamente posible, con el fin de no reactivar las fracturas naturales presentes.

BIBLIOGRAFÍA

ABBAS, R, JAROUJ, H., DOLE, S., JUNAIDI, H. (2004). Una red de seguridad para controlar las pérdidas de circulación. Oilfield Review, Schlumberger.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca Llanos Orientales: Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. [Consultado el 30/05/2016]. Disponible en: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-yGeofisica/Tesis/5.%20Informe%20Final%20Llanos.pdf>

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Estadísticas de Producción mensual de petróleo. 2016.

AMOCO. Wellbore Stability, Drilling Handbook. Sección 3. [Consultado el 05/10/2016]. Disponible en Internet: <http://dl.iranrig.com/ebook/Amoco%20-%20Wellbore%20Stability.pdf>

ANGEL ALVAREZ, John Byron. Metodología para identificar en tiempo real las zonas de inestabilidad geomecánica y mitigar los riesgos durante las operaciones de perforación de pozos petroleros. Medellín, 2012.

BADRÁN LIZARAZO, N. de J. PADILLA REYES J. M. Desarrollo de una metodología general para el cálculo de esfuerzos in-situ en formaciones productoras de hidrocarburos. UIS, 2012.

BAGGINI, S., FRATES, C., GARAND, J., MEYER, A. (2014). Sellado de fracturas: Avances en el control de las pérdidas de circulación. Schlumberger.

CHANG, Chandong; ZOBACK, Mark D.; KHAKSAR, Abbas. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2006, vol. 51, no 3.

COOK, J., Growcock, F., Guo, Q., Hodder, M., van Oort, E. (2011/2012). Estabilización para prevenir pérdidas de circulación. Oilfield Review, Schlumberger.

CRAIN. J. Crain's Petrophysical Handbook. Consultado el [29/11/2016] Disponible en: <https://www.spec2000.net/25-edit10.htm>

D. A. CASTILLO & D. MOOS, Reservoir Geomechanics Applied to drilling and completion programs in challenging formation: North West Shelf, Timor Sea, North Sea and Colombia, APPEA Journal 2000.

ECOPETROL S.A. Superintendencia de Operaciones de Castilla – Chichimene, 2007.

ECOPETROL S.A. Presentación Estado de Esfuerzos Tridimensional. Esfuerzo de los materiales.[Consultado el 7/07/2016]. Disponible en:<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8d/Stress_tensor.png/300px-Stress_tensor.png>

FRANQUET, Javier Alejandro, et al. Critically-stressed fracture analysis contributes to determining the optimal drilling trajectory in naturally fractured reservoirs. En *International Petroleum Technology Conference*. International Petroleum Technology Conference.

GUERRERO CAICEDO, Y. C., MORENO LÓPEZ, J. F., & Escobar, A. A. (2011). Estudio de las condiciones geomecánicas que intervienen en la reactivación de fracturas naturales y su consecuencia en pérdidas de circulación. Bogotá, D.C: Fundación Universidad de América.

GREENBERG, M. L.; CASTAGNA, J. P. SHEAR-WAVE VELOCITY ESTIMATION IN POROUS ROCKS: Theoretical Formulation, Preliminary Verification And Applications1. 1992.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN Documentación. Presentación de Tesis, trabajos de grados y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El instituto 2008, p, 1.

_____. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: El instituto, 2008, p.12

_____. Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC4490. Bogotá: EL instituto, 1998, p.2

JAEGER, J. C., COOK, N. G. W. & ZIMMERMAN, R. W. Fundamentals of rock mechanics. Blackwell publishing. 2007.

MONCAYO, Edwar, TCHEGLIAKOVA, Nadejda y MONTES, Luis. Pre-Stack Seismic Inversion Based on A Genetic Algorithm: A Case from the Lanos Basin (Colombia) in the Absense of Well Information. C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro. Bucaramanga. [Consultado el 07/03/2017]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/img/revistas/ctyf/v4n5/v4n5a01f1.jpg>

MORENO SÁNCHEZ, Yustin Daniel; NIETO ZARATE, Duvan Ernesto y ESCARRAGA, Yuri Hans. Evaluación Técnico - Financiera a La Implementación De La Perforación Con Control Dinámico De Presión (MPD) En El Campo Castilla. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2014.

OSORIO Rafael. Perfiles Eléctricos. [Consultado en Noviembre 28 de 2016]. Disponible en: http://www.authorstream.com/Presentation/Rafael_Osorio-255951-

registros-de-porosidad-perfiles-el-ctricos-sonico-densidad-neutron-completo-education-ppt-powerpoint/

PETROWIKI. Métodos para determinar la presión de poro. [Consultado el 05/10/2016]. Disponible en: http://petrowiki.org/Methods_to_determine_pore_pressure

PGE 334, THE UNIVERSITY OF TEXAS, AUSTIN. Reservoir geomechanics course (online).

REINECKER, J.; TINGAY, M.; MÜLLER, B. Borehole breakout analysis from four-arm caliper logs. World stress map project, 2003.

RINCON BARRERA, Lenin Farooq. Determinación de oportunidades de hidrocarburos detrás del revestimiento (oil behind casing) en los campos operados por Perenco en la asociación Casanare, Cuenca De Los Llanos Orientales. Trabajo de grado Geología. Bucaramanga; Universidad Industrial de Santander, 2011.

SPE. Petroleum Engineering handbook Vol 2.

TASK FRONTERA GEOSCIENCE. Critically Stressed Fractures. [Consultado el 08/03/2016]. Disponible en: <http://taskfronterra.com/wp-content/uploads/2014/12/Critically-Stressed-Fractures-Flyer-TFG.pdf>.

TARIQ, Z., ELKATATNY, S., MAHMOUD, M. & ABDULRAHEEM, A. A holistic approach to develop new rigorous empirical correlation for static Young's modulus. SPE, 2016.

TORRES, M. E. & GONZALEZ, A. J. In- Situ Stress State Eastern Cordillera (Colombia). Society of Petroleum Engineers. SPE 81074, 2003.

VELANDIA P. Francisco A. Geología Estructura. UIS. Presentación.

WILSON, A. (2014, February 1). ECD-Management Strategy Solves Lost Circulation Issues. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/0214-0077-JPT.

ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics (online). Campo de esfuerzos tectónicos, Curso de Geomecánica Universidad de Standford.

ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010.

ANEXOS

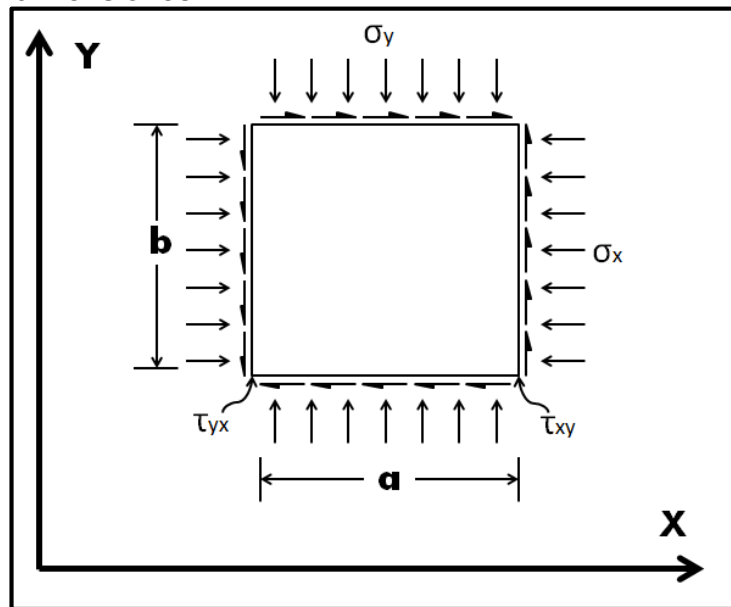
ANEXO A

ECUACIONES Y DEMOSTRACIÓN DEL CÍRCULO DE MOHR.

Estado uniforme de esfuerzos en dos dimensiones.

Consideremos el cuerpo libre que se presenta en la como se puede observar en la **Figura A1**, es un cuerpo representado en dos dimensiones, donde los esfuerzos actúan paralelos al eje z, es decir, perpendiculares al plano z. Por este motivo se asume que $\tau_{xz} = \tau_{zx} = \tau_{yz} = \tau_{zy} = 0$. Para este análisis σ_z no se considera a pesar de que puede ser diferente de cero. El eje y' al igual que el eje y del eje x , está 90° en dirección contraria de las manecillas de reloj de x' .

Figura A1. Estado Uniforme de esfuerzos en dos dimensiones.



Se considera una unidad de longitud en la dirección de z y tomando los momentos en la esquina inferior izquierda, se observa que la condición de equilibrio donde la sumatoria de momentos es igual a cero cómo lo muestra las siguientes ecuaciones:

Ecuación A1. Condiciones de equilibrio: sumatoria de Momentos.

$$\Sigma M = 0 \quad + \curvearrowright$$

Ecuación A2. Expresión matemática para el equilibrio de momentos.

$$(\sigma_x b)(b/2) - (\sigma_x b)(b/2) + (\sigma_y a)(a/2) - (\sigma_y a)(a/2) - (\tau_{xy} b)\alpha + (\tau_{yx} a)b = 0$$

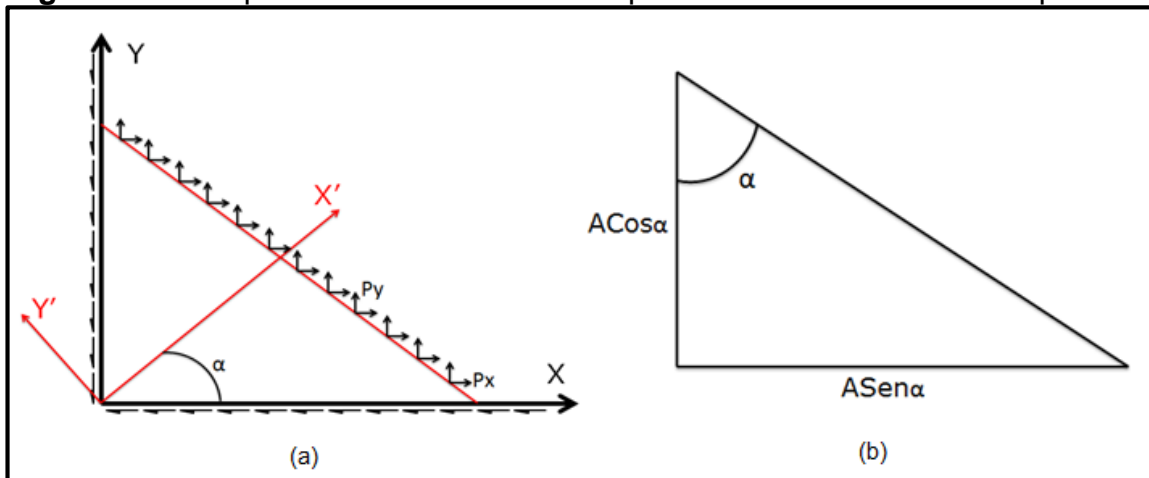
Ecuación A3. Condición de igualdad para la simplificación.

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

Como se puede observar, la componente de corte del plano x actuando en la dirección y, es igual a la componente de corte del plano y actuando en dirección de x. Esta igualdad aplica para cualquier par de planos perpendiculares.

Ahora, se observará cómo cambia la magnitud de los esfuerzos tanto de corte, como los normales si cambiamos de plano, para esto vamos a realizar la sumatoria de fuerzas de la **Figura A2**, donde P_x y P_y son los componentes de esfuerzo que actúan la superficie A en direcciones de x y y respectivamente.

Figura A2. Cuerpo libre mostrando los componentes de esfuerzos en el plano x'.



Ecuación A4. Condiciones de equilibrio: sumatoria de fuerzas en X.

$$\sum F_x = 0$$

Ecuación A5. Expresión matemática para el equilibrio de fuerzas en X.

$$P_x A - \sigma_x A \cos \alpha - \tau_{yx} A \sin \alpha = 0$$

Ecuación A6. Resultante del componente de fuerza en X.

$$P_x = \sigma_x \cos \alpha + \tau_{yx} \sin \alpha$$

Ahora haciendo el mismo análisis para el eje y:

Ecuación A7. Condiciones de equilibrio: sumatoria de fuerzas en Y.

$$\sum F_y = 0$$

Ecuación A8. Expresión matemática para el equilibrio de fuerzas en Y.

$$P_y A - \sigma_y A \sin \alpha - \tau_{yx} A \cos \alpha = 0$$

Ecuación A9. Resultante del componente de fuerza en Y.

$$P_y A - \sigma_y A \sin \alpha - \tau_{yx} A \cos \alpha = 0$$

El esfuerzo normal al plano x' se obtiene proyectando P_x y P_y en dirección de x' .

Ecuación A10. Esfuerzo perpendicular al plano X' .

$$\sigma_{x'} = P_x \cos \alpha + P_y \sin \alpha$$

Ahora, reemplazando las ecuaciones **A6** y **A9** en **A10**:

Ecuación A11. Esfuerzo perpendicular al plano X' en función de las resultantes en X y Y.

$$\sigma_{x'} = (\sigma_x \cos \alpha + \tau_{yx} \sin \alpha) \cos \alpha + (\sigma_y \cos \alpha + \tau_{yx} \sin \alpha) \sin \alpha$$

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + 2\tau_{yx} \sin \alpha \cos \alpha$$

De la misma forma, el esfuerzo de corte se proyecta a lo largo del eje Y' :

Ecuación A12. Proyección del esfuerzo de corte en la cara del plano X' y en dirección de Y'

$$\tau_{x'y'} = P_y \cos \alpha - P_x \sin \alpha$$

$$\tau_{x'y'} = (\sigma_y \cos \alpha + \tau_{yx} \sin \alpha) \cos \alpha - (\sigma_x \cos \alpha + \tau_{yx} \sin \alpha) \sin \alpha$$

$$\tau_{x'y'} = \sigma_y \sin \alpha \cos \alpha + \tau_{yx} \cos^2 \alpha - \sigma_x \sin \alpha - \tau_{yx} \sin^2 \alpha$$

$$\tau_{x'y'} = (\sigma_y - \sigma_x) \sin \alpha \cos \alpha + \tau_{yx} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha)$$

Ahora se puede hallar σ_y haciendo el mismo análisis o simplemente sustituyendo α por $(\alpha + \pi/2)$ en la ecuación **A11**.

Ecuación A13. Esfuerzo perpendicular al plano Y' en función de ángulos complementarios a las resultantes en X y Y.

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \cos^2\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) + \sigma_y \sin^2\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) + \tau_{yx} \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)$$

Teniendo en cuenta las identidades trigonométricas para ángulos complementarios:

Ecuación A14. Identidades trigonométricas para ángulos complementarios.

$$\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = \cos \alpha$$

$$\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = -\sin \alpha$$

Se obtiene:

Ecuación A15. Esfuerzo perpendicular al plano Y' en función de las resultantes en X y Y.

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - 2\tau_{yx} \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

Como se puede ver, las ecuaciones **A11**, **A12** y **A15** involucran las variables σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_x' , σ_y' y $\tau_{x'y'}$, por lo tanto ellas definen el caso de los esfuerzos en dos dimensiones y su transformación. De la suma de las ecuaciones **A11** y **A15** se puede obtener:

Ecuación A16. Suma de los esfuerzos normales a X' y Y'.

$$\sigma_{x'} + \sigma_{y'} = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + 2\tau_{yx} \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - 2\tau_{yx} \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

Ecuación A17. Resultante de la suma de esfuerzos normales a X' y Y'.

$$\sigma_{x'} + \sigma_{y'} = \sigma_x + \sigma_y = Cte$$

Como se puede notar, la suma de los esfuerzos normales a dos planos perpendiculares es invariante, es decir, no depende de la dirección que tenga el sistema de ejes.

Círculo de Mohr

Como ya se dijo, las ecuaciones **A11**, **A12** y **A15** definen el caso donde se involucran dos dimensiones, estas pueden ser representadas gráficamente. La mejor forma es conocida como el **Círculo de Mohr**, para esto es necesario trabajar dichas ecuaciones en términos de 2α . Ahora debemos tener en cuenta las identidades expresadas a continuación:

Ecuación A18. Identidad para ángulo doble.

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

Ecuación A19. Identidad trigonométrica para función cuadrada.

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha)$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha)$$

Remplazando las ecuaciones **A18** y **A19** en **A11** y **A15** se encuentra:

Ecuación A20. Esfuerzo normal al plano X' en función de ángulos dobles.

$$\sigma_{x'} = \sigma_x \left(\frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha) \right) + \sigma_y \left(\frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) \right) + \tau_{yx} \sin 2\alpha$$

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\alpha + \frac{\sigma_y}{2} - \frac{\sigma_y}{2} \cos 2\alpha + \tau_{yx} \sin 2\alpha$$

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha + \tau_{yx} \sin 2\alpha$$

Ecuación A21. Esfuerzo normal al plano Y' en función de ángulos dobles.

$$\sigma_{y'} = \sigma_x \left(\frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) \right) + \sigma_y \left(\frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha) \right) - \tau_{yx} \sin 2\alpha$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\alpha + \frac{\sigma_y}{2} + \frac{\sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{yx} \sin 2\alpha$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\alpha + \tau_{yx} \sin 2\alpha$$

Ecuación A22. Esfuerzo de corte en la cara del plano X' en dirección de Y', en función de ángulos dobles.

$$\tau_{x'y'} = (\sigma_y - \sigma_x) \frac{\sin 2\alpha}{2} + \tau_{yx} \left(\frac{1}{2}(1 + \cos 2\alpha) - \frac{1}{2}(1 - \cos 2\alpha) \right)$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha + \tau_{yx} \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos 2\alpha}{2} - \frac{1}{2} + \frac{\cos 2\alpha}{2} \right)$$

$$\tau_{x'y'} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha + \tau_{yx} \cos 2\alpha$$

Estas ecuaciones se pueden reescribir de la siguiente forma:

Ecuación A23. Despeje de esfuerzos normales a X' y Y', y esfuerzo de corte en el plano X', en dirección a Y' en función de términos semejantes.

$\sigma_{x'} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha + \tau_{yx} \sin 2\alpha$
$\sigma_{y'} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \cos 2\alpha + \tau_{yx} \sin 2\alpha$
$\tau_{x'y'} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha + \tau_{yx} \cos 2\alpha$

Elevando estos términos al cuadrado y sumando uno de los que involucra el esfuerzo normal con la que involucra el esfuerzo de corte, se obtiene:

Ecuación A24. Sumatoria de todos los esfuerzos presentes en un nuevo plano de dos dimensiones.

$\left(\sigma_{x'} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{x'y'}^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 \cos^2 2\alpha + \tau_{yx}^2 \sin^2 2\alpha + \left(\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}\right)^2 \sin^2 2\alpha + \tau_{yx}^2 \cos^2 2\alpha$
--

Ecuación A25. Esfuerzos en un nuevo plano en forma de ecuación de circunferencia.

$\left(\sigma_{x'} - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{x'y'}^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2$

Esta es la ecuación de una circunferencia, donde vamos a tomar $\sigma_{x'} = \sigma$ y $\tau_{x'y'} = \tau$ debido a que como se ve en la Figura A3, son la representación de los ejes donde se quieren hallar los esfuerzos en un nuevo plano, independiente de cual sea el ángulo α que tomemos. Entonces finalmente llegamos a la ecuación del Círculo de Mohr:

Ecuación A26. Ecuación del Círculo de Mohr.

$\left(\sigma - \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2$

Donde el centro y el radio del círculo se definen mediante las siguientes ecuaciones:

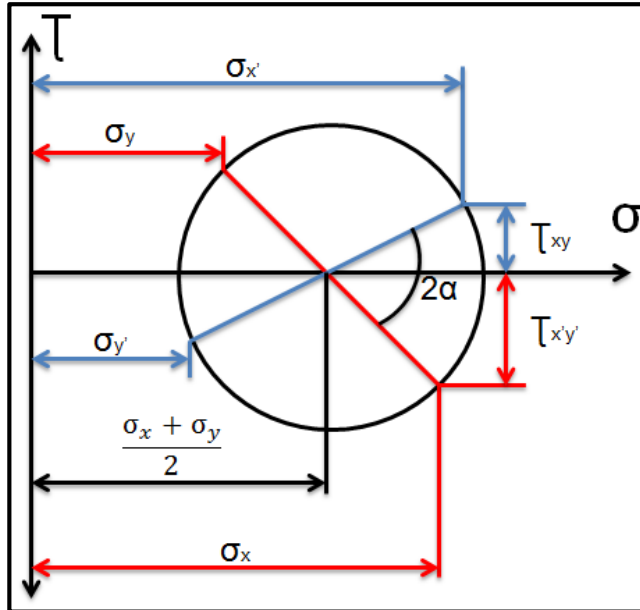
Ecuación A27. Determinación de las coordenadas del centro del círculo de Mohr.

$\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, 0\right)$

Ecuación A28. Determinación del radio del círculo de Mohr.

$$\text{Radio} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{yx}^2}$$

Figura A3. Círculo de Mohr.



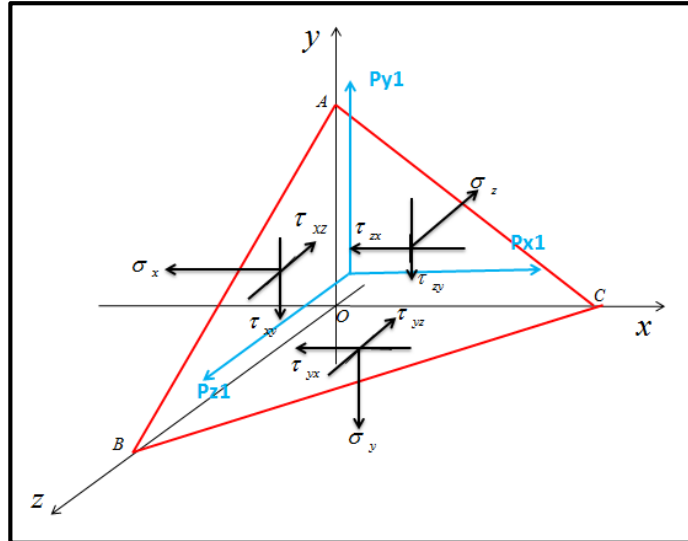
El círculo de Mohr es una representación del estado general de esfuerzos sobre un cuerpo y permite observar el estado de esfuerzos de forma gráfica sobre diferentes sistemas de referencia en un cuerpo, o en otras palabras, permite observar los diferentes estados de esfuerzo sobre un cuerpo determinado en diferentes planos; lo cual convierte al círculo de Mohr en un estado general de esfuerzos.

Antes de la época del desarrollo tecnológico y de los computadores resultaba bastante difícil realizar los cálculos de esfuerzos sobre distintos cuerpos, y debido a lo anterior Otto Mohr diseñó una herramienta gráfica la cual en la actualidad sigue siendo de gran ayuda para la observación y predicción de los estados de esfuerzo en diferentes cuerpos, dentro de ellos, la roca.

Análisis en tres dimensiones.

Como ya se mencionó, los esfuerzos y sus componentes hacen referencia a un escalar asociado a una superficie y no a un vector, para hacer el equilibrio de fuerzas se toma un plano arbitrario en el cual se puede hacer un análisis adecuado llevando los esfuerzos a actuar sobre el nuevo plano en las direcciones de los ejes de referencia (X, Y, Z), los cuales son denotados como P_x , P_y y P_z en la siguiente figura:

Figura A4. Esfuerzos Actuando en un Plano ABC en la Dirección del Sistema XYZ.



Como el cuerpo está en equilibrio, la sumatoria de fuerzas en cualquier dirección es cero. Por lo tanto: $\Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$.

Ecuación A29. Sumatoria de fuerzas en dirección del eje X.

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 \\ P_x A_{ABC} - \sigma_x A_{ABO} - \tau_{yx} A_{BCO} - \tau_{zx} A_{ACO} &= 0 \\ P_x A_{ABC} &= \sigma_x A_{ABO} + \tau_{yx} A_{BCO} + \tau_{zx} A_{ACO} \\ P_x &= \sigma_x \frac{A_{ABO}}{A_{ABC}} + \tau_{yx} \frac{A_{BCO}}{A_{ABC}} + \tau_{zx} \frac{A_{ACO}}{A_{ABC}} \end{aligned}$$

Ecuación A30. Sumatoria de fuerzas en dirección del eje Y.

$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= 0 \\ P_y A_{ABC} - \sigma_y A_{BCO} - \tau_{xy} A_{ABO} - \tau_{zy} A_{ACO} &= 0 \\ P_y A_{ABC} &= \sigma_y A_{BCO} + \tau_{xy} A_{ABO} + \tau_{zy} A_{ACO} \\ P_y &= \sigma_y \frac{A_{BCO}}{A_{ABC}} + \tau_{xy} \frac{A_{ABO}}{A_{ABC}} + \tau_{zy} \frac{A_{ACO}}{A_{ABC}} \end{aligned}$$

Ecuación A31. Sumatoria de fuerzas en dirección del eje Z.

$$\sum F_z = 0$$

$$P_z A_{ABC} - \sigma_z A_{ACO} - \tau_{xz} A_{ABO} - \tau_{yz} A_{BCO} = 0$$

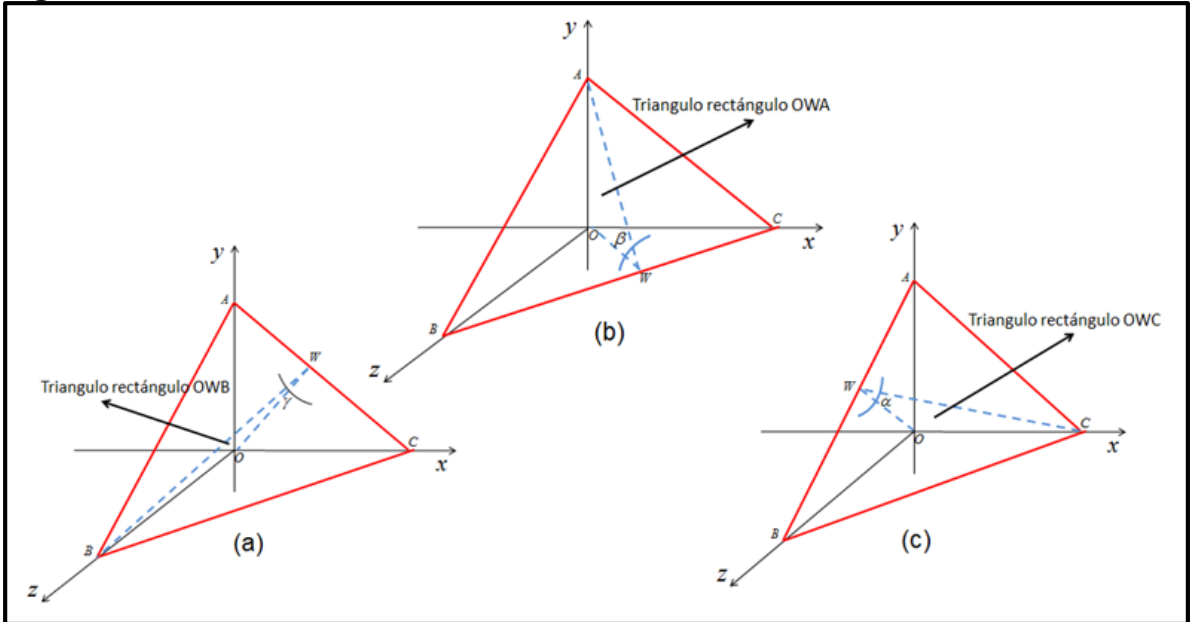
$$P_z A_{ABC} = \sigma_z A_{ACO} + \tau_{xz} A_{ABO} + \tau_{yz} A_{BCO}$$

$$P_z = \sigma_z \frac{A_{ACO}}{A_{ABC}} + \tau_{xz} \frac{A_{ABO}}{A_{ABC}} + \tau_{yz} \frac{A_{BCO}}{A_{ABC}}$$

Relación de áreas.

Como se puede observar, para la sumatoria de fuerzas en las tres direcciones se presentan las mismas incógnitas que son la relación entre el área de los planos sobre los que cada esfuerzo actuaba inicialmente con el área del plano arbitrario en el cual se quiere determinar el vector resultante. Para despejar dichas incógnitas podemos usar las identidades trigonométricas, pues a partir de la **Figura A5** a, b y c; es posible ver que los tres planos de referencia forman triángulos rectángulos con el plano arbitrario.

Figura A5. Relaciones de Áreas.



Por lo tanto pueden ser relacionados por la función Coseno como se puede ver a continuación:

Ecuación A32. Relación de áreas entre el plano perpendicular a X y el nuevo plano arbitrario.

$$\frac{A_{ABO}}{A_{ABC}} = \frac{\frac{AB * OW}{2}}{\frac{AB * CW}{2}} = \frac{OW}{CW} = \text{Cos}(\alpha)$$

Ecuación A33. Relación de áreas entre el plano perpendicular a Y y el nuevo plano arbitrario.

$$\frac{A_{BCO}}{A_{ABC}} = \frac{\frac{BC * OW}{2}}{\frac{BC * AW}{2}} = \frac{OW}{AW} = \text{Cos}(\beta)$$

Ecuación A34. Relación de áreas entre el plano perpendicular a Z y el nuevo plano arbitrario.

$$\frac{A_{ACO}}{A_{ABC}} = \frac{\frac{AC * OW}{2}}{\frac{AC * BW}{2}} = \frac{OW}{BW} = \text{Cos}(\gamma)$$

A partir de lo anterior, se puede determinar que si se conoce la orientación del plano arbitrario y se determinan los ángulos que está formando con los planos de referencia, es posible determinar cómo actúan los esfuerzos sobre dicho plano en la orientación de los ejes de referencia y a partir de esto, se puede calcular el vector de tracción de la Ecuación A35.

Ecuación A35. Vector de Tracción Sobre el Plano.

$$P^2 = P_x^2 + P_y^2 + P_z^2$$

Ahora, tomando $\text{Cos } \alpha = a_{11}$, $\text{Cos } \beta = a_{21}$ y $\text{Cos } \gamma = a_{31}$ y sabiendo que la superficie sobre la cual queremos determinar los esfuerzos es ortogonal al eje x' , según la **Ecuación:**

Ecuación A36. Esfuerzo Ortogonal al eje X' .

$$\sigma_{x'} = P_x.a_{11} + P_y.a_{21} + P_z.a_{31}$$

Donde resultan las Ecuaciones:

Ecuación A37.

$$Px = \sigma_x a_{11} + \tau_{yx} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}$$

Ecuación A38.

$$Py = \sigma_y a_{21} + \tau_{xy} a_{11} + \tau_{zy} a_{31}$$

Ecuación A39.

$$Pz = \sigma_z a_{31} + \tau_{xz} a_{11} + \tau_{yz} a_{21}$$

De acuerdo al equilibrio de momentos se sabe que $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$. Entonces:

Ecuación A40.

$$\sigma_{x'} = (\sigma_x a_{11} + \tau_{xy} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}) a_{11} + (\sigma_y a_{21} + \tau_{xy} a_{11} + \tau_{yz} a_{31}) a_{21} + (\sigma_z a_{31} + \tau_{xz} a_{11} + \tau_{yz} a_{21}) a_{31}$$

Ecuación A41.

$$\sigma_{x'} = \sigma_x a_{11}^2 + \sigma_y a_{21}^2 + \sigma_z a_{31}^2 + 2\tau_{xy} a_{11} a_{21} + 2\tau_{yz} a_{21} a_{31} + 2\tau_{xz} a_{11} a_{31}$$

Como ya se halló el vector de tracción P y ahora con esta ecuación se puede identificar el valor de σ , ahora podemos determinar el valor del esfuerzo de corte en el plano de interés.

Ecuación A42.

$$\tau^2 = P^2 - \sigma^2$$

Estado de esfuerzos en un punto.

En un estado tridimensional de esfuerzos en un punto, siempre existen tres planos principales mutuamente perpendiculares donde los esfuerzos de corte desaparecen y los esfuerzos normales asumen valores estacionarios, este es el caso de la superficie de las rocas como se referenció previamente. En general para determinar estos planos principales, derivamos la ecuación (2.2) respecto a cada coseno director e igualamos a cero.

Ecuación A43.

$$\frac{a_{21}}{a_{31}} = \frac{da_{31}}{da_{21}} \text{ y } \frac{d\sigma_{x'}}{da_{11}} = 2\sigma_x a_{11} + 2\tau_{xy} a_{21} + 2\tau_{zx} a_{31} = 0$$

Ecuación A44.

$$\frac{d\sigma_{x'}}{da_{21}} = 2\sigma_y a_{21} + 2\tau_{xy} a_{11} + 2\tau_{yz} a_{31} = 0$$

Ecuación A45.

$$\frac{d\sigma_{x'}}{da_{31}} = \sigma_z a_{31} + \tau_{yz} a_{21} + \tau_{zx} a_{31} = 0$$

Relacionando las derivadas entre sí:

Ecuación A46.

$$\frac{d\sigma_{x'} / da_{11}}{d\sigma_{x'} / da_{21}} = \frac{da_{21}}{da_{11}} = \frac{\sigma_x a_{11} + \tau_{xy} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}}{\sigma_y a_{21} + \tau_{xy} a_{11} + \tau_{yz} a_{31}} = 0$$

Ecuación A47.

$$\frac{d\sigma_{x'} / da_{11}}{d\sigma_{x'} / da_{31}} = \frac{da_{31}}{da_{11}} = \frac{\sigma_x a_{11} + \tau_{xy} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}}{\sigma_z a_{31} + \tau_{yz} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}} = 0$$

Ecuación A48.

$$\frac{d\sigma_{x'} / da_{21}}{d\sigma_{x'} / da_{31}} = \frac{da_{31}}{da_{21}} = \frac{\sigma_y a_{21} + \tau_{xy} a_{11} + \tau_{yz} a_{31}}{\sigma_z a_{31} + \tau_{yz} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}} = 0$$

Se sabe que a_{11} , a_{21} y a_{31} no son independientes pues se cumple:

Ecuación A49.

$$a_{11}^2 + a_{21}^2 + a_{31}^2 = 1$$

Derivando esta expresión respecto a cada coseno director e igualándolas entre sí obtenemos:

Ecuación A51.

$$\frac{a_{11}}{a_{21}} = \frac{da_{21}}{da_{11}}$$

Ecuación A52.

$$2a_{11}.da_{11} = 2a_{31}.da_{31}$$

Ecuación A53.

$$2a_{21}.da_{21} = 2a_{31}.da_{31}$$

Ecuación A54.

$$\begin{aligned}2a_{11}.da_{11} &= 0 \\2a_{21}.da_{21} &= 0 \\2a_{31}.da_{31} &= 0\end{aligned}$$

Ahora reemplazamos (2.5) en (2.4):

Ecuación A55.

$$\frac{da_{21}}{da_{11}} = \frac{\sigma_x a_{11} + \tau_{xy} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}}{\sigma_y a_{21} + \tau_{xy} a_{11} + \tau_{yz} a_{31}} = \frac{a_{11}}{a_{21}}$$

Ecuación A56.

$$\frac{\sigma_x a_{11} + \tau_{xy} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}}{a_{11}} = \frac{\sigma_y a_{21} + \tau_{xy} a_{11} + \tau_{yz} a_{31}}{a_{21}}$$

Ecuación A57.

$$\frac{da_{31}}{da_{11}} = \frac{\sigma_x a_{11} + \tau_{xy} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}}{\sigma_z a_{31} + \tau_{yz} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}} = \frac{a_{11}}{a_{31}}$$

Ecuación A58.

$$\frac{\sigma_x a_{11} + \tau_{xy} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}}{a_{11}} = \frac{\sigma_z a_{31} + \tau_{yz} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}}{a_{31}}$$

Ecuación A59.

$$\frac{da_{31}}{da_{21}} = \frac{\sigma_y a_{21} + \tau_{xy} a_{11} + \tau_{yz} a_{31}}{\sigma_z a_{31} + \tau_{yz} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}} = \frac{a_{21}}{a_{31}}$$

Ecuación A60.

$$\frac{\sigma_y a_{21} + \tau_{xy} a_{11} + \tau_{yz} a_{31}}{a_{21}} = \frac{\sigma_z a_{31} + \tau_{yz} a_{21} + \tau_{zx} a_{31}}{a_{31}}$$

Tomando en cuenta la **Ecuación A60**. se tiene:

Ecuación A61.

$$\frac{Px}{a_{11}} = \frac{Py}{a_{21}}$$

Ecuación A62.

$$\frac{Px}{a_{11}} = \frac{Pz}{a_{31}}$$

Ecuación A63.

$$\frac{Py}{a_{21}} = \frac{Pz}{a_{31}}$$

Finalmente se puede notar que:

Ecuación A64.

$$\frac{Px}{a_{11}} = \frac{Py}{a_{21}} = \frac{Pz}{a_{31}} = \sigma_p$$

σ_p representa los valores estacionarios del esfuerzo normal σ_x . Esto muestra que cuando el esfuerzo normal asume un valor estacionario, el esfuerzo de corte desaparece debido a que el vector de esfuerzos es normal al plano.

Entonces se tiene la **Ecuación A65** que muestra lo anteriormente mencionado.

Ecuación A65.

$$(\sigma_x - \sigma_p) a_{11} + \tau_{yx} a_{21} + \tau_{zx} a_{31} = 0$$

Ecuación A66.

$$\tau_{xy} a_{11} + (\sigma_y - \sigma_p) a_{21} + \tau_{zy} a_{31} = 0$$

Ecuación A67.

$$\tau_{xz} a_{11} + \tau_{yz} a_{21} + (\sigma_z - \sigma_p) a_{31} = 0$$

Estas son ecuaciones lineales homogéneas en α_{11} , α_{21} y α_{31} . Como los cosenos directores deben ser diferentes a cero, debemos encontrar una solución no trivial, está se halla con la determinante de los coeficientes igualada a cero, de la siguiente forma:

Ecuación A68.

$$\det \begin{vmatrix} \sigma_x - \sigma_p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \sigma_p & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \sigma_p \end{vmatrix} = 0$$

Ecuación A69.

$$\sigma_p^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma_p^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2)\sigma_p - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0$$

Esta ecuación tiene tres raíces y cada una de estas raíces representa la magnitud de un tensor donde los esfuerzos de corte correspondientes desaparecen. Estos valores estacionarios se llaman esfuerzos principales y se representan como σ_1 , σ_2 y σ_3 , donde:

Ecuación A60.

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

Debido a que σ_p define valores sin importar la orientación de los ejes, cada coeficiente es invariante:

Ecuación A61.

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

Ecuación A62.

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2$$

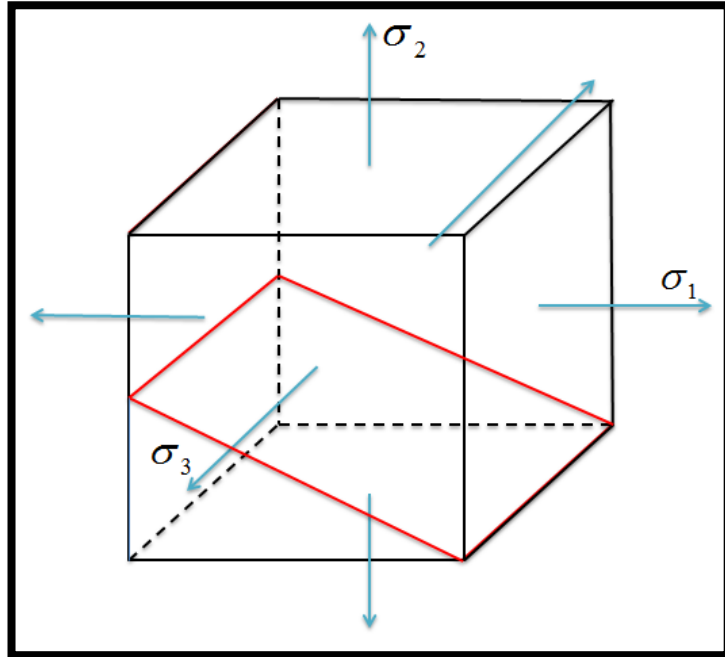
Ecuación A63.

$$I_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2$$

Círculo de Mohr para un objeto en tres dimensiones.

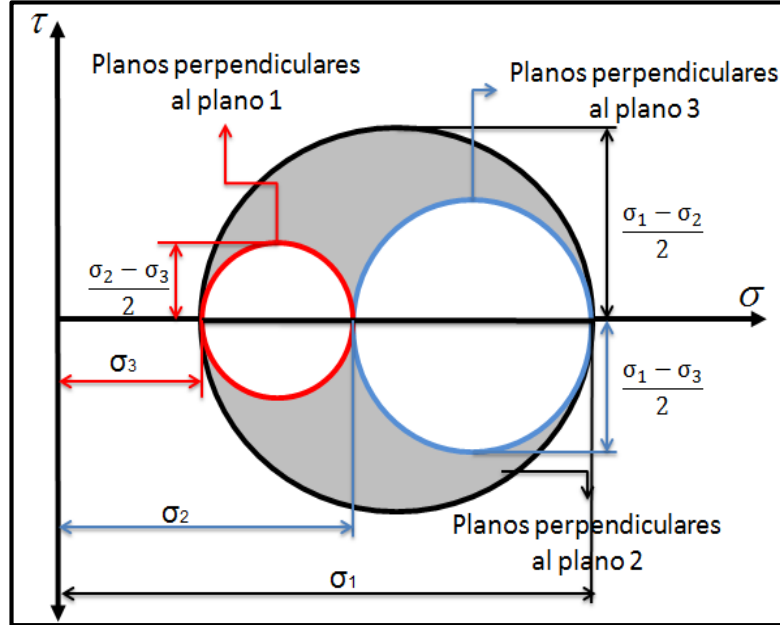
Tomemos la **Figura A6** la cual está orientada a lo largo de las direcciones principales. Podemos notar claramente que un esfuerzo σ no tiene efecto sobre ningún plano perpendicular al plano sobre el que él mismo actúa.

Figura A6. Esfuerzos principales en tres dimensiones.




El sólido que está dentro de la **Figura A6.**, sólo se ve afectado por σ_1 y σ_2 , por lo tanto, los esfuerzos normales y de corte solo están en términos de σ_1 y σ_2 tal como en un caso de dos dimensiones. De esta forma podemos ver que σ y τ se relacionan mediante un círculo de Mohr, al igual que para planos normales a los planos sobre los que actúan σ_1 y σ_2 según la **Figura A7.**

Figura A7. Círculo de Mohr para tres dimensiones.



En la actualidad el círculo de Mohr sigue siendo una herramienta muy útil, ya que permite tener una representación gráfica del estado de esfuerzos cambiando el sistema de referencia, la cual permite evaluar los estados de forma intuitiva cómo conocer las direcciones principales.

Fuentes del anexo: Presentación Estado de Esfuerzos Tridimensional. Ecopetrol S.A. Modificada por los autores.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016


AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Nosotros **Diego Alejandro Bonilla Gómez** y **Fabián Eduardo Pérez Corredor** en calidad de titulares de la obra **Evaluación de la Relación de Fracturas en Estado Crítico de Esfuerzos con las Pérdidas de Circulación en un Pozo de Ecopetrol S.A.**, elaborada en el año 2016, autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

Conforme a las condiciones anteriormente expuestas, como autor(es) establezco (establecemos) las siguientes condiciones de uso de mi (nuestra) obra de acuerdo con la **licencia Creative Commons** que se señala a continuación:

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016



Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.



Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.



Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

Dé igual forma como autor (es) autorizo (amos) la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)

La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación

SI	NO
x	
x	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.

SI	NO
	x

Para constancia se firma el presente documento en (la ciudad), a los 9 días del mes de Marzo del año 2017.

EL(LOS) AUTOR(ES):

Autor 1

Nombres
Diego Alejandro
Documento de identificación No
1136886906

Apellidos
Bonilla Gómez
Firma

Diego A Bonilla G

Autor 2

Nombres
Fabian Eduardo
Documento de identificación No
1032467213

Apellidos
Pérez Corredor
Firma

Fabian Pérez