

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN  
YACIMIENTOS DEPLETADOS**

**JUAN SEBASTIAN MEDINA ZAMBRANO**

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

**2018**

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN  
YACIMIENTOS DEPLETADOS**

**JUAN SEBASTIAN MEDINA ZAMBRANO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:**

**INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**DIRECTOR:**

**ZULLY HIMELDA CALDERÓN CARRILLO, Ph.D.**

**INGENIERA DE PETRÓLEOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

*En primer lugar a Dios todo poderoso quien permitió la finalización de este trabajo,  
brindándome la salud y la sabiduría suficiente.*

*A mi mama Diana y a mi tía Marcela quienes siempre han confiado en mí y me  
brindan su amor incondicional. Por sus muchas y desinteresadas ayudas que me  
han entregado durante toda mi vida.*

*A mis hermanos Camilo y Diego que su existencia en mi vida, me da la fortaleza  
para alcanzar mis metas*

*A mí apreciado compañero de tesis José Florentino Castro Cárdenas quien partió  
al encuentro con el Señor, y que sin su aporte no habría sido posible la realización  
de este trabajo.*

*A mi compañera sentimental Tatiana quien me acompañó durante la elaboración  
de este proyecto y que su colaboración fue invaluable.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios todo poderoso quien nos da la vida y nos permite alcanzar nuestras metas.*

*A la Universidad Industrial de Santander, en Especial a la Escuela de Ingeniería de Petróleos por mi formación como profesional.*

*A la doctora Zully Himelda Calderón Carrillo, quien con su paciencia, sabiduría y compromiso me dio las bases suficientes y me guio por el camino correcto para la culminación de este trabajo.*

*Al doctor Giovanni Jiménez Díaz por sus incansables ganas de colaborar y su disposición gentil en cada momento de requerir su ayuda.*

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CONCEPTOS BÁSICOS DE LA REACTIVACIÓN DE FALLAS.....</b>	<b>18</b>
1.1 INICIO DE LOS ESTUDIOS DEL FENÓMENO DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN CAMPOS DE HIDROCARBUROS .....	18
1.2 FALLAS GEOLÓGICAS.....	22
1.2.1 Régimen de Esfuerzos y Tipos de Fallas. ....	23
1.2.2 Esfuerzos y Resistencia Friccional en el Plano de Falla. ....	28
1.2.3 Fallas Sellantes y Fallas Conductivas .....	32
1.3 ESFUERZOS EFECTIVOS Y POROELASTICIDAD .....	33
1.4 CÍRCULO DE MOHR EN 3D Y CRITERIO DE FALLA DE COULOMB ....	35
1.5 FALLAS CRÍTICAMENTE FORZADAS .....	37
1.6 REACTIVACIÓN DE FALLAS EN YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS.....	38
1.6.1 Mecanismos de Reactivación de Fallas .....	39
1.6.2 Problemas Asociados a la Reactivación de Fallas .....	43
<b>2 PARÁMETROS Y MODELOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS .....</b>	<b>49</b>
2.1 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS ....	49

2.1.1	Función de Falla de Coulomb ( $CFF$ ) .....	49
2.1.2	Tendencia al Deslizamiento ( $T_s$ ) .....	50
2.1.3	Tendencia a la Dilatación ( $T_D$ ).....	50
2.1.4	Presión de Poro Crítica ( $Pp_{crit}$ ) .....	51
2.2	MODELOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS.....	51
2.2.1	Modelo de Jaeger and Cook .....	52
2.2.2	Modelo de Leclere.....	55
2.3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS .....	62
2.3.1	Variables de Entrada.....	62
2.3.2	Procesamiento de la Información .....	64
2.3.3	Comparación de resultados .....	66

### **3 SELECCIÓN Y ACOPLAMIENTO DEL MODELO PARA EL ANÁLISIS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN YACIMIENTOS DEPLETADOS ..... 70**

3.1	SELECCIÓN DEL MODELO.....	70
3.2	ACOPLAMIENTO DEL MODELO A UN YACIMIENTO DEPLETADO.....	70
3.2.1	Cambio de los Esfuerzos Poroelásticos Dentro del Yacimiento .....	71
3.2.2	Rotación de los Esfuerzos Horizontales con la Depleción .....	72
3.2.3	Reactivación de Fallas en la Vecindad de un Yacimiento Depletado.....	73
3.3	DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN YACIMIENTOS DEPLETADOS .....	73
3.4	VALIDACIÓN DEL MODELO ACOPLADO.....	75
3.5	ÁNÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	80
3.5.1	Sensibilidad de las Propiedades Friccionales de la Falla.....	80
3.5.2	Sensibilidad del Cambio de la Presión de Poro .....	82

3.5.3	Sensibilidad del Azimut del Esfuerzo Horizontal Máximo .....	85
3.6	CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	87
<b>4</b>	<b>EJERCICIO DE APLICACIÓN .....</b>	<b>88</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS, ESTRUCTURALES Y GEOLÓGICAS DEL CAMPO.....	88
4.2	EVENTOS DE LA ZONA .....	90
4.3	MODELO GEOMECÁNICO .....	91
4.4	CARACTERIZACIÓN DE LAS FALLAS.....	92
4.5	ESCENARIOS PROPUESTOS .....	93
4.6	DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO.....	93
4.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	94
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>101</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>102</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Elementos de una falla.....	23
<b>Figura 2.</b> Estado de esfuerzos en 3D de un cubo infinitesimal.....	25
<b>Figura 3.</b> Tipos de Fallas.....	27
<b>Figura 4.</b> Esfuerzos en el Plano de Falla.....	29
<b>Figura 5.</b> Rugosidades a gran y pequeña escala de una superficie de falla .....	31
<b>Figura 6.</b> Falla sello por yuxtaposición.....	33
<b>Figura 7.</b> Representación gráfica del esfuerzo efectivo .....	35
<b>Figura 8.</b> Círculo de Mohr y envolvente de falla.....	37
<b>Figura 9.</b> Reactivación de fallas por aumento de la presión de poro.....	40
<b>Figura 10.</b> Reactivación de fallas por el cambio en los esfuerzos in-situ.....	41
<b>Figura 11.</b> Reactivación de fallas por compactación.....	42
<b>Figura 12.</b> Cizalladura del Casing en el flanco de un yacimiento.....	44
<b>Figura 13.</b> Fuga de fluidos por reactivación de fallas.....	46
<b>Figura 14.</b> Sismicidad inducida por reactivación de fallas.....	47
<b>Figura 15.</b> Cosenos directores del vector unitario normal al plano de falla .....	52
<b>Figura 16.</b> Tetraedro de Cauchy .....	54
<b>Figura 17.</b> Orientaciones de las fallas según su relación de esfuerzos efectivos.....	61
<b>Figura 18.</b> Datos de las variables de entrada de los modelos .....	66
<b>Figura 19.</b> Resultados obtenidos por los dos modelos en cada situación .....	67
<b>Figura 20.</b> Diagrama de flujo para el análisis de reactivación de una falla.....	74
<b>Figura 21.</b> Diagramas polares en cada régimen de esfuerzos.....	76
<b>Figura 22.</b> Comparación de resultados de la presión de poro crítica .....	78
<b>Figura 23.</b> Diagrama de flujo de la metodología de la validación del modelo .....	79
<b>Figura 24.</b> Sensibilidad del coeficiente de fricción .....	81
<b>Figura 25.</b> Sensibilidad del cambio en la presión de poro en la producción.....	83
<b>Figura 26.</b> Sensibilidad del cambio de la presión de poro por la inyección .....	84
<b>Figura 27.</b> Sensibilidad del azimut del esfuerzo horizontal máximo .....	86
<b>Figura 28.</b> Ubicación del campo de hidrocarburos .....	89
<b>Figura 29.</b> Sección transversal del campo de hidrocarburos .....	89
<b>Figura 30.</b> Correlación de la microsismicidad con el cambio en la presión de poro.....	90
<b>Figura 31.</b> Datos de entrada al modelo del ejercicio de aplicación.....	94
<b>Figura 32.</b> Resultados de las condiciones iniciales .....	95
<b>Figura 33.</b> Resultados de la producción en la falla sintética interior .....	97
<b>Figura 34.</b> Resultado de la producción en las fallas límites .....	97
<b>Figura 35.</b> Resultados de la producción en las fallas de la vecindad superior.....	98

**Figura 36.** Resultados del proceso de inyección en el campo..... 100

## LISTA DE TABLAS

Pág.

<b>Tabla 1.</b> Campos de hidrocarburos donde se estudió el fenómeno de reactivación de fallas. ....	20
<b>Tabla 2.</b> Régimen de Esfuerzos .....	28
<b>Tabla 3.</b> Coeficiente de fricción de algunas rocas.....	30
<b>Tabla 4.</b> Cosenos directores del vector unitario normal al plano de falla .....	53
<b>Tabla 5.</b> Tabla comparativa del modelo de Jaeger con el modelo de Leclere.....	65
<b>Tabla 6.</b> Datos de entrada para el ejercicio de análisis de validación. ....	77
<b>Tabla 7.</b> Modelo geomecánico.....	91
<b>Tabla 8.</b> Propiedades de las principales fallas del yacimiento. ....	92
<b>Tabla 9.</b> Valores de la presión para cada escenario propuesto.....	93

## **LISTA DE ANEXOS**

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

**Anexo A.** Modelos de reactivación de fallas en Excel.

**Anexo B.** Modelo de Jaeger acoplado en Excel.

**Anexo C.** Análisis de sensibilidad en Excel.

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN YACIMIENTOS DEPLETADOS\*

**AUTOR:** JUAN SEBASTIAN MEDINA ZAMBRANO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** REACTIVACIÓN DE FALLAS, CAMBIO DE ESFUERZOS, YACIMIENTOS DEPLETADOS, PRESIÓN DE PORO, CRITERIOS DE REACTIVACIÓN, FALLAS CRÍTICAMENTE FORZADAS.

### **DESCRIPCIÓN:**

Las fallas preexistentes en yacimientos de hidrocarburos pueden llegar a reactivarse como consecuencia de los cambios en el estado de esfuerzos in-situ, inducidos por los procesos de producción e inyección. Este trabajo analiza el potencial de reactivación que poseen las fallas presentes en yacimientos depletados, a partir de un modelo que se acopla a las condiciones variables de presión de poro dentro del yacimiento. Para esto se comparan dos modelos de reactivación de fallas. El modelo de Jaeger y el modelo de Leclere. De los dos, se selecciona el modelo que arroje mejores resultados, teniendo en cuenta, las variables de entrada, el procesamiento de la información y la forma en que presentan los resultados. Luego, técnicas analíticas para analizar el efecto que causa la depleción en los yacimientos, son acopladas al modelo seleccionado para evaluar el potencial de reactivación en yacimientos depletados. El modelo se valida con resultados de otras investigaciones sobre reactivación de fallas. Un breve análisis de sensibilidad es realizado para encontrar la influencia de la variación de algunas de las variables más representativas. Finalmente, el modelo acoplado es aplicado en una zona tectónicamente activa, y de esta manera poder analizar las condiciones mecánicas de las principales fallas ubicadas en el yacimiento.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Zully Himelda Calderón Carrillo, Ph.D. Ingeniera de Petróleos.

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF THE POTENTIAL TO REACTIVATE FAULTS IN DEPLETED RESERVOIRS\*

**AUTHOR:** JUAN SEBASTIAN MEDINA ZAMBRANO\*\*

**KEYWORDS:** FAULT REACTIVATION, STRESS CHANGES, RESERVOIR DEPLETED, PORE PRESSURE, FAULT CRITERION.

**DESCRIPTION:**

Pre-existing faults in hydrocarbon reservoirs can be reactivated as a result of changes in the state of in-situ stress, induced by the production and injection processes. This paper analyzes the reactivation potential of the faults present in depleted reservoirs, from a model that is coupled to the variable pore pressure conditions within the reservoir. For this, two models of reactivation of faults are compared. The model of Jaeger and the model of Leclere. Of the two, the model that yields the best results is selected, taking into account the input variables, the processing of the information and the form they present the results. Then, analytical techniques to analyze the effect that causes the depletion in the reservoirs, are coupled to the selected model to evaluate the potential of reactivation of faults in the different places of the depleted reservoirs. The model is validated with results of other investigations on reactivation of faults. A brief sensitivity analysis is performed to find the effect of the variation of some of the most representative variables. Finally, the coupled model is applied in a tectonically active zone, and in this way to be able to analyze the mechanical conditions of the main faults located in the reservoir.

---

\* Bachelor Thesis.

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Zully Himelda Calderón Carrillo, Ph.D. Ingeniera de Petróleos.

## INTRODUCCIÓN

Durante la etapa de desarrollo de un campo de hidrocarburos, uno de los aspectos indispensables es identificar el riesgo geológico asociado con los diferentes procesos que se realizan en el yacimiento para obtener el hidrocarburo. El propósito de este trabajo de grado busca analizar el potencial de reactivación de fallas presentes en yacimientos depletados con el fin de obtener información que permita conocer las condiciones mecánicas de las fallas y de esta manera reducir la incertidumbre ligada al comportamiento de las fallas sobre el riesgo geológico.

Inicialmente se presenta una breve revisión bibliográfica del tema con el objetivo de identificar los inicios y la evolución del fenómeno de reactivación de fallas. En seguida, se complementa esta información con conceptos teóricos que permiten una mejor comprensión de las causas y consecuencias de la reactivación. Donde se describen temas de fallas geológicas, esfuerzos efectivos, poroelasticidad, círculo de Mohr y demás.

En la segunda sección se describen los parámetros geomecánicos de reactivación y como estos ayudan a evaluar el potencial de reactivación. En seguida, dos modelos representativos del fenómeno de reactivación de fallas se describen para comparar sus variables, cálculos y resultados arrojados.

De la comparación de los modelos se define el modelo más adecuado para la evaluación de las condiciones mecánicas de las fallas en yacimientos depletados. Al modelo seleccionado se le acoplan los efectos que origina la depleción en los yacimientos, permitiendo identificar, de qué forma son alteradas las fallas en las diferentes partes del yacimiento. Por medio de un diagrama de flujo se explica la

metodología del modelo acoplado para el análisis de la estabilidad de las fallas, y su diferencia con el modelo original. Un breve análisis de sensibilidad es llevado a cabo para apreciar la influencia en los resultados de las variables más importantes durante la depleción del yacimiento.

Finalmente se aplica el modelo acoplado en un campo de hidrocarburos colombiano tectónicamente activo para evaluar el potencial de reactivación de sus principales fallas.

# **1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CONCEPTOS BÁSICOS DE LA REACTIVACIÓN DE FALLAS**

## **1.1 INICIO DE LOS ESTUDIOS DEL FENÓMENO DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN CAMPOS DE HIDROCARBUROS**

Los estudios del fenómeno de reactivación de fallas, empezaron a principios de los años 50. Cuando percibieron tiempo atrás, que ciertas actividades inherentes a la exploración y producción de hidrocarburos inducían sismicidad de la cual, no tenían certeza alguna de su origen. Estudios posteriores lograron encontrar las causas de esta sismicidad, y la asociaron a factores que ocurrían en su mayoría por la reactivación de fallas presentes en yacimientos depletados, los cuales, ya tenían un grado avanzado de compactación y subsidencia<sup>1</sup>.

A principios de los años 20 al sur de Texas empezaron a presentarse fenómenos como fallas geológicas, subsidencia y sismos en los alrededores del campo de hidrocarburos Goose Creek. La presencia de fallas ocasionó el agrietamiento de la superficie de la tierra. Se sospechó de una relación directa entre la extracción de petróleo y el inicio de la subsidencia y la actividad sísmica. En ese tiempo la subsidencia causada por la producción de hidrocarburos se consideraba extraña y se creyó que este fenómeno era algo único de la ubicación del campo. Sin embargo, tiempo después observaciones similares en el campo petrolero Wilmington en Long Beach, California, Estados Unidos, en donde se produjeron varios sismos entre 1947 y 1955, donde la subsidencia de la superficie alcanzó los 30 ft [9 m] en 1966

---

<sup>1</sup> SUCKALE, Jenny. *Advances and Geophysics. Induced Seismicity in Hydrocarbon Fields*. Cambridge: Elsevier, 2009. 171 p. ISBN 978-0-12-374911-6.

después de 30 años de producción, corroboraron que la subsidencia y la sismicidad inducida, se debían a la producción de fluidos del yacimiento<sup>2</sup>.

Para la época de 1960 era claro que la producción de hidrocarburos inducía sismicidad como consecuencia de la compactación y subsidencia. Pero era dudoso si con la inyección de fluidos al yacimiento surgía lo mismo. Fue entonces cuando geofísicos, sismólogos e hidrólogos diseñaron un experimento en 1958 en el campo de hidrocarburos Ragely al oeste de Colorado, con el fin de determinar si la inyección de fluidos causaría sismicidad, y si así fuera, la relación que tenían; la tasa de inyección y el aumento de la presión de poro, con los eventos sísmicos que devenían. El experimento consistió en inyectar tasas controladas de agua y ubicar sismógrafos estratégicamente para que detectaran cualquier actividad sísmica presente en el campo. En 1964 los sismógrafos detectaron leves sismos causados por la inyección de fluidos. Los eventos sísmicos se centraban en una región a lo largo de una falla, donde su presión de poro había aumentado considerablemente por la inundación a la que fue sometido el yacimiento. Después de un tiempo de haber iniciado la actividad sísmica en la zona, se abrió un pozo de producción cercano a la falla donde acontecían los eventos sísmicos, trayendo como consecuencia la desaparición de la sismicidad en el campo. Esto determinó que al incrementarse la presión de poro en la vecindad de una falla, existe la probabilidad de que se reactive, desencadenando una serie de eventos sísmicos inesperados<sup>3</sup>.

Los estudios de la reactivación de fallas en yacimientos derivan de los estudios de la sismicidad que ocurría por ese tiempo en los campos de hidrocarburos, ya que gran parte de esta, era causada por el deslizamiento de fallas susceptibles a los

---

<sup>2</sup> FROHLICH, Cliff, et al. A Historical Review of Induced Earthquakes in Texas. *Seismological Research Letters*. 2016, Vol. 87, No. 4, p. 2–4.

<sup>3</sup> National Research Council. *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2012. 263 p. ISBN 978-0-309-25367-3.

cambios de esfuerzos que originaban los procesos de extracción e inyección de fluidos<sup>4</sup>. Es así como a partir de los años 50 se desarrollaron una serie de investigaciones enfocadas al fenómeno de la reactivación de fallas; pero es hasta los años 80 donde se realizaron avances significativos sobre el tema, con estudios realizados en campos petroleros ubicados en Estados Unidos, Francia, Países Bajos, Tchétchenie y Noruega, tabla (1).

**Tabla 1.** Campos de hidrocarburos donde se estudió el fenómeno de reactivación de fallas.

<b>CAMPO</b>	<b>NACIÓN</b>	<b>ESTUDIO</b>
Fashing	Texas, USA	Pennington et al, 1986
Imogene	Texas, USA	Pennington et al, 1986
Lacq	Aquitania, Francia	Grasso y Wittlinger, 1990
Grozny	Tchétchenie	Grasso, 1992
Fashing	Texas, USA	Nyffenegger et al, 1995
Visund	Mar del norte, Noruega	Wiprut y Zoback, 2000
Ekofisk	Mar del Norte, Noruega	Zoback y Zinke, 2002
Valhall	Mar del Norte, Noruega	Zoback y Zinke, 2002
Eleveld	Groningen, Países Bajos	Van Eijs et al, 2006

Cabe aclarar que los estudios mostrados en la tabla 1, son algunos de los casos más representativos de reactivación de fallas en campos de hidrocarburos, de manera que no son la totalidad de los estudios realizados mundialmente. Así mismo, estos son el resultado de la importancia de conocer las condiciones bajo las cuales

<sup>4</sup> ADUSHKIN, Vitaly. Seismicity in the Oil Field. *Oilfield Review*. 2000, Vol. 12, No. 1, 16 p.

se produce el fenómeno de reactivación de fallas, con el fin de minimizar el riesgo geológico en proyectos de producción.

Las investigaciones realizadas contemplan la evaluación del riesgo de reactivación de fallas con la ayuda de modelos analíticos, semianalíticos y numéricos. Estos modelos se fundamentan bajo principios físicos y geológicos simples que permiten dar soluciones aproximadas a los resultados observados en campo.

Pennington et al, investigaron en 1986 los efectos de la presión de poro sobre las propiedades que gobiernan la mecánica de un plano de falla en el campo de petróleo Imogene y en el campo de gas Fashing al sur de Texas. Ellos encontraron que estos campos presentaban sismicidad inducida debido a la reactivación de fallas generada por la disminución de la presión de poro. Grasso y Wittlinger estudiaron en 1990 una serie de eventos sísmicos en el campo de gas Lacq en Francia, encontrando una gran correlación entre las caídas de presión y la generación de estos eventos alrededor de una falla presente en el campo<sup>5</sup>. Posteriormente Grasso en 1992 encontró que la disminución de los esfuerzos efectivos causaba el deslizamiento de fallas en equilibrio friccional desencadenando eventos sísmicos de mayor magnitud en el campo Grozny, en Chechenia. Nyffenegger et al, en 1995 encontró que la compactación del yacimiento genera reactivación de fallas en los alrededores del yacimiento en el campo Fashing, en Texas<sup>6</sup>. Zoback, Wiprut y Zinke hallaron que la reactivación de fallas produce fugas de fluido del yacimiento. La relación existente entre las propiedades del yacimiento y la reactivación de fallas es analizada por Van Eijs et al, en 2006 en el campo Eleveld, Países Bajos.

---

<sup>5</sup> SEGALL, Paul. Poroelastic Stressing and Induce Seismicity near the Lacq Gas Oil Field, Southwestern France. *Journal of Geophysical Research*. 1994, Vol. 99, No. B8, p. 424 – 438.

<sup>6</sup> J. Erick. Rapid Subsidence over Oil Fields Measured by SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*. 1998, Vol. 25, No. 17, p. 3215 – 3218.

## 1.2 FALLAS GEOLÓGICAS

Para entender el fenómeno de reactivación de fallas es necesario conocer la naturaleza de las fallas; sus partes, sus propiedades, los tipos y su mecánica. Al igual que los demás aspectos que la acompañan como los esfuerzos y la presión de poro.

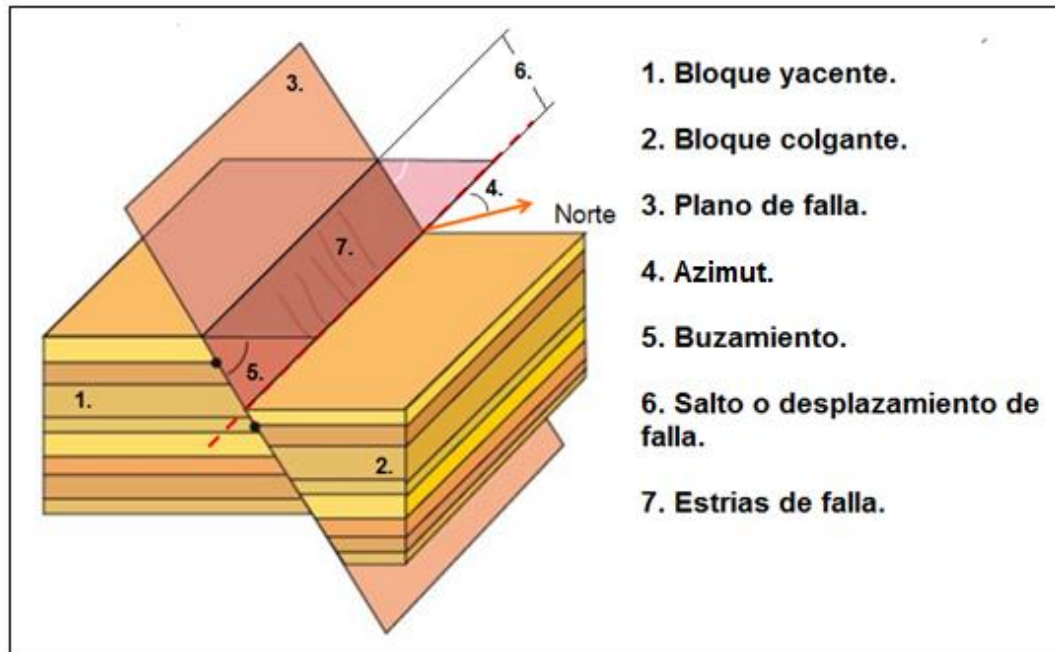
Las fallas geológicas son deformaciones estructurales discontinuas de la corteza terrestre. Se originan principalmente en regiones frágiles del subsuelo y se caracterizan porque se presenta un desplazamiento relativo evidente entre los dos bloques rocosos que la componen, causado por un esfuerzo de cizalla. Una población de fallas es una región donde existe una gran cantidad de superficies de falla, las cuales se encuentran subparalelas o interconectadas entre ellas. Son regiones inestables debido a que presentan varios planos de ruptura, susceptibles al deslizamiento en caso de un desequilibrio en el estado de esfuerzos de la zona<sup>7</sup>.

Las fallas están compuestas por elementos que las caracterizan y permiten su identificación (figura 1). El plano de falla es la superficie creada por la ruptura frágil en el bloque rocoso. Los bloques yacente y colgante se crean al momento de que la ruptura los divide. El bloque yacente siempre se encuentra debajo del plano de falla y el bloque colgante se encuentra en la parte superior del plano de falla. El azimut es la dirección del plano de falla con respecto al Norte. El buzamiento es el ángulo de inmersión del plano de falla con relación a un plano horizontal. El salto o el desplazamiento de falla, me indican la magnitud del deslizamiento y las estrías, me definen la dirección del movimiento de la falla.

---

<sup>7</sup> TWISS, Robert y MOORES, Eldridge. Structural Geology. 2 ed. New York: W. H. Freeman, 2006. 532 p. ISBN 978-0-716-74951-6.

**Figura 1.** Elementos de una falla.



**Fuente:** tomada de LILLO, Javier y OYARZUN, Roberto. Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera: Principios Básicos. Madrid: Ediciones GEMM, 2013. 210 p.

**1.2.1 Régimen de Esfuerzos y Tipos de Fallas.** Las rocas del subsuelo se encuentran sometidas a esfuerzos, estos se encargan de plegar o fracturar las rocas y formar las diferentes estructuras geológicas. Un esfuerzo es una fuerza que actúa sobre un plano y se define como fuerza sobre área. En la industria se da en unidades de megapascales [MPa]. Los esfuerzos se representan con un tensor de nueve componentes, el cual describe la densidad de las fuerzas que actúan en todas las superficies que pasan por un punto. Está compuesto por esfuerzos normales ( $\sigma$ ) y de cizalla ( $\tau$ ), que actúan en dirección perpendicular y paralela al plano respectivamente<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> LILLO, Javier y OYARZUN, Roberto. Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera: Principios Básicos. Madrid: Ediciones GEMM, 2013. 210 p.

Un estado de esfuerzos hace referencia a los esfuerzos in-situ presentes en una sección de roca (figura 2a). Normalmente, la sección de roca es un cubo infinitesimal que se aproxima a un punto con el fin de determinar su tensor de esfuerzos. La ecuación (1) representa el tensor de esfuerzos ( $T$ ), asociando el primer subíndice de sus componentes con el plano y el segundo con la dirección del esfuerzo. Suponiendo, que el cubo se encuentra en equilibrio rotacional y traslacional, entonces, los esfuerzos de cizalla de las caras adyacentes del cubo, son de la misma magnitud. Ahora, el tensor de esfuerzos ( $T$ ) es representado por la ecuación (2). Sin embargo, debido a la simetría del tensor, el orden de los subíndices es de poca importancia<sup>9</sup>. Aunque la ecuación (1) es práctica para varios propósitos, una forma sencilla de utilizar el tensor para cálculos teóricos, es con la ecuación (2), ya que el número de componentes independientes, disminuye de nueve a seis.

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (2)}$$

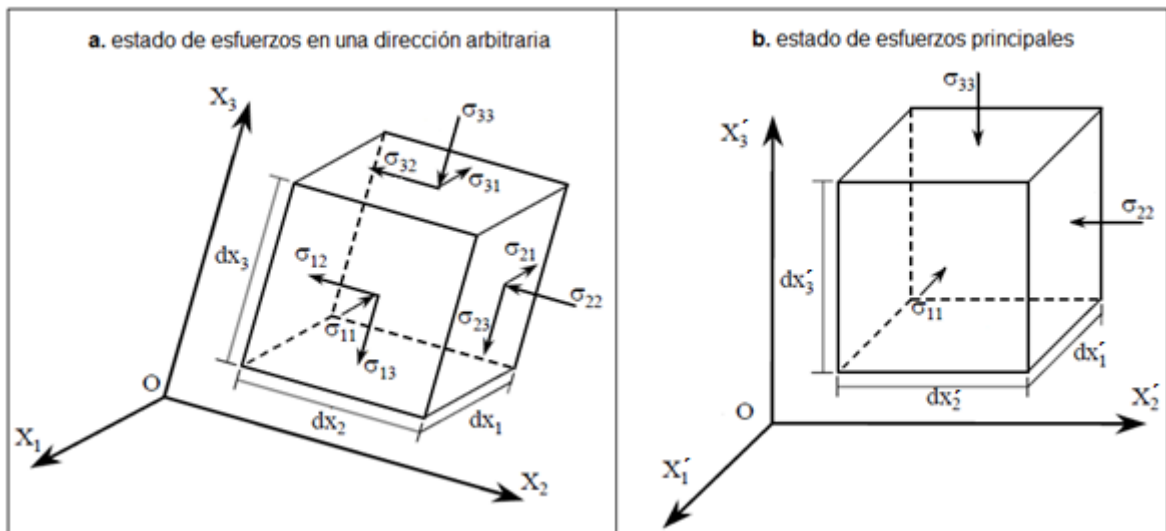
Los esfuerzos presentes en un segmento de roca del subsuelo a una profundidad determinada, suelen llamarse esfuerzos in-situ. Por conveniencia estos esfuerzos son representados en un sistema de coordenadas principal, cada eje de este sistema de coordenadas es perpendicular a planos ortogonales entre sí, llamados planos principales, donde los esfuerzos de cizalla desaparecen y solo figura el esfuerzo normal, denominado esfuerzo principal (figura 2b). Como el sistema de

---

<sup>9</sup> BRADY, B. y BROWN, E. Rock Mechanics: for Underground Mining. 3 ed. Sydney: George Allen, 2005. 645 p. ISBN 978-94-011-6503-7.

coordenadas principal está compuesto por tres ejes ortogonales entre ellos, existen tres esfuerzos principales; el esfuerzo principal máximo ( $\sigma_1$ ), el esfuerzo principal intermedio ( $\sigma_2$ ) y el esfuerzo principal mínimo ( $\sigma_3$ ), donde  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Los esfuerzos constituidos en este sistema de coordenadas se denominan esfuerzos principales<sup>10</sup>. Estos esfuerzos determinan el estado de esfuerzos principal en un punto y mejoran de forma práctica el tensor de esfuerzos como lo enseña la ecuación (3).

**Figura 2.** Estado de esfuerzos en 3D de un cubo infinitesimal.



**Fuente:** tomada de MULDER, Matheus Marie. Modelling of Stress Development and Fault Slip in and Around a Producing Gas Reservoir.

$$T = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

*Ecuación (3)*

<sup>10</sup> JAMES, W. Dally y WILLIAM, F. Riley. Experimental Stress Analysis. Tokyo: McGraw-Hill, 1965. 345 p.

Existen tres esfuerzos generados por procesos endógenos de la corteza terrestre. La magnitud de estos esfuerzos depende de la profundidad, la presión de poro, la actividad tectónica y otros procesos geológicos en un menor grado. Uno de los esfuerzos es el esfuerzo de sobrecarga ( $\sigma_v$ ), que actúa de forma vertical a la superficie terrestre y su magnitud, depende de la densidad de las rocas suprayacentes y la profundidad del punto donde se desea conocer. Los otros dos esfuerzos; el esfuerzo horizontal máximo ( $\sigma_{Hmax}$ ) y el esfuerzo horizontal mínimo ( $\sigma_{hmin}$ ), actúan en un plano horizontal y son ortogonales entre ellos<sup>11</sup>.

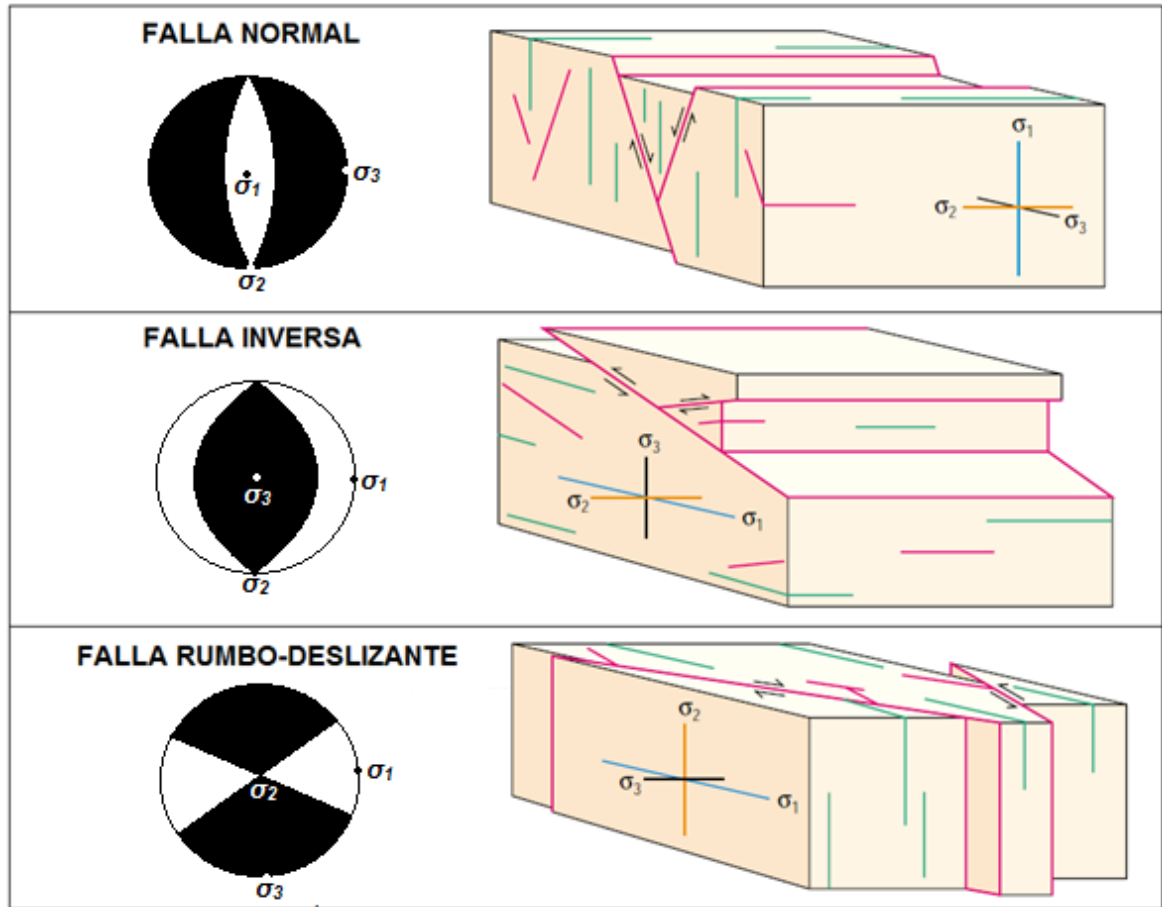
El esfuerzo de sobrecarga y los esfuerzos horizontales, pueden asociarse a cada esfuerzo principal  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , dependiendo de su magnitud relativa. Esto permite que sean representados en un estado de esfuerzos principal. Según como estén relacionados, existirá un régimen de esfuerzos en la zona donde inciden. Así, de los tres,  $\sigma_1$ , es el de mayor magnitud;  $\sigma_2$ , el de magnitud intermedia; y  $\sigma_3$ , el de menor magnitud.

Los tipos de fallas generadas en la corteza terrestre por causa de los esfuerzos, dependen principalmente del régimen de esfuerzos presente en la zona (figura 3). Se consideran tres tipos de régimen de esfuerzos; el régimen normal donde  $\sigma_v \geq \sigma_{Hmax} \geq \sigma_{hmin}$ , el régimen inverso donde  $\sigma_{Hmax} \geq \sigma_{hmin} \geq \sigma_v$  y el régimen rumbo-deslizante donde  $\sigma_{Hmax} \geq \sigma_v \geq \sigma_{hmin}$ . Tabla (2).

---

<sup>11</sup> JIANMIN, Yin; XIFENG, Guo y YUNFANG, Liu. Rock Stress and Earthquakes. Study on Characteristics of In-Situ Stress Affected by Faults. Londres: Furen Xie, 2010. P. 291-294. ISBN 978-8-0-415-60165-8.

**Figura 3.** Tipos de Fallas.



**Fuente:** tomada de CERVENY, Kip, et al. Reducing Uncertainty with Fault-Seal Analysis. *Oilfield Review*. 2005, Vol. 16, No. 4. p. 42-57.

Existe una caracterización creada por el geólogo E. M. Anderson en el año 1951. Sigue siendo ampliamente utilizada como base para describir los fundamentos de la orientación de las fallas según la discontinuidad. Anderson describió tres tipos de fallas básicas, las fallas normales, las fallas inversas y las fallas rumbo-deslizantes. La teoría andersoniana, asume que las fallas se forman como dos planos conjugados con las tres relaciones siguientes entre la orientación de las fallas y los esfuerzos principales:

- ✓ Las fallas se forman con un ángulo de  $\pm 30^\circ$  respecto a la dirección de  $\sigma_1$ .
- ✓ Las fallas se forman con un ángulo de  $\pm 60^\circ$  respecto a la dirección de  $\sigma_3$ .
- ✓ La línea formada por la intersección de los planos de fallas conjugados será paralela a  $\sigma_2$ .

Las fallas normales se caracterizan porque su bloque colgante ha descendido con respecto al bloque yacente. Por el contrario, en las fallas inversas, el bloque colgante asciende con respecto al bloque yacente. Una falla rumbo-deslizante se identifica porque su plano de falla se encuentra totalmente vertical y su desplazamiento es de forma horizontal<sup>12</sup>.

**Tabla 2.** Régimen de Esfuerzos.

REGIMEN	ESFUERZOS		
	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
Normal	$\sigma_v$	$\sigma_{Hmax}$	$\sigma_{hmin}$
Rumbo-deslizante	$\sigma_{Hmax}$	$\sigma_v$	$\sigma_{hmin}$
Inverso	$\sigma_{Hmax}$	$\sigma_{hmin}$	$\sigma_v$

**Fuente:** tomada de ZOBACK, Mark. Reservoir Geomechanics. New York: Cambridge University Press, 2007. 443 p. ISBN 978-0-521-77069-9.

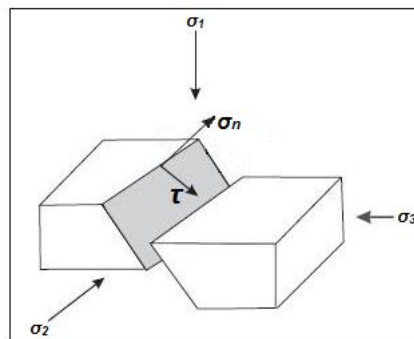
**1.2.2 Esfuerzos y Resistencia Friccional en el Plano de Falla.** Las condiciones estáticas de una falla dependen en gran parte de la magnitud de los esfuerzos que actúan en el plano de falla y la resistencia friccional que esta presenta<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> ERNERST, Anderson. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. Edinburgo: Oliver y Boyd, 1951. 206 p.

<sup>13</sup> MUKUHIRA, Y., et al. Stress State Analysis of a Fault Plane with Large Induced Seismicity. *American Rock Mechanics Association*. 2016. 7 p.

Los esfuerzos que se concentran en el plano de falla son dos, y están relacionados con el estado de esfuerzos principal de la zona, el azimut y el buzamiento de la falla. Uno de ellos, es el esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ), el cual actúa tangente al plano de falla. El otro, es el esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ), que actúa de forma ortogonal al plano (figura 4).

**Figura 4.** Esfuerzos en el Plano de Falla.



**Fuente:** Tomada de NACHT, P. K. et al. Investigation of geological Fault Reactivation and opening. *Mecánica Computacional*. 2012. p. 8687-8697.

Por otro lado, la resistencia friccional contribuye a la restricción del movimiento de la falla. Esta resistencia friccional depende únicamente de la naturaleza de los materiales en contacto de la falla y del esfuerzo normal presente en el plano de falla. La resistencia friccional esta explicada por la ley de Amontons (1699), la cual dice que el deslizamiento friccional de un plano ocurre cuando la relación entre el esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ) y el esfuerzo normal ( $\sigma_n$ ), presentes en este, supera una propiedad del material llamada coeficiente de fricción estático ( $\mu_s$ ), como lo describe la ecuación (4). El coeficiente de fricción estático depende del material de la roca y se debe a las rugosidades a pequeña y gran escala que tienen las superficies en contacto de la falla (figura 5a)<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> JAEGER, John; COOK, Neville y ZIMMERMAN, Robert. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4 ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. 469 p. ISBN 978-0-632-05759-7.

$$\mu_s = \frac{\tau}{\sigma_n}$$

Ecuación (4)

Byerlee en 1978, realizó numerosos experimentos de laboratorio en una variedad de tipos de fallas de diferentes muestras de rocas, mostradas en la tabla (3). Él consideró fallas naturales, fallas sintéticas y fallas inducidas por pruebas de compresión triaxial de diferentes rugosidades.

**Tabla 3.** Coeficiente de fricción de algunas rocas.

ROCA	COEFICIENTE DE FRICCIÓN	REFERENCIA
Arena	0.68	Rae (1963)
Arena	0.51	Hoskins et al, (1968)
Arena	0.52	Jaeger (1959)
Arena	0.61	Hoskins et al, (1968)
Granito	0.6	Byerlee (1967)
Granito	0.64	Hoskins et al, (1968)
Gneis	0.71	Jaeger (1959)
Gneis	0.61	Jaeger (1959)

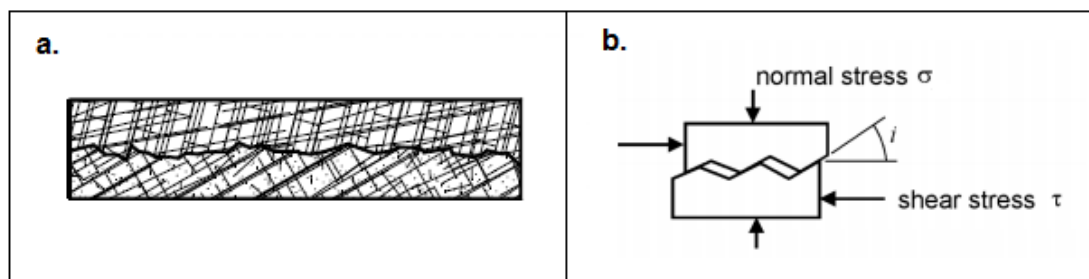
**Fuente:** Tomada de JAEGER, John; COOK, Neville y ZIMMERMAN, Robert. Fundamentals of Rock Mechanics. 4 ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. 469 p. ISBN 978-0-632-05759-7.

La resistencia friccional es el producto del coeficiente de fricción estático y el esfuerzo normal existente en el plano de falla ( $\mu_s \cdot \sigma_n$ ). Por ende, la resistencia friccional sería un esfuerzo inherente a la falla que limita su movimiento. En una misma falla normalmente existen regiones que poseen más resistencia friccional que otras, debido a las asperitas de la falla. Estas asperitas son picos en la

superficie de falla, que se reducen debido a que se pulen o fracturan por el deslizamiento de la falla, reduciendo su ángulo de dilatación ( $i$ ) (figura 5b). Para esfuerzos normales efectivos aproximadamente mayores a 10 MPa, la resistencia friccional es independiente de las rugosidades que generan estas asperitas y la tasa de deslizamiento de la falla. En tal caso solo depende del coeficiente de fricción estático, el cual está dentro del rango  $0.6 \leq \mu_s \leq 1$ . A lo que se le denomina la ley de Byerlee<sup>15</sup>.

Tanto los fluidos como el material ubicado entre la falla, afectan la resistencia friccional. Los fluidos reducen la resistencia friccional ya que sirven como lubricantes entre las superficies de contacto de la falla. Con respecto, al material entre la falla, si la amplitud de la brecha es mayor que los picos de las asperitas, la resistencia friccional está determinada por el material de la brecha. Siendo así, si el material está compuesto en más de un 25 % por minerales débiles como las arcillas, la resistencia friccional disminuye drásticamente<sup>16</sup>.

**Figura 5.** Rugosidades a gran y pequeña escala de una superficie de falla.



**Fuente:** Tomada de SFONDRINI, G. y STERLACCHINI, S. Influence of Joint Roughness on Discontinuity Shear Strength. *International Society for Rock Mechanics*. 1996. 8p.

<sup>15</sup> SFONDRINI, G. y STERLACCHINI, S. Influence of Joint Roughness on Discontinuity Shear Strength. *International Society for Rock Mechanics*. 1996. 8p.

<sup>16</sup> WANG, Chaoyi y ELSWORTH, Derek. Numerical Investigation of the effect of frictionally Weak Minerals on Shear strength of Fault. *American Rock Mechanics Association*. 2016. 6 p.

**1.2.3 Fallas Sellantes y Fallas Conductivas.** Las fallas que intersectan yacimientos de hidrocarburos pueden ser de dos tipos. Pueden ser fallas sellantes, delimitando y compartimentalizando el yacimiento o pueden ser fallas conductivas, que se encuentran hidráulicamente activas permitiendo la comunicación y el flujo de los fluidos a través de la falla.

Las fallas sello se caracterizan porque permiten la acumulación de columnas de hidrocarburos, además dividen el yacimiento en zonas con diferentes propiedades de fluidos y condiciones de presión. Estas fallas pueden ser selladas de dos formas. Una de ellas es un sello por membrana, en el cual se involucran procesos de diagénesis, donde se presenta la litificación del material en el interior de la falla; mezcla de grano-arcilla, compuesta por la trituración de las diferentes capas litológicas entre el plano de falla, donde su permeabilidad depende del contenido de arcilla; manchado de arcilla, donde las capas de lutitas son arrastradas y deformadas a lo largo del plano de falla, formando una barrera de baja permeabilidad para el flujo de fluidos. La otra forma de sello, es por geometría, donde se presenta la yuxtaposición de las rocas del yacimiento con las rocas impermeables debido a la litología de la zona, restringiendo el flujo de fluidos (figura 6)<sup>17</sup>.

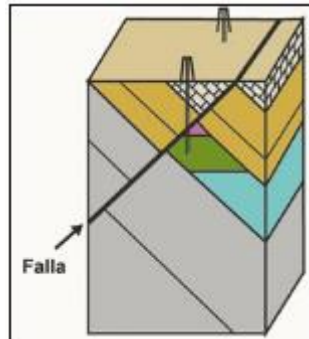
Las fallas conductivas permiten el flujo de fluidos debido a la red de microfracturas en la zona de daño de la falla y a la permeabilidad del material de la brecha, provocando que los hidrocarburos migren a otros lugares de almacenamiento o se dirijan directamente a la superficie. También influyen significativamente en la producción del yacimiento, debido a que poseen una permeabilidad mayor que la matriz de la roca. La permeabilidad de las fallas conductivas depende del esfuerzo

---

<sup>17</sup> JONES, Richard, et al. Geomechanical Fault Characterization: Impact on Quantitative Fault Seal Risking. *Society of petroleum Engineers*. 2002. 8p.

normal efectivo y de otros parámetros como el grado de cementación y composición del material de la brecha<sup>18</sup>.

**Figura 6.** Falla sello por yuxtaposición.



**Fuente:** tomada de VARELA, Ricardo. Manual de Geología. La Plata: Instituto Superior de Correlación Geológica, 2014. 157 p.

Las fallas sellantes pueden convertirse en conductivas o viceversa. Para que una falla sello sometida a un estado de esfuerzos, se convierta en una falla conductiva, esta debe estar críticamente forzada. Por el contrario, una falla conductiva puede ser sellante si en ella se presentan los procesos de sello mencionados anteriormente, además de no encontrarse críticamente forzada<sup>19</sup>.

### 1.3 ESFUERZOS EFECTIVOS Y POROELASTICIDAD

El concepto de esfuerzo efectivo introducido por Terzaghi en 1923. Tiene en cuenta los esfuerzos intergranulares de un cuerpo rocoso sometido a un estado de

---

<sup>18</sup> HAMAD, Rashid; MOHAMMED, Faisal y GILL, Harmohan. Identifying, Characterizing and Locating Conductive Faults: Multi-Well Analysis Approach. *Society of Petroleum Engineers*. 2005. 7p.

<sup>19</sup> BARTON, Colleen; ZOBACK, Mark y MOOS, Daniel. Fluid Flow along Potentially Active Faults in Crystalline Rock. *Geology*. 1995, Vol. 23, No. 8, p. 683-686.

esfuerzos. Debido a que las rocas son cuerpos sólidos, porosos, saturados con fluidos. El esfuerzo externo no suele ser el mismo que actúa en el interior del cuerpo, ya que existe un fluido llenando los poros de la roca. Los fluidos que saturan la roca ejercen una presión perpendicular a la superficie de los granos, denominada presión de poro ( $P_p$ ) (figura 7). Esta presión de poro ayuda a soportar los esfuerzos normales externos ( $\sigma$ ), de tal manera, que estos se transmiten por medio del fluido en forma de presión, y por los granos en forma de esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ). Dicho de esta forma, se puede decir que el esfuerzo normal externo, es igual al esfuerzo efectivo más la presión de poro. Así el esfuerzo efectivo se representa matemáticamente por la ecuación (5)<sup>20</sup>.

$$\sigma' = \sigma - P_p$$

*Ecuación (5)*

La poroelasticidad describe el comportamiento constitutivo de un cuerpo sólido poroso y elástico saturado con un fluido. Esta teoría propuesta por Biot en 1941, es representada matemáticamente por la constante de Biot ( $\alpha$ ), que depende de la porosidad de la roca y varía de 0 a 1. Cuando es una roca con baja porosidad el valor es cero, de lo contrario, cuando es una roca con alta porosidad el valor tiende a uno. Esta teoría asume tres consideraciones<sup>21</sup>:

- ✓ Un sistema poroso interconectado uniformemente y saturado con un fluido.
- ✓ El volumen poroso es pequeño comparado con el volumen total de la roca.

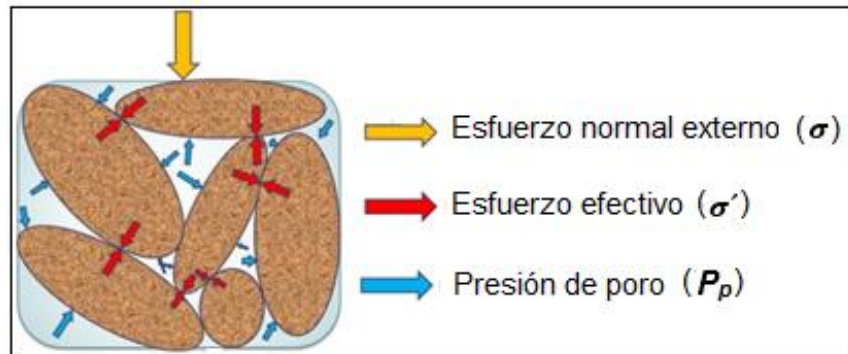
---

<sup>20</sup> BRAJA, Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. 4 ed. México D.F.: Cengage Learning, 2013. 630 p. ISBN 978-607-519-373-1.

<sup>21</sup> MULDER, Marie. Modelling of Stress development and fault Slip in and Around a Producing Gas Reservoir. Delft, 2003, 288 p. Thesis to obtain the degree of Doctor. Delft University of technology.

- ✓ La presión de poro, el esfuerzo normal externo y el esfuerzo interno sobre los granos deben ser valores promedios.

**Figura 7.** Representación gráfica del esfuerzo efectivo.



**Fuente:** tomada de VARELA, Ricardo. Manual de Geología. La Plata: Instituto Superior de Correlación Geológica, 2014. 157 p.

Utilizando el concepto de esfuerzo efectivo y la teoría de Biot es posible considerar los efectos tanto de los fluidos como de los poros en el comportamiento mecánico de las rocas. Así, la ecuación (5) se puede complementar como lo muestra la ecuación (6).

$$\sigma' = \sigma - \alpha P_p \quad \text{Ecuación (6)}$$

#### 1.4 CÍRCULO DE MOHR EN 3D Y CRITERIO DE FALLA DE COULOMB

El círculo de Mohr es una representación gráfica de un estado de esfuerzos que permite calcular el esfuerzo normal y de cizalla en un plano de falla arbitrario. Los esfuerzos principales definen tres círculos dentro de un diagrama de esfuerzo de

cizalla vs esfuerzo normal efectivo. Los esfuerzos presentes en un plano de falla están representados por un punto ubicado en una zona factible entre los círculos menores definidos por la diferencia entre  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_2$ ,  $\sigma'_2$  y  $\sigma'_3$ , respectivamente, y el círculo principal definido por la diferencia entre  $\sigma'_1$  y  $\sigma'_3$  (figura 8). Las ecuaciones (6) y (7) definen el esfuerzo normal efectivo y de cizalla en un plano de falla en 3D arbitrario.

$$\sigma'_n = \sigma'_1 l + \sigma'_2 m + \sigma'_3 n \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$\tau^2 = (\sigma'_1 l)^2 + (\sigma'_2 m)^2 + (\sigma'_3 n)^2 - \sigma'^2_n \quad \text{Ecuación (7)}$$

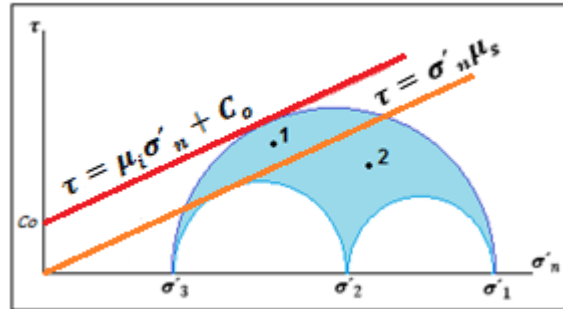
Donde  $l$ ,  $m$  y  $n$  son los cosenos directores del vector normal unitario con respecto a los esfuerzos principales. Cada círculo posee un centro y un radio, los cuales están determinados por el valor de los esfuerzos principales.

El criterio de falla de Coulomb es comúnmente empleado para los modelos que evalúan el potencial de reactivación de fallas, porque describe el comportamiento frágil de la roca y por su certeza en los resultados. Consiste en una envolvente de falla idealmente linealizada representada por la ecuación (8). Si la envolvente intersecta el círculo de Mohr debido a un estado de esfuerzos que actúa en una roca intacta en un punto, la roca presentara un plano de falla. Cuando se trata de una roca previamente fallada es más probable que el plano de falla se reactive, a que se generen nuevas fallas en la roca. La envolvente de falla está definida por dos parámetros: la cohesión ( $C_0$ ), que a su vez depende de la resistencia compresiva sin confinamiento (**UCS**) y el coeficiente de fricción interna, el cual, define la pendiente de la envolvente (línea roja, figura 8).

$$\tau = \mu_i \sigma'_n + C_0$$

Ecuación (8)

**Figura 8.** Círculo de Mohr y envolvente de falla.



**Fuente:** tomada de JAEGER, John; COOK, Neville y ZIMMERMAN, Robert. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4 ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. 469 p. ISBN 978-0-632-05759-7.

Normalmente la envolvente de falla, se obtiene mediante pruebas de laboratorio. Para el análisis de reactivación de fallas al considerar planos de falla sin cohesión, la envolvente de falla sufre una modificación. Donde, la envolvente parte del origen y depende únicamente del coeficiente de fricción estático del plano (línea naranja, figura 8). Está representada matemáticamente por la ley de Amontons<sup>22</sup>.

## 1.5 FALLAS CRÍTICAMENTE FORZADAS

Las fallas críticamente forzadas se comportan hidráulicamente activas permitiendo el flujo de fluidos a través de ellas. Por ende, intervienen de forma sustancial tanto en la producción del yacimiento, como en la acumulación de columnas de hidrocarburos. La figura 8, muestra dos puntos (1) y (2) que representan los valores del esfuerzo normal efectivo y de cizalla presentes en el plano de dos fallas. La falla

<sup>22</sup> XU, S.; NIETO, A. y ALANIZ, S. 3D Mohr Diagram to Explain Reactivation of Pre-existing Planes due to Changes in Applied Stresses. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010. 7 p.

simbolizada por el punto (1), al localizarse por encima de la envolvente de falla, se encuentra críticamente forzada. Por otro lado, la falla simbolizada por el punto (2), al encontrarse en la parte baja de la envolvente de falla, no se encuentra críticamente forzada, es decir, no es hidráulicamente activa y se comporta como sello<sup>23</sup>.

## 1.6 REACTIVACIÓN DE FALLAS EN YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS

La reactivación de fallas hace referencia al deslizamiento de un plano de falla pre-existente en un yacimiento como consecuencia de cambios en la presión de poro, el estado de esfuerzos in-situ y la compactación del yacimiento. La reactivación del plano de falla puede ocurrir tanto dentro como en los alrededores del yacimiento<sup>24</sup>.

En el análisis del potencial de reactivación de fallas es utilizado el criterio de falla de Mohr que describe detalladamente la tendencia que una falla posee para la reactivación. Las fallas con mayor probabilidad a la reactivación, son las que están óptimamente orientadas con respecto al estado de esfuerzos in-situ, mientras, las fallas que no lo están, no tendrán posibilidad de ser reactivadas<sup>25</sup>.

La identificación de las fallas propensas a reactivarse es de suma importancia al momento de la planeación del desarrollo de un campo de hidrocarburos, con el fin de identificar el riesgo geológico presente en las distintas operaciones ejecutadas en el campo.

---

<sup>23</sup> BARTON, Colleen; ZOBACK, Mark y MOOS, Daniel. Fluid Flow along Potentially Active Faults in Crystalline Rock. *Geology*. 1995, Vol. 23, No. 8, p. 683-686.

<sup>24</sup> SOLTANZADEH, Hamidreza. Geomechanical Analysis of Caprock Integrity. Saskatoon, 2009, 242 p. Thesis (Doctorate of Philosophy). University of Saskatchewan. Department of Civil and Geological Engineering.

<sup>25</sup> NACHT, Pedro, et al. Investigation of Geological Fault Reactivation and Opening. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*. 2010. p. 8687-8697.

**1.6.1 Mecanismos de Reactivación de Fallas.** Los mecanismos de reactivación de fallas son los factores que encaminan al yacimiento a las condiciones aptas para que ocurra la reactivación de fallas. Estos mecanismos son el aumento de la presión de poro, el cambio en los esfuerzos in-situ y la compactación.

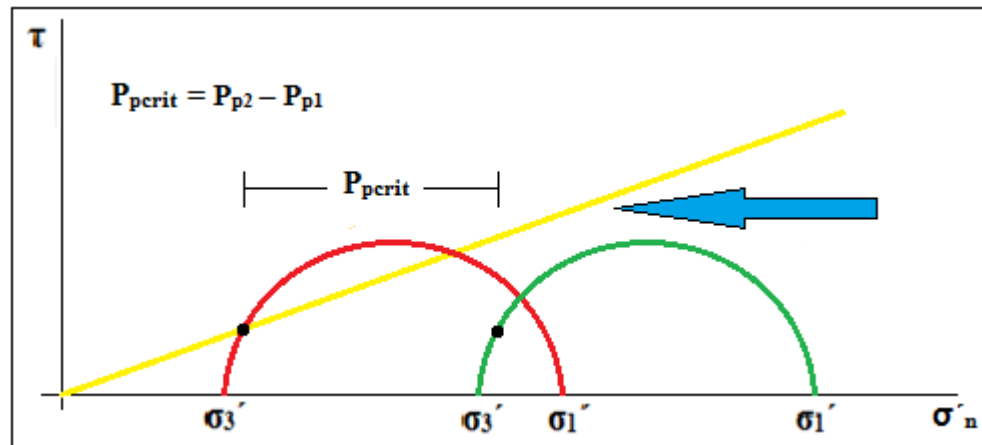
**1.6.1.1 Aumento de la Presión de Poro.** El aumento de la presión de poro dentro del yacimiento genera una redistribución de la presión de poro en la vecindad o en el interior de la falla, causando una disminución uniforme en los esfuerzos efectivos principales y por ende, en el esfuerzo normal efectivo de la falla. Esto podría conducir a la reactivación de la falla si su orientación es óptima, o en el peor de los casos, si la falla se comporta como sello podría ser críticamente forzada y pasaría a ser hidráulicamente activa permitiendo la fuga de fluidos. Los procesos en los cuales podría ocurrir tal escenario son durante la perforación de un pozo, la inyección de fluidos al yacimiento y el almacenamiento o la disposición final de gases de efecto invernadero o de desechos tóxicos (pozos disposal)<sup>26</sup>.

La figura 9, muestra el círculo de Mohr verde que representa el estado de esfuerzos efectivos principal presente en la zona antes de que aumente la presión de poro. El punto sobre el círculo verde señala el esfuerzo normal efectivo y el esfuerzo de cizalla actuando en el plano de falla. El círculo de Mohr rojo indica el estado de esfuerzos efectivos principal después de que hubo un incremento crítico en la presión de poro. En tal caso la falla se encuentra óptimamente orientada y sería reactivada, además, estaría críticamente forzada y existiría una fuga de fluidos.

---

<sup>26</sup> YAWEI, ChunMing et al. Evaluation of Fault Sealing Ability and Prediction of Fault Critical Reactivation Pressure in Water Flooding Reservoir. *Society of Petroleum Engineers*. 2014. 9 p.

**Figura 9.** Reactivación de fallas por aumento de la presión de poro.



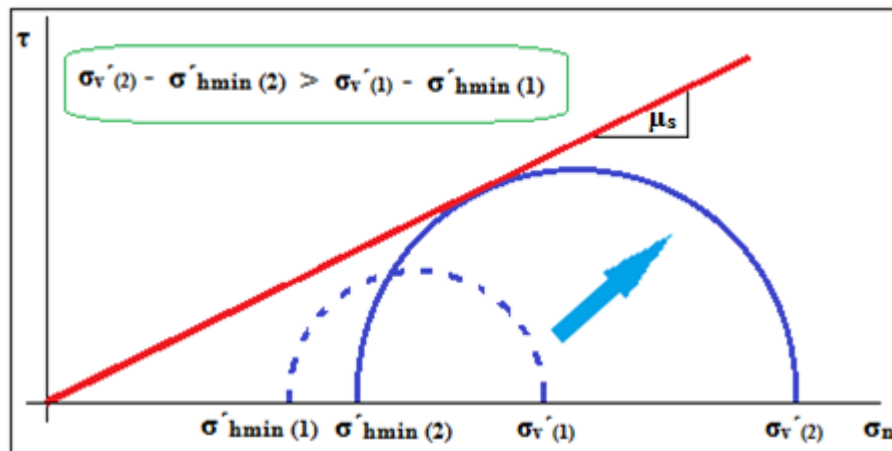
**Fuente:** tomada de FERNANDEZ, Fermín y CASTILLO, David. Assessing Stability of Reservoir Bounding Faults While Drilling. *Society of Petroleum Engineers*. 2010. 10 p.

**1.6.1.2 Cambio en los Esfuerzos in-situ.** El cambio de magnitud de los esfuerzos in-situ se asocia principalmente a la depleción del yacimiento como consecuencia de la producción. Los esfuerzos horizontales se ven afectados por el cambio de la presión de poro y los efectos poroelásticos, mientras, el esfuerzo de sobrecarga solo se ve afectado por el cambio en la presión de poro. Durante la inyección, las fallas dentro del yacimiento tienden a reactivarse por la disminución de los esfuerzos efectivos principales, contradictoriamente, durante la producción, aunque los esfuerzos efectivos principales aumenten, la reactivación de fallas dentro del yacimiento se presentará por el aumento de la diferencia de los esfuerzos efectivos principales en un régimen normal (figura 10). Todas las fallas normales presentes en el yacimiento que cuenten con una orientación óptima para el deslizamiento podrían reactivarse dependiendo del grado de depleción. Las que no se encuentren óptimamente orientadas permanecerán estables<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> OZAN, C.; BRUDY, M. y VAN DER ZEE, W. Fault Reactivation due to Fluid Production and Injection in Compacting Reservoirs. *American Rock Mechanics Association*. 2011. 7 p.

La teoría poroelástica es usada para predecir la magnitud del cambio de los esfuerzos horizontales con respecto a los cambios en la presión de poro dentro del yacimiento. En esta teoría el yacimiento se considera un medio elástico, poroso e isotrópico de extensión infinita. Un yacimiento es proclive a comportarse de forma elástica cuando está sobreconsolidado, bien cementado, y la disminución de la presión de poro ocurre de forma lenta. En los yacimientos elásticos el cambio de los esfuerzos horizontales con la reducción de la presión de poro exhibe una tendencia lineal, siendo así, una variación uniforme<sup>28</sup>. En el capítulo 3 de esta tesis se profundizará más al respecto.

**Figura 10.** Reactivación de fallas por el cambio en los esfuerzos in-situ.



**Fuente:** tomada de NACHT, P. K. et al. Investigation of geological Fault Reactivation and opening. *Mecánica Computacional*. 2012. p. 8687-8697.

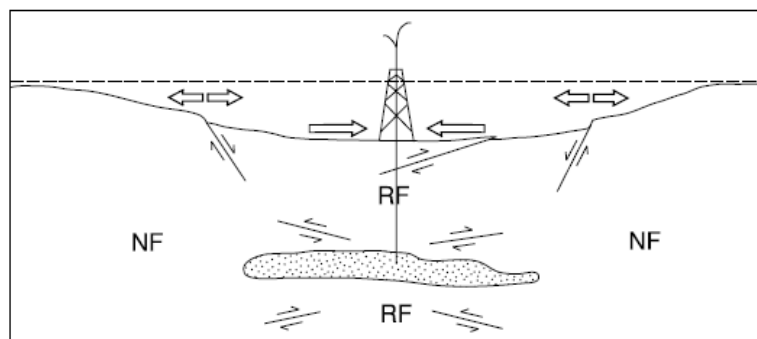
La figura 10 muestra el cambio en el esfuerzo horizontal mínimo con respecto al cambio de la presión de poro. El círculo de Mohr discontinuo, indica el estado de esfuerzos efectivos antes de la depleción del yacimiento. Durante la producción el

<sup>28</sup> GOULTY, N. R. Reservoir Stress Path during Depletion of Norwegian Chalk Oilfields. *Petroleum Geoscience*. 2003. p. 233-241.

esfuerzo horizontal mínimo varía a un ritmo desigual que el esfuerzo de sobrecarga, aumentando el diferencial de esfuerzos a tal punto que podría originar una reactivación de fallas óptimamente orientadas.

**1.6.1.3 Compactación.** La compactación en un yacimiento causa reactivación de fallas en los alrededores y en la vecindad del yacimiento. La reactivación se lleva a cabo por la superposición de los esfuerzos originados por la depleción del yacimiento con los esfuerzos preexistentes antes de la depleción. Si la parte superior e inferior del yacimiento se encuentra sometida a esfuerzos compresivos, es probable que las fallas inversas de estas zonas se reactiven, por causa de un aumento de los esfuerzos compresivos luego de la compactación del yacimiento. Por otro lado, si en estas zonas existen esfuerzos extensionales no se esperaría la reactivación de dichos planos, dado que el cambio de los esfuerzos en estas zonas debido a la compactación, actúa en dirección opuesta. Así mismo, hay un alto potencial de reactivación de fallas normales ubicadas en los lados de la parte superior del yacimiento compactado (figura 11)<sup>29</sup>.

**Figura 11.** Reactivación de fallas por compactación.



**Fuente:** Tomada de National Research Council. *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2012. 263 p. ISBN 978-0-309-25367-3.

<sup>29</sup> DUNAYEVSKY, V.; MYERS, M. y BENNETT, M. Reservoir Pressure Depletion Induced Exterior Fault Activation. *American Rock Mechanics Association*. 2010. 6 p.

Investigaciones de eventos sísmicos en numerosos campos de petróleo y gas alrededor del mundo, revelan que la depleción de un yacimiento produce un cambio en los esfuerzos de las rocas circundantes que puede desencadenar el deslizamiento de las fallas fuera del yacimiento. Estos cambios en los esfuerzos externos al yacimiento no suelen ser de gran magnitud, como lo demostraron Zoback and Zinke, 2002 en el campo Valhall en el Mar del Norte, donde encontraron que el incremento de los esfuerzos compresivos horizontales encima del yacimiento debido a la producción, representa el 1% del cambio de los esfuerzos horizontales que ocurre dentro del yacimiento<sup>30</sup>.

**1.6.2 Problemas Asociados a la Reactivación de Fallas.** El fenómeno de reactivación de fallas genera diferentes afectaciones al yacimiento, los pozos y en casos especiales a las facilidades de superficie o al medio ambiente. Los problemas asociados a este hecho van desde la cizalladura del casing, hasta la fuga de fluidos del yacimiento e inducción de sismicidad.

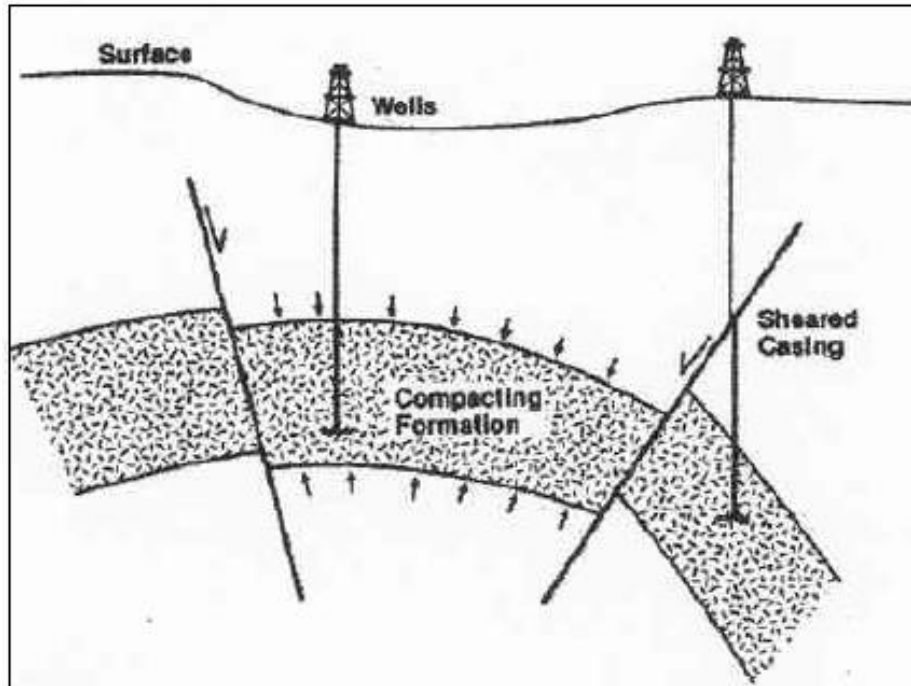
**1.6.2.1 Cizalladura del Casing.** La cizalladura del casing es la deformación o ruptura que sufre éste debido a la reactivación de fallas inducida por la compactación y subsidencia de un yacimiento depletado. Las ubicaciones con mayor potencial de cizalladura de casing, son los flancos y las capas suprayacentes al yacimiento (figura 12). Lo que se ajusta con el cambio de esfuerzos alrededor del yacimiento debido a la compactación. Existe una gran correlación entre la ubicación de eventos sísmicos y las zonas donde hay cizalladura de casing, lo que confirma que la reactivación de fallas es la principal causa de este fenómeno<sup>31</sup>.

---

<sup>30</sup> ZOBACK, Mark y ZINKE, Jens. Production-Induced Normal Faulting in the Valhall and Ekofisk Oil Fields. *Pure & Applied Geophysics*. 2002. p. 403-420.

<sup>31</sup> FJAER, E. et al. Petroleum Related Rock Mechanics. 2 ed. Amsterdam: Elsevier, 2008. 483 p. ISBN 978-0-444-50260-5.

**Figura 12.** Cizalladura del Casing en el flanco de un yacimiento.



**Fuente:** Tomada de BRUNO, M. Subsidence-Induced Well Failure. *Society of Petroleum Engineers*. 1992. 8 p.

Numerosos pozos afectados por este hecho se tienen que abandonar, debido a que el casing no mantiene la presión del pozo y obstaculiza los trabajos de Workover. Esto representa pérdidas económicas considerables para el proyecto. Por esta razón, es relevante un análisis detallado que pueda minimizar el riesgo de cizalladura de casing durante la depleción del yacimiento. Una de las soluciones es reducir el diámetro en lo posible del casing o realizar un ensanchamiento en las zonas probables a la reactivación, para incrementar el espacio anular entre el hueco abierto y el casing, cementándolo con una lechada más dúctil. Otra es diseñar una trayectoria segura evadiendo las zonas con alto potencial de reactivación de fallas y por último, evitando el fenómeno de reactivación de fallas<sup>32</sup>.

<sup>32</sup> DUSSEAULT, Maurice. BRUNO, Michael y BARRERA, John. Casing Shear: Causes, Cases, Cures. *Society of Petroleum Engineers*. 2001. 10 p.

**1.6.2.2 Fuga de Fluidos del Yacimiento.** La evaluación del potencial de reactivación de fallas es un factor clave en un yacimiento limitado o compartimentalizado por fallas con el objetivo de minimizar el riesgo de fugas de fluido. Wiprut y Zoback aplicaron la hipótesis que los hidrocarburos flotantes pueden incrementar la presión de poro y desencadenar la reactivación de fallas<sup>33</sup>.

A medida que los hidrocarburos se acumulan por la presencia de una falla sello límite en un yacimiento, la presión de poro en la vecindad de la falla incrementa dado que el gradiente de presión de poro de la columna de hidrocarburos es considerablemente menor que el gradiente hidrostático por las bajas densidades de los hidrocarburos, como la altura de hidrocarburos va aumentando, en algún punto la presión de poro de los hidrocarburos flotantes será la suficiente para inducir el deslizamiento de la falla y con este la fuga de fluidos del yacimiento (figura 13a). Este mecanismo dinámico causa que la falla funcione como una válvula, donde una vez ocurre la fuga de fluidos, la presión de poro de los hidrocarburos flotantes disminuye y la falla recupera su estado de sello mientras la columna de hidrocarburos alcanza la altura que le permite llegar a una presión de poro crítica que active hidráulicamente a la falla de nuevo<sup>34</sup>.

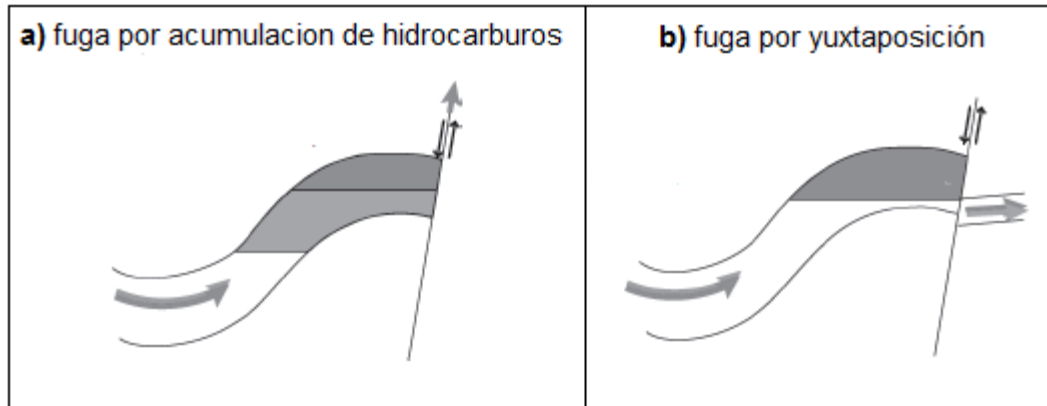
Cuando se reactiva una falla que estaba sellada por la yuxtaposición de una capa permeable (arena) con una impermeable (lutita). Puede crearse un conducto por el cual el fluido migra a otras zonas (Figura 13b).

---

<sup>33</sup> WIPRUT, D. y ZOBACK, M. Fault Reactivation and Fluid Flow along a Previously Dormant Normal Fault in the Northern North Sea. *Geology*. 2000, Vol. 28, No. 7, p. 595-598.

<sup>34</sup> WIPRUT, D. y ZOBACK, M. Fault Reactivation, Leakage Potential and Hydrocarbon Column Heights in the Northern North Sea. *Elsevier Science*. 2002, p. 203-219.

**Figura 13.** Fuga de fluidos por reactivación de fallas.



**Fuente:** Tomada de ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. New York: Cambridge University Press, 2007. 445 p. ISBN 978-0-521-77069-9.

La fuga de fluidos puede representar problemas serios durante el desarrollo de un campo. Por un lado la disminución de la columna de hidrocarburos que se traduce en la pérdida de reservas probadas del campo. Por otro, puede ocasionar daños al medio ambiente en el caso en que los hidrocarburos que se fuguen, migren a la superficie por una red de conductos, originando contaminación de acuíferos y daños ambientales de gran magnitud<sup>35</sup>.

**1.6.2.3 Sismicidad Inducida.** La sismicidad inducida por la reactivación de fallas se debe a los diferentes procesos ligados con el desarrollo de un campo, que alteran la presión de poro y el estado de esfuerzos. La energía liberada por la reactivación de fallas se transmite por medio de la corteza terrestre en forma de ondas sísmicas. Estas se miden de forma cuantitativa por la energía que libera, llamada magnitud y de forma cualitativa por los daños causados, llamada intensidad<sup>36</sup>.

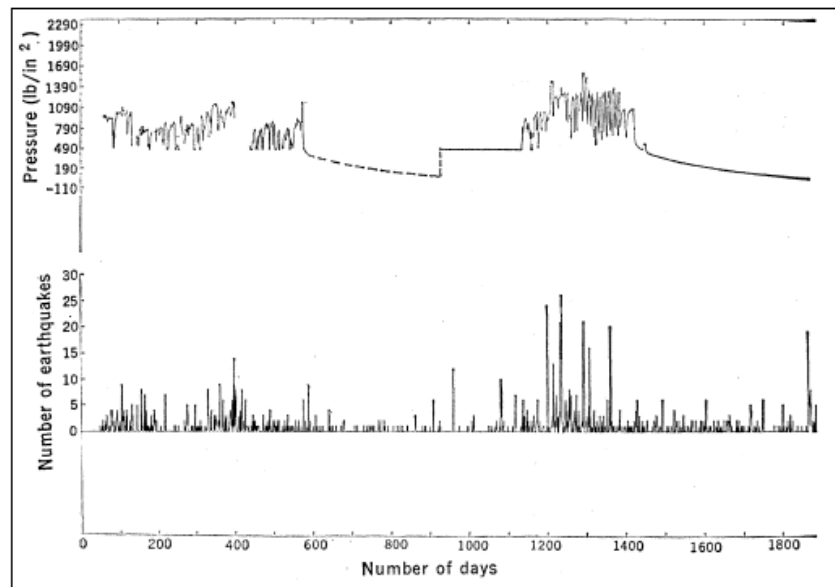
<sup>35</sup> AROGUN, Olubunmi y FOKKER, Peter. Geomechanical Assessment of Fault Slip and Top Seal Integrity for a Deepwater Turbidite Field Development. *Society of Petroleum Engineers*. 2015. 8 p.

<sup>36</sup> MEHRAN, S. y AMINZADEH, F. Effects of the Earth Characteristics on Induced Seismicity Potential. *Society of Petroleum Engineers*. 2016. 7 p.

La mayoría de estos sismos inducidos por las actividades de exploración y producción tienen una magnitud menor que 2, por ende se catalogan como microsismos y son imperceptibles por las personas, aunque en casos especiales, se han registrados sismos de magnitudes 6.5 y 4.9 durante la producción de hidrocarburos y la inyección de fluidos respectivamente.

Normalmente la sismicidad inducida por la reactivación de fallas no suele representar peligro, más sin embargo, si la falla se encuentra en equilibrio friccional, es decir, que los esfuerzos que actúan en ella están cercanos a la resistencia friccional de la falla o si hay una perturbación de presión de poro significativa, se generaría un sismo de una magnitud considerable<sup>37</sup>.

**Figura 14.** Sismicidad inducida por reactivación de fallas.



**Fuente:** Tomada de HEALY, J., et al, The Denver Earthquakes: Disposal of Waste fluids by Injection a Deep Well has Triggered Earthquakes Never Denver, Colorado. *Science*. 1969. Vol. 161, No. 3848. p. 1301-1310.

<sup>37</sup> GALIBIN, A.; GRIGORYAN, S. y MUKHAMEDIEV, A. Model of Induced Seismicity Caused By Water Injection. *Society of Petroleum Engineers*. 1998. 8 p.

Diferenciar entre un sismo natural y uno inducido es una cuestión difícil, de todas formas teniendo en cuenta la ubicación, el tiempo y el historial sísmico se puede tener una idea de la causa del sismo. La existencia de correlaciones en varias regiones del mundo entre el número de eventos sísmicos y las actividades de inyección y producción de fluidos, como la encontrada en el campo Rangely en Colorado (figura 14). Demuestran que los eventos sísmicos son inducidos por las actividades anteriormente mencionadas y no por causas naturales<sup>38</sup>.

---

<sup>38</sup> PETER M. Mechanisms of Reservoir Induced Seismicity. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2000. 6 p.

## 2 PARÁMETROS Y MODELOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS

### 2.1 PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS

Los parámetros geomecánicos de reactivación de falla son utilizados en los modelos para evaluar el potencial de tendencia a la reactivación. Estos dan una idea clara de que tan estable o inestable se encuentra la falla en estudio.

**2.1.1 Función de Falla de Coulomb (CFF).** La función de falla de Coulomb es el parámetro más utilizado por su simplicidad en la interpretación de su resultado. Este depende del esfuerzo de cizalla presente en la falla y de la resistencia friccional que la falla posee. Está representado matemáticamente por la ecuación (9).

$$CFF = \tau - \mu_s \sigma'_n \quad \text{Ecuación (9)}$$

Si el valor de la función de falla de Coulomb es negativa, la falla es estable dado que el valor del esfuerzo de cizalla debido al estado de esfuerzos de la zona es menor que la resistencia friccional de la falla. Si el valor de la función de falla de Coulomb es mayor o igual a cero, la falla es inestable ya que el valor del esfuerzo de cizalla alcanza o supera a la resistencia friccional de la falla<sup>39</sup>. Para procesos de inyección, la función de falla de Coulomb suele tender hacia cero para las fallas estables, dado a que la magnitud del esfuerzo de cizalla en el plano de la falla permanece constante, mientras, la resistencia friccional de la falla disminuye por la disminución que sufre la magnitud del esfuerzo normal efectivo de la falla.

---

<sup>39</sup> KING, Geoffrey; STEIN, Ross y LIN, Jian. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *The Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. 46 p.

**2.1.2 Tendencia al Deslizamiento ( $T_s$ ).** La tendencia al deslizamiento es la relación del esfuerzo de cizalla y el esfuerzo normal efectivo que actúan sobre el plano de falla. Cuantifica el potencial de reactivación de la falla en cualquier orientación con respecto al estado de esfuerzos y se representa matemáticamente por la ecuación (10).

$$T_s = \tau / \sigma'_n \quad \text{Ecuación (10)}$$

Mientras, el valor de la tendencia al deslizamiento sea igual o superior al coeficiente de fricción de la falla esta será inestable y propensa a la reactivación. Para bajos valores de la tendencia al deslizamiento, inferiores al coeficiente de fricción, la falla estará estable y no hay riesgo de reactivación<sup>40</sup>.

**2.1.3 Tendencia a la Dilatación ( $T_D$ ).** La tendencia a la dilatación está controlada por el esfuerzo normal efectivo presente en el plano de falla. Indica el grado de dilatación de la falla dependiendo del valor del esfuerzo normal efectivo normalizado con respecto al diferencial de esfuerzo, como lo muestra la ecuación (11). Este parámetro varía en un rango de 0 a 1. Cuando su valor tiende a 0, la falla no está dilatada. Y cuando el valor tiende a 1, la falla posee una gran dilatación<sup>41</sup>.

$$T_D = (\sigma'_1 - \sigma'_n) / (\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad \text{Ecuación (11)}$$

---

<sup>40</sup> MORRIS, Alan; FERRILL, David y HENDERSON, Brent. Slip Tendency Analysis and Fault Reactivation. *Geology*. 1996, Vol. 24, no.3, p. 275-278.

<sup>41</sup> MEIXNER, Jorg, et al. Slip and Dilation Tendency Analysis: Implications for Geothermal Exploration in the Upper Rhine Graben. *Institut für Nukleare Entsorgung*. 2013. 5 p.

Tanto la tendencia al deslizamiento ( $T_s$ ) como la tendencia a la dilatación ( $T_D$ ) son parámetros geológicos que se complementan al momento de evaluar el potencial de reactivación de una falla.

**2.1.4 Presión de Poro Crítica ( $P_{p_{crit}}$ ).** La presión de poro crítica es el aumento de presión requerido para producir la reactivación de una falla. Esto se da por la disminución de los esfuerzos principales efectivos del estado de esfuerzos, debido al aumento de la presión de poro actual del yacimiento. Mientras, más baja sea esta presión de poro crítica, la falla corre más riesgo de reactivarse con cualquier aumento en la presión de poro. Este parámetro es fundamental para calcular la presión máxima de un proceso de inyección sin que exista la reactivación de las fallas. Se representa matemáticamente por la ecuación (12)<sup>42</sup>.

$$P_{crit} = \sigma'_n - \tau/\mu_s \quad \text{Ecuación (12)}$$

Debido a que en procesos de inyección el cambio de los esfuerzos poroelásticos es despreciable. Se considera que el diferencial de esfuerzos se mantiene constante durante la inyección. Lo que permite el uso de la ecuación (12).

## 2.2 MODELOS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS

Los modelos descritos en esta trabajo son modelos analíticos ampliamente usados en diferentes investigaciones para encontrar los esfuerzos en un plano de falla 3D, que combinados con los parámetros de reactivación arrojan soluciones razonables

---

<sup>42</sup> RUTQVIST, J. et al. Estimating Maximum Sustainable Injection Pressure During Geological Sequestration of CO<sub>2</sub> Using Coupled Fluid Flow and Geomechanical Fault Slip Analysis. Elsevier. 2006. 10 p.

de manera simple y eficiente para la evaluación del análisis del potencial de reactivación de fallas. Estos modelos actúan bajo principios físicos y conceptos teóricos fiables, donde su aplicación en campo ha demostrado buenos resultados.

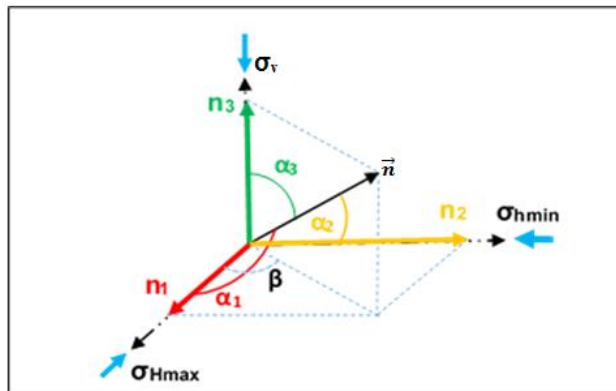
**2.2.1 Modelo de Jaeger and Cook.** El modelo de Jaeger and Cook se basa en el cálculo tensorial para determinar la magnitud del esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ) y normal efectivo ( $\sigma'_n$ ) que actúan sobre un plano de falla arbitrario<sup>43</sup>.

Empieza definiendo el vector unitario normal a un plano de falla arbitrario ( $\vec{n}$ ) que está compuesto por sus cosenos directores con respecto a los ejes del sistema de coordenadas, los cuales, coinciden con las direcciones de los esfuerzos principales in-situ (figura 15).

$$\vec{n} = (n_1, n_2, n_3) \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$\vec{n} = \cos \alpha_1 \hat{i} + \cos \alpha_2 \hat{j} + \cos \alpha_3 \hat{k} \quad \text{Ecuación (14)}$$

**Figura 15.** Cosenos directores del vector unitario normal al plano de falla.



<sup>43</sup> JAEGER, John; COOK, Neville y ZIMMERMAN, Robert. Fundamentals of Rock Mechanics. 4 ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. 469 p. ISBN 978-0-632-05759-7.

Siendo  $\beta$  el valor absoluto de la resta entre la dirección de buzamiento de la falla ( $\theta$ ) y el azimut de la dirección del esfuerzo horizontal máximo ( $\phi$ ). Ambos ángulos medidos desde el Norte geográfico en dirección de las manecillas del reloj. Mientras que,  $\alpha_3$  es el buzamiento del plano de falla. Los cosenos directores están dados por la tabla (4).

**Tabla 4.** Cosenos directores del vector unitario normal al plano de falla.

Cosenos directores	Régimen normal	Régimen inverso	Régimen rumbo-deslizante
$n_1$	$\cos \alpha_3$	$\sin \alpha_3 * \cos \beta$	$\sin \alpha_3 * \cos \beta$
$n_2$	$\sin \alpha_3 * \cos \beta$	$\sin \alpha_3 * \sin \beta$	$\cos \alpha_3$
$n_3$	$\sin \alpha_3 * \sin \beta$	$\cos \alpha_3$	$\sin \alpha_3 * \sin \beta$

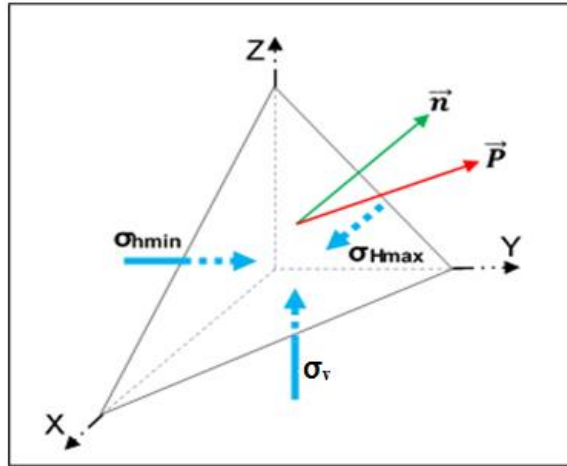
Definido el vector unitario normal al plano de falla ( $\vec{n}$ ), se procede a calcular el vector tracción ( $\vec{P}$ ), que representa el esfuerzo total sobre el plano de falla (figura 16).

$$\vec{P} = T \vec{n} = \begin{bmatrix} \sigma'_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma'_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma'_3 \end{bmatrix} [n_1 \quad n_2 \quad n_3] = \begin{bmatrix} \sigma'_1 n_1 \\ \sigma'_2 n_2 \\ \sigma'_3 n_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde  $T$  es el tensor de esfuerzos efectivos principales.

El esfuerzo normal efectivo ( $\sigma'_n$ ) sobre el plano de falla, se halla proyectando el vector de tracción ( $\vec{P}$ ) sobre el vector normal al plano ( $\vec{n}$ ). Matemáticamente se utiliza el producto punto.

**Figura 16.** Tetraedro de Cauchy.



**Fuente:** Tomada de CERVERA, Miguel. Resistencia de Materiales. Barcelona: CIMNE, 2015. 310 p. ISBN 978-84-944244-4-1.

$$\sigma'_n = \vec{P} \cdot \vec{n} = \begin{bmatrix} \sigma'_1 n_1 \\ \sigma'_2 n_2 \\ \sigma'_3 n_3 \end{bmatrix} \cdot [n_1 \quad n_2 \quad n_3] \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$\sigma'_n = \sigma'_1 n_1^2 + \sigma'_2 n_2^2 + \sigma'_3 n_3^2 \quad \text{Ecuación (17)}$$

Por medio de la ecuación (17) se obtiene la magnitud del vector normal efectivo presente en la falla. Aplicando el teorema de Pitágoras se puede calcular la magnitud del esfuerzo de cizalla ( $\tau$ ) sobre la falla.

$$\tau^2 = \|\vec{P}\|^2 - \sigma'_n{}^2 \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$\|\vec{P}\| = \sqrt{(\sigma'_1 n_1)^2 + (\sigma'_2 n_2)^2 + (\sigma'_3 n_3)^2} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Reemplazando la ecuación (19) en la ecuación (18).

$$\tau^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 n_1^2 n_2^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 n_2^2 n_3^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 n_3^2 n_1^2 \quad \text{Ecuación (20)}$$

La ecuación (20) da como resultado la magnitud del esfuerzo de cizalla que actúa sobre el plano de falla.

Conociendo los esfuerzos y las propiedades de fricción que actúan en la falla, es posible mediante criterios de fallas y parámetros geomecánicos de reactivación, determinar el potencial de reactivación de fallas.

**2.2.2 Modelo de Leclere.** El modelo de Leclere tiene en cuenta la inmersión del estado de esfuerzos principal con respecto a un sistema de coordenadas cartesiano, al igual, que las propiedades mecánicas de la falla como la cohesión y el coeficiente de fricción. Este modelo en comparación con el de Jaeger and Cook, utiliza su propio análisis de evaluación de reactivación de fallas, sin necesidad de conocer los esfuerzos sobre el plano de falla. A partir de sustituciones en el criterio de Mohr y una serie de reemplazos, se derivan ecuaciones que permiten determinar la relación de esfuerzos efectivos con riesgo de reactivación<sup>44</sup>.

Dado un plano de falla en un sistema de coordenadas geográficas (X, Y, Z) donde X indica el Norte, Y el este y Z abajo. Se pueden determinar los cosenos directores del vector unitario normal al plano de falla mediante.

$$n_x = \sin \delta_n * \cos \theta_n \quad \text{Ecuación (21)}$$

$$n_y = \sin \delta_n * \sin \theta_n \quad \text{Ecuación (22)}$$

---

<sup>44</sup> LECLERE, Henri y FABRI, Oliver. A New Three-dimensional Method of Fault Reactivation Analysis. Elsevier. 2012. 10 p.

$$n_z = \cos \delta_n \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde,  $\delta_n$  es el buzamiento del plano de falla, y  $\theta_n$  el ángulo medido en sentido horario entre el eje X y la dirección de buzamiento del plano de falla.

Ahora, se calculan las componentes de los esfuerzos principales efectivos con respecto al sistema de coordenadas (X, Y, Z).

$$X_i = \cos \delta_i * \cos \theta_i \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$Y_i = \cos \delta_i * \sin \theta_i \quad \text{Ecuación (25)}$$

$$Z_i = \sin \delta_i \quad \text{Ecuación (26)}$$

Siendo,  $\delta_i$  y  $\theta_i$  los ángulos de inmersión y azimut de cada esfuerzo principal efectivo, respectivamente. Este último, medido en sentido horario en relación con el eje X. Donde,  $i = 1, 2$  y  $3$ , equivalente a cada esfuerzo principal efectivo.

Determinando las componentes de los esfuerzos principales efectivos ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) y las del vector unitario normal al plano de falla ( $n_x, n_y, n_z$ ) referentes al sistema de coordenadas geográfico (X, Y, Z). Es posible definir los cosenos directores ( $l, m, n$ ) del vector unitario normal con respecto a cada esfuerzo principal efectivo.

$$l = \frac{x_1 \cdot n_x + y_1 \cdot n_y + z_1 \cdot n_z}{\sqrt{(x_1^2 + y_1^2 + z_1^2)(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}} \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$m = \frac{x_2 \cdot n_x + y_2 \cdot n_y + z_2 \cdot n_z}{\sqrt{(x_2^2 + y_2^2 + z_2^2)(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}} \quad \text{Ecuación (28)}$$

$$n = \frac{x_3 \cdot n_x + y_3 \cdot n_y + z_3 \cdot n_z}{\sqrt{(x_3^2 + y_3^2 + z_3^2)(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}} \quad \text{Ecuación (29)}$$

Utilizando la relación de forma de esfuerzos ( $\phi$ ) y la relación de esfuerzos efectivos ( $Q$ ). Se pueden dejar las ecuaciones (17) y (20) del modelo de Jaeger, en función del esfuerzo efectivo principal máximo ( $\sigma'_1$ ).

$$\phi = \frac{(\sigma'_2 - \sigma'_3)}{(\sigma'_1 - \sigma'_3)} \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$Q = \sigma'_3 / \sigma'_1 \quad \text{Ecuación (31)}$$

Despejando  $\sigma'_3$  de la ecuación (31).

$$\sigma'_3 = Q * \sigma'_1 \quad \text{Ecuación (32)}$$

Despejando  $\sigma'_2$  de la ecuación (30) y reemplazando la ecuación (32) en la ecuación (30) después de haber despejado  $\sigma'_2$ , tenemos:

$$\sigma'_2 = \sigma'_1[\phi(1 - Q) + Q] \quad \text{Ecuación (33)}$$

Reemplazando las ecuaciones (32) y (33) en las ecuaciones (17) y (20).

$$\sigma_n = \sigma'_1(l^2 + (\phi(1 - Q) + Q)m^2 + Qn^2) \quad \text{Ecuación (34)}$$

$$\tau^2 = \sigma'_1{}^2[(1 - (\phi(1 - Q) + Q))^2 l^2 m^2 + (\phi(1 - Q))^2 m^2 n^2 + (Q - 1)^2 l^2 n^2] \quad \text{Ecuación (35)}$$

La reactivación de un plano de falla preexistente con cohesión debe satisfacer el criterio de Mohr Coulomb. Que puede ser escrito de la siguiente forma:

$$\mu_s = (\tau - C_0) / \sigma'_n \quad \text{Ecuación (36)}$$

Sustituyendo las ecuaciones (34) y (35) en la ecuación (36) la expresión resultante es:

$$\mu_s = \frac{\sqrt{(1 - (\phi(1 - Q) + Q))^2 l^2 m^2 + (\phi(1 - Q))^2 m^2 n^2 + (Q - 1)^2 l^2 n^2} - \frac{C_0}{\sigma'_1}}{l^2 + (\phi(1 - Q) + Q)m^2 + Qn^2}$$

$$\text{Ecuación (37)}$$

Que puede reescribirse de la siguiente manera.

$$\mu_s = \frac{\sqrt{Q^2 C - 2QC + C} - \frac{C_0}{\sigma'_1}}{Q \cdot A + B} \quad \text{Ecuación (38)}$$

Donde:

$$A = m^2 + n^2 - \phi m^2 \quad \text{Ecuación (39)}$$

$$B = l^2 + \phi m^2 \quad \text{Ecuación (40)}$$

$$C = (1 - \phi)^2 l^2 m^2 + \phi^2 n^2 m^2 + l^2 n^2 \quad \text{Ecuación (41)}$$

Dejando a  $Q$  en función de  $l$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $\phi$ ,  $C_0/\sigma'_1$  y  $\mu_s$ , de la expresión (38). Da origen a una ecuación polinómica de segundo grado.

$$Q^2(A^2\mu_s^2 - C) + Q(2AD\mu_s + 2C) + D^2 - C = 0 \quad \text{Ecuación (42)}$$

Donde:

$$D = B \cdot \mu_s + \frac{C_0}{\sigma'_1} \quad \text{Ecuación (43)}$$

La cual tiene como solución:

$$\Delta = (2A \cdot D \cdot \mu_s + 2C)^2 - 4(A^2\mu_s^2 - C)(D^2 - C) \quad \text{Ecuación (44)}$$

$$Q = \frac{-(2A \cdot D \cdot \mu_s + 2C) \pm \sqrt{\Delta}}{2A^2\mu_s^2 - 2C} \quad \text{Ecuación (45)}$$

En donde,

$$\{Q \in \mathbb{R}; Q \leq 1\}$$

$$\{\mu_s \in \mathbb{R}; 0 \leq \mu_s\}$$

De acuerdo con lo anterior, el dominio para los valores de  $Q$ , esta sobre  $[-\infty, Q_{max}]$  donde,  $Q_{max} = 1$  cuando  $\sigma'_1 = \sigma'_3$ .

Obtenido el valor de  $Q$ , se halla el valor de la relación de esfuerzos efectivos óptimo ( $Q_{opt}$ ), el cual, depende del ángulo entre el eje del esfuerzo principal máximo y la orientación óptima del plano de falla ( $\theta_r$ ).

$$Q_{opt} = \frac{1 - \mu_s \cdot \tan(\theta_r) - \frac{C_o}{\sigma'_1 \cdot \sin(\theta_r) \cdot \cos(\theta_r)}}{1 + \mu_s \cdot \cot(\theta_r)} \quad \text{Ecuación (46)}$$

La orientación óptima del plano de falla depende únicamente del coeficiente de fricción estático, ecuación (47). En las condiciones óptimas, es decir, cuando  $Q$  tiene el mismo valor de  $Q_{opt}$ . La falla se encuentra óptimamente orientada en el círculo de Mohr, o sea, está en el punto tangente a la envolvente de falla.

$$\theta_r = \frac{1}{2} \tan\left(\frac{1}{\mu_s}\right) \quad \text{Ecuación (47)}$$

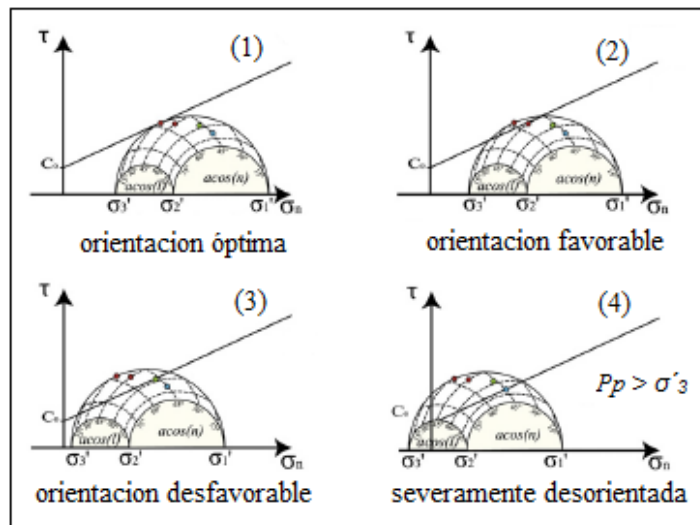
Dependiendo del valor de la relación de esfuerzos ( $Q$ ), con respecto al valor óptimo de esta  $Q_{opt}$ . Es posible determinar si una falla se encuentra con una orientación favorable, desfavorable o severamente desorientada dentro del círculo de Mohr en relación con el estado de esfuerzos.

De lo anterior, Leclere especifico cuatro orientaciones que una falla puede tener dentro del círculo de Mohr (figura 17).

- Cuando  $Q = Q_{opt}$ , la falla se encuentra óptimamente orientada.
- Cuando  $1/2 Q_{opt} < Q < Q_{opt}$ , la falla se encuentra favorablemente orientada.
- Cuando  $0 < Q < 2/3 Q_{opt}$ , la falla se encuentra desfavorablemente orientada.
- Cuando  $0 > Q$ , la falla se encuentra severamente desorientada.

Las fallas severamente desorientadas para que puedan ser reactivadas, el esfuerzo principal mínimo ( $\sigma'_3$ ) debe ser menor que la presión de poro. Esto puede ocurrir en zonas del subsuelo con presiones anormales. Por otro lado, si el estado de esfuerzos regional, es tal, que en un diagrama Mohr-Coulomb la envolvente de falla intersecta en dos puntos el círculo de Mohr, las fallas favorablemente orientadas tienen mayor riesgo a la reactivación.

**Figura 17.** Orientaciones de las fallas según su relación de esfuerzos efectivos.



**Fuente:** Tomada de LECLERE, Henri y FABBRI, Oliver. A New Three-dimensional Method of Fault Reactivation Analysis. Elsevier. 2012. 10 p.

## 2.3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS

En la siguiente sección se realiza un análisis comparativo de los dos modelos descritos. Se comparan las variables de entrada, la forma en que se procesa los datos de entrada y sus métodos de análisis para la determinación del potencial de reactivación de una falla. De esta forma se obtendrá información relevante para la selección del modelo, el cual, se acoplara a las condiciones de un yacimiento depletado.

**2.3.1 Variables de Entrada.** Las variables de entrada son los datos que utiliza el modelo para procesarlos y emitir resultados que son estudiados por parámetros del mismo modelo o por los parámetros geomecánicos explicados anteriormente.

Dentro de las variables más importantes se encuentra el tensor de esfuerzos in-situ. Para esto, el modelo de Jaeger requiere de la magnitud de cada esfuerzo y el azimut del esfuerzo horizontal máximo. Además, contempla un tensor de esfuerzos andersoniano, es decir, que el eje de uno de sus esfuerzos principales continuamente es vertical y todos sus ejes son ortogonales entre ellos. Por otro lado, para el modelo de Leclere solo se requiere la magnitud del esfuerzo principal máximo, en lugar de las magnitudes de los otros dos esfuerzos. Utiliza las magnitudes relativas dadas por el concepto de relación de esfuerzos efectivos ( $Q$ ), y la relación de forma de esfuerzos ( $\phi$ ) que se pueden determinar con datos de mecanismos focales o inversión sísmica. Debido a que el modelo de Leclere tiene en cuenta tensores de esfuerzos no andersonianos, y en caso de haberla, la inmersión del tensor de esfuerzos. La dirección de cada esfuerzo debe estar dada por el azimut y el grado de inmersión de cada uno de los ejes del tensor de esfuerzos principal.

Otra de las variables relevantes para ambos modelos, es la orientación del plano de falla en el subsuelo, la cual, se caracteriza por el buzamiento y la dirección de buzamiento de la falla. Donde el buzamiento representa el grado de inmersión y la dirección de buzamiento la orientación con respecto al norte. Con estos datos se calculan los cosenos directores de la falla con respecto a los ejes de los esfuerzos principales. La ubicación de un punto que represente los esfuerzos en el plano de falla dentro de la zona del círculo de Mohr en 3D, dependerá del valor que tomen estas variables y del régimen de esfuerzos al cual se encuentre sometida la falla.

Con respecto a las propiedades mecánicas de la falla, como cohesión y el coeficiente de fricción estático. El modelo de Jaeger hace uso únicamente del coeficiente de fricción estático, despreciando la cohesión. Así mismo, no considera ningún tipo de cementación o diagénesis del gauge de falla que pueda ejercer un esfuerzo adicional en las condiciones mecánicas de la falla. Para el modelo de Leclere estas dos propiedades son tenidas en cuenta, lo que quiere decir, que contempla un tipo de restricción adicional al deslizamiento aportado por la cohesión. En ambos modelos estas propiedades definen las condiciones límites de reactivación por el criterio de Coulomb, por consiguiente, son de importancia para evaluar la estabilidad de la falla.

La presión de poro es la variable de entrada más relevante como propiedad del yacimiento. También se puede llegar a requerir la profundidad del yacimiento en el caso en que la magnitud de los esfuerzos esté disponible en forma de gradiente, como en la mayoría de los casos. La presión de poro es la encargada de representar el rol que tienen los fluidos contenidos en los espacios porosos de la roca, por ende, los dos modelos hacen uso del concepto de esfuerzo efectivo.

**2.3.2 Procesamiento de la Información.** A continuación se compara la forma en que cada modelo trata las variables de entrada para obtener los resultados que posteriormente son analizados.

Los modelos presentados tienen similitudes en el uso de los esfuerzos efectivos y del criterio de falla de Mohr-Coulomb. Sin embargo, al momento de calcular los cosenos directores del vector unitario normal al plano de falla con relación a los ejes de los esfuerzos principales, presentan algunas diferencias. El modelo de Leclere utiliza el producto punto entre las componentes del vector unitario normal al plano de falla y las componentes de cada esfuerzo principal con respecto al sistema de coordenadas geográfico para calcular los cosenos directores, mientras que, el modelo de Jaeger los establece directamente sobre los ejes del tensor de esfuerzos principales.

Otra diferencia notable, radica en que el modelo de Leclere no calcula la magnitud de los esfuerzos que actúan sobre un plano de falla directamente como lo hace el modelo de Jaeger, sino que, utiliza las ecuaciones de las magnitudes relativas para sustituirlas en las expresiones de los esfuerzos normal efectivo y de cizalla, obtenidas por el modelo de Jaeger, con el fin de reemplazarlas en el criterio de falla de Coulomb, en función del esfuerzo principal máximo, la cohesión y el coeficiente de fricción estático. De esta manera se obtiene la relación de esfuerzos efectivos que clasifica la falla en una de las orientaciones propuestas dentro del modelo. Por el contrario, el modelo de Jaeger por medio del mismo criterio de falla, con las magnitudes de los esfuerzos que actúan sobre la falla y el coeficiente de fricción evalúa la estabilidad de la falla.

La tabla (5) permite contextualizar de manera general las diferencias de los dos modelos.

**Tabla 5.** Tabla comparativa del modelo de Jaeger con el modelo de Leclere

	<b>MODELO DE JAEGER</b>	<b>MODELO DE LECLERE</b>
<b>VARIABLES DE ENTRADA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Requiere la magnitud de los esfuerzos in-situ.</li> <li>✓ Azimut del esfuerzo horizontal máximo.</li> <li>✓ No requiere de la cohesión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Uso de las magnitudes relativas de los esfuerzos in-situ.</li> <li>✓ Azimut y grado de inmersión de cada eje del tensor de esfuerzos in-situ.</li> <li>✓ Cohesión.</li> <li>✓ Magnitud del esfuerzo principal máximo.</li> </ul>
<b>PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Calcula los cosenos directores del vector unitario normal al plano de falla directamente sobre los ejes del tensor de esfuerzos principal.</li> <li>✓ Los cosenos directores dependen del régimen de esfuerzos.</li> <li>✓ Calcula las magnitudes de los esfuerzos que actúan en el plano de falla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Calcula las componentes del vector unitario normal al plano de falla y de cada eje del tensor de esfuerzos, respecto a un sistema de coordenadas geográfico.</li> <li>✓ Determina los cosenos directores del vector unitario normal con respecto al tensor de esfuerzos con el producto punto.</li> <li>✓ Calcula la relación de esfuerzos efectivos.</li> </ul>
<b>SUPOSICIONES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ la dirección de deslizamiento es en dirección del esfuerzo de cizalla.</li> <li>✓ No se considera procesos de diagénesis en el material dentro de la falla.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ La cohesión es la de la roca intacta y no utiliza la cohesión presente en el plano de falla debido a procesos de cementación del material de la falla.</li> </ul>
<b>APLICABILIDAD</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Zonas donde se conocen la magnitud de los esfuerzos in-situ.</li> <li>✓ Cualquier tipo de régimen de esfuerzos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Zonas en donde se conocen las magnitudes relativas de esfuerzos.</li> <li>✓ Preferiblemente en zonas de régimen normal.</li> <li>✓ En lugares donde no existan tensores andersonianos.</li> </ul>

**2.3.3 Comparación de resultados.** Para la comparación de los resultados obtenidos por los modelos y el análisis que cada uno hace sobre estos resultados, se crean tres situaciones representadas por tres fallas con ciertas condiciones mecánicas. La falla 1, es una falla estable; la falla 2, va a ser reactivada; y la falla 3, esta críticamente forzada. Estas tres situaciones se consiguen asignando valores arbitrarios por el autor a las variables de entrada de cada modelo en una plantilla de Excel (figura 18), para posteriormente comparar los resultados obtenidos.

Los datos de entrada para cada situación son los mismos, excepto por el buzamiento y la dirección de buzamiento. Para el caso de las propiedades mecánicas de la falla, se considera una falla sin cohesión y se utiliza un coeficiente de fricción estático de 0.6 aludiendo a la ley de Byerlee. Las tres fallas se encuentran bajo un régimen de esfuerzos normal.

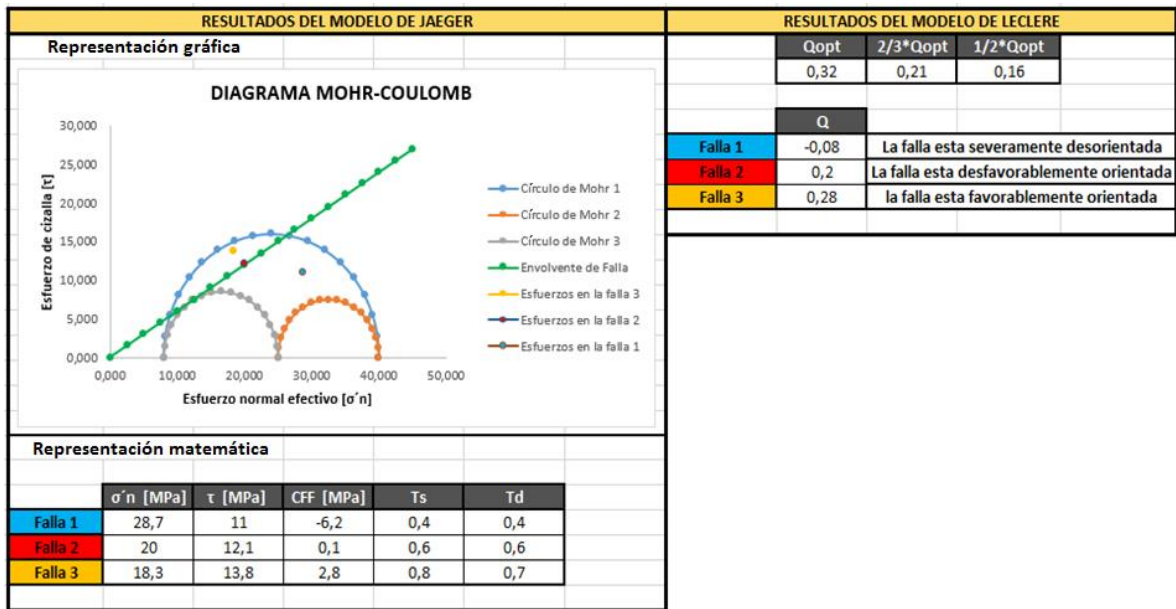
**Figura 18.** Datos de las variables de entrada de los modelos

VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO DE JAEGER				VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO DE LECLERE			
TENSOR DE ESFUERZOS				TENSOR DE ESFUERZOS			
ESFUERZO DE SOBRECARGA [ $\sigma_v$ ]	50	MPa		ESFUERZO PRINCIPAL MÁXIMO [ $\sigma_1$ ]	50	MPa	
ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO [ $\sigma_{Hmax}$ ]	35	MPa		ÁNGULO DE INMERSION DEL EJE $\sigma_1$ [ $\delta_1$ ]	90	°	
ESFUERZO HORIZONTAL MÍNIMO [ $\sigma_{Hmin}$ ]	18	MPa		ÁNGULO DE INMERSION DEL EJE $\sigma_2$ [ $\delta_2$ ]	0	°	
ESFUERZO PRINCIPAL MÁXIMO [ $\sigma_1$ ]	50	MPa		ÁNGULO DE INMERSION DEL EJE $\sigma_3$ [ $\delta_3$ ]	0	°	
ESFUERZO PRINCIPAL INTERMEDIO [ $\sigma_2$ ]	35	MPa		AZIMUT DEL EJE $\sigma_1$ [ $\theta_1$ ]	0	°	
ESFUERZO PRINCIPAL MÍNIMO [ $\sigma_3$ ]	18	MPa		AZIMUT DEL EJE $\sigma_2$ [ $\theta_2$ ]	0	°	
AZIMUT DEL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO [ $\phi$ ]	0	°		AZIMUT DEL EJE $\sigma_3$ [ $\theta_3$ ]	90	°	
ATRIBUTOS DE LA FALLA				RELACIÓN DE FORMA DE ESFUERZOS [ $\phi$ ]	0,531	adimensional	
BUZAMIENTO [ $\delta$ ]	Falla 1	60	°	ATRIBUTOS DE LA FALLA			
	Falla 2	65	°	BUZAMIENTO [ $\delta_n$ ]	Falla 1	60	°
	Falla 3	50	°		Falla 2	65	°
			Falla 3		50	°	
DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO [ $\theta$ ]	Falla 1	65	°	DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO [ $\theta_n$ ]	Falla 1	65	°
	Falla 2	48	°		Falla 2	48	°
	Falla 3	30	°		Falla 3	30	°
COEFICIENTE DE FRICCIÓN ESTÁTICO [ $\mu_s$ ]	0,6	adimensional		COEFICIENTE DE FRICCIÓN ESTÁTICO [ $\mu_s$ ]	0,6	adimensional	
PROPIEDADES DEL YACIMIENTO				COHESIÓN [ $C\sigma$ ]	0	MPa	
PRESIÓN DE PORO [ $P_p$ ]	10	MPa		PROPIEDADES DEL YACIMIENTO			
				PRESIÓN DE PORO [ $P_p$ ]	10	MPa	

Los resultados obtenidos con el modelo de Jaeger son las magnitudes de los esfuerzos normal efectivo y de cizalla sobre el plano de cada falla. Para determinar

la estabilidad de la falla estos resultados se analizan de manera gráfica mediante el diagrama de Mohr-Coulomb, y de manera numérica aplicando los parámetros geomecánicos de reactivación. En el modelo de Leclere se tiene como resultado la relación de esfuerzos efectivos de la falla en cada situación, el análisis de estos resultados se hace comparando la relación de esfuerzos efectivos calculada, con la relación de esfuerzos efectivos óptima (figura 19).

**Figura 19.** Resultados obtenidos por los dos modelos en cada situación



Analizando los resultados del modelo de Jaeger gráficamente, se evidencia que las fallas por debajo de la envolvente de falla se encuentran estables (falla 1). Por el contrario, las fallas que se encuentran por encima de la envolvente, están críticamente forzadas (falla 3) y las que se ubican sobre la envolvente son reactivadas (falla 2). Corroborando esta información se hallan los valores de los parámetros de reactivación, los cuales, están dentro de los rangos establecidos para cada situación descrita. Así, para valores negativos del criterio de función de falla;

las fallas serán estables (falla 1), para valores cercanos o iguales a cero; las fallas se reactivaran (falla 2) y para valores positivos; las fallas estarán críticamente forzadas (falla 3). En el caso de la tendencia al deslizamiento, valores inferiores al valor del coeficiente de fricción estático pertenecen a fallas estables y valores superiores indican fallas críticamente forzadas. Para valores iguales al coeficiente de fricción la falla se reactivará. También se observa que las fallas con valores cercanos a uno en la tendencia a la dilatación, son más probables a ser reactivadas debido a que poseen menor magnitud del esfuerzo normal efectivo.

El análisis para los resultados del modelo de Leclere se basa en el valor calculado de la relación de esfuerzos efectivos de la falla, el cual, cataloga la falla dentro de algún conjunto de orientaciones que indican la zona en que se localizan los esfuerzos de la falla dentro del círculo de Mohr, y que tan probable es de que esta se reactive (figura 17). De los resultados obtenidos se observa que la falla estable (falla 1) está en la zona de las fallas severamente desorientadas, esto se debe a que probablemente se reactive cuando la relación de esfuerzos efectivos es negativa, o sea, cuando la presión de poro excede la magnitud del esfuerzo principal mínimo. La falla reactivada (falla 2), se ubica dentro de la zona de fallas desfavorablemente orientadas. Aunque el modelo dice que la falla esta desfavorablemente orientada esta se reactiva, ya que el modelo no tiene en cuenta la posición del círculo de Mohr con relación a la envolvente de falla, sino solo, caracteriza la ubicación de la falla dentro del círculo de Mohr sin importar si esta se encuentra por debajo, por encima o sobre la envolvente de falla. La falla críticamente forzada (falla 3), está dentro del grupo de fallas favorablemente orientadas, esto se debe a que se encuentra más próxima a la circunferencia del círculo de Mohr principal, por ende, tiene mayor probabilidad de ser reactivada.

En conclusión, tanto las variables de entrada, como el procesamiento de la información y el análisis e interpretación de los resultados se dan de una forma más clara y precisa en el modelo de Jaeger, mientras que, en el modelo de Leclere con los resultados obtenidos no se consigue una evaluación completa de las condiciones mecánicas de la falla.

Cabe mencionar que existen otros modelos para evaluar el riesgo de reactivación de fallas en un yacimiento. Estos modelos suelen ser semianalíticos o numéricos que utilizan técnicas y métodos avanzados de cálculo, con el fin de considerar variables como la geometría del yacimiento diferente a las rectangulares, las propiedades mecánicas de la roca circundante, las dimensiones de la falla, el espaciamiento entre las fallas, el tipo de material entre el plano de falla, la cohesión en el plano de falla y el comportamiento del flujo de fluidos a través de las fallas. Arrojando respuestas con menor grado de incertidumbre. Las soluciones de estos modelos requieren del cálculo diferencial y el uso de métodos como el de elementos finitos, diferencias finitas o elementos discretos.

### **3 SELECCIÓN Y ACOPLAMIENTO DEL MODELO PARA EL ANÁLISIS DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN YACIMIENTOS DEPLETADOS**

En esta sección se elige un modelo de los que se analizaron anteriormente y se acopla a los procesos asociados con yacimientos depletados, los cuales, tienen que ver con la producción e inyección de fluidos. A su vez, los cambios que estos procesos desencadenan en los esfuerzos in-situ, que van desde, el cambio de la magnitud de los esfuerzos horizontales, la rotación de los esfuerzos principales horizontales alrededor de fallas que limitan el yacimiento y los cambios de los esfuerzos en la zona superior del yacimiento depletado debido a la compactación.

#### **3.1 SELECCIÓN DEL MODELO**

Del análisis comparativo se deduce que el modelo de Jaeger evalúa la tendencia a la reactivación de una forma precisa y completa. Además, permite determinar la magnitud de los esfuerzos que actúan sobre el plano de falla, lo que lo hace práctico al momento de aplicar los parámetros geomecánicos de reactivación de fallas. Sus cálculos sencillos y la similitud de los resultados con los observados en campo en varias investigaciones lo hacen adecuado para evaluar el riesgo de reactivación de fallas.

#### **3.2 ACOPLAMIENTO DEL MODELO A UN YACIMIENTO DEPLETADO**

El modelo seleccionado se acopla a los procesos que ocurren en un yacimiento depletado, como lo son, el cambio de los esfuerzos dentro del yacimiento con la depleción de la presión, la rotación de los esfuerzos horizontales alrededor de las fallas que limitan el yacimiento y la reactivación de fallas en la vecindad del

yacimiento depletado. Esto se realiza con técnicas analíticas eficientes en trabajos de campo, las cuales suponen yacimientos isotrópicos, porosos y de comportamiento elástico.

**3.2.1 Cambio de los Esfuerzos Poroelásticos Dentro del Yacimiento.** Este cambio de esfuerzos poroelásticos inducido por la depleción del yacimiento se debe a la compactación poroelástica que sufre la roca. Dado que la compactación de la roca se considera una deformación plana o uniaxial que ocurre en dirección vertical, el esfuerzo de sobrecarga no sufre cambio alguno durante la depleción y permanece constante. Por otro lado, los esfuerzos horizontales cambian de manera uniforme con el cambio en la presión de poro, y se considera inexistente la deformación en sus direcciones. Esto es aplicable a yacimientos con una extensión areal mucho mayor que su espesor, según investigaciones de Segall y Fitzgerald en 1996 en una relación de 10:1. La ecuación (48) describe el cambio poroelástico de los esfuerzos horizontales dentro del yacimiento.

$$K = \frac{\Delta\sigma_{Hor}}{\Delta P_p} = \alpha \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \quad \text{Ecuación (48)}$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de biot y  $\nu$  es la relación de Poisson. En la mayoría de yacimientos se ha observado que la disminución de los esfuerzos horizontales está entre el 50 y 80 % de la disminución de la presión de poro. Para procesos de inyección se supone que no existe cambio de esfuerzos poroelásticos ya que se considera que la roca no se deforma<sup>45</sup>.

---

<sup>45</sup> RAFIEEPOUR, Saeed, et al. Experimental Study of Reservoir Stress Path and Hysteresis During Depletion and Injection Under Different Deformational Conditions. *American Rock Mechanics Association*. 2017. 10 p.

### 3.2.2 Rotación de los Esfuerzos Horizontales con la Depleción.

Investigaciones llevadas a cabo para estudiar la rotación de los esfuerzos, demuestran que en las cercanías de las fallas que limitan yacimientos depletados, la dirección del esfuerzo horizontal máximo tiende a ser paralela al azimut de la falla. Dado que las fallas límites funcionan como barreras de flujo, no va a existir un cambio de esfuerzos equivalente en los dos lados de la falla, lo que ocasiona la rotación del esfuerzo horizontal máximo. La rotación de la nueva dirección del esfuerzo horizontal máximo ( $\gamma$ ) cerca de la falla límite con respecto a la dirección original ( $\beta$ ) puede ser encontrada por la ecuación (49)<sup>46</sup>.

$$\gamma = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{Kq \sin 2\beta}{1 + Kq \cos 2\beta} \right] \quad \text{Ecuación (49)}$$

Donde:

$$q = \frac{\Delta P_p}{\sigma_{Hmax} - \sigma_{hmin}} \quad \text{Ecuación (50)}$$

La rotación de la dirección del esfuerzo horizontal máximo con la depleción del yacimiento será considerable, mientras, la relación del cambio de la presión de poro con el diferencial de los esfuerzos horizontales originales sea alta, y además, haya una gran diferencia entre el azimut del esfuerzo horizontal máximo y el azimut de la falla límite del yacimiento.

---

<sup>46</sup> SHEN, X; DIAZ, A. y BAI, M. A Study of Stress Rotation in Formations: Occurrences, Mechanisms, and Numerical Simulation. *American Rock Mechanics Association*. 2011. 9 p.

**3.2.3 Reactivación de Fallas en la Vecindad de un Yacimiento Depletado.** El cambio de los esfuerzos poroelásticos en las rocas circundantes debido a la compactación, es el mecanismo que induce la reactivación de fallas en la vecindad de un yacimiento depletado (figura 11). Para un yacimiento isotrópico y elástico, la perturbación de los esfuerzos inmediatamente encima de este. Esta dada por:

$$\frac{\Delta\sigma_{Hor}}{\Delta P_p} = \alpha \left( \left( \frac{1-2\nu}{1-\nu} \right) \left( \frac{\pi}{4} \right) \left( \frac{H}{2R} \right) \right) \quad \text{Ecuación (51)}$$

Donde, **H** y **2R** es el espesor y la extensión lateral del yacimiento respectivamente. Como se había mencionado antes, el aumento de los esfuerzos horizontales es muy pequeño en comparación con la disminución de estos dentro del yacimiento. Así, que la única forma de que las fallas en la vecindad del yacimiento sean reactivadas es que estas se encuentren en equilibrio friccional<sup>47</sup>.

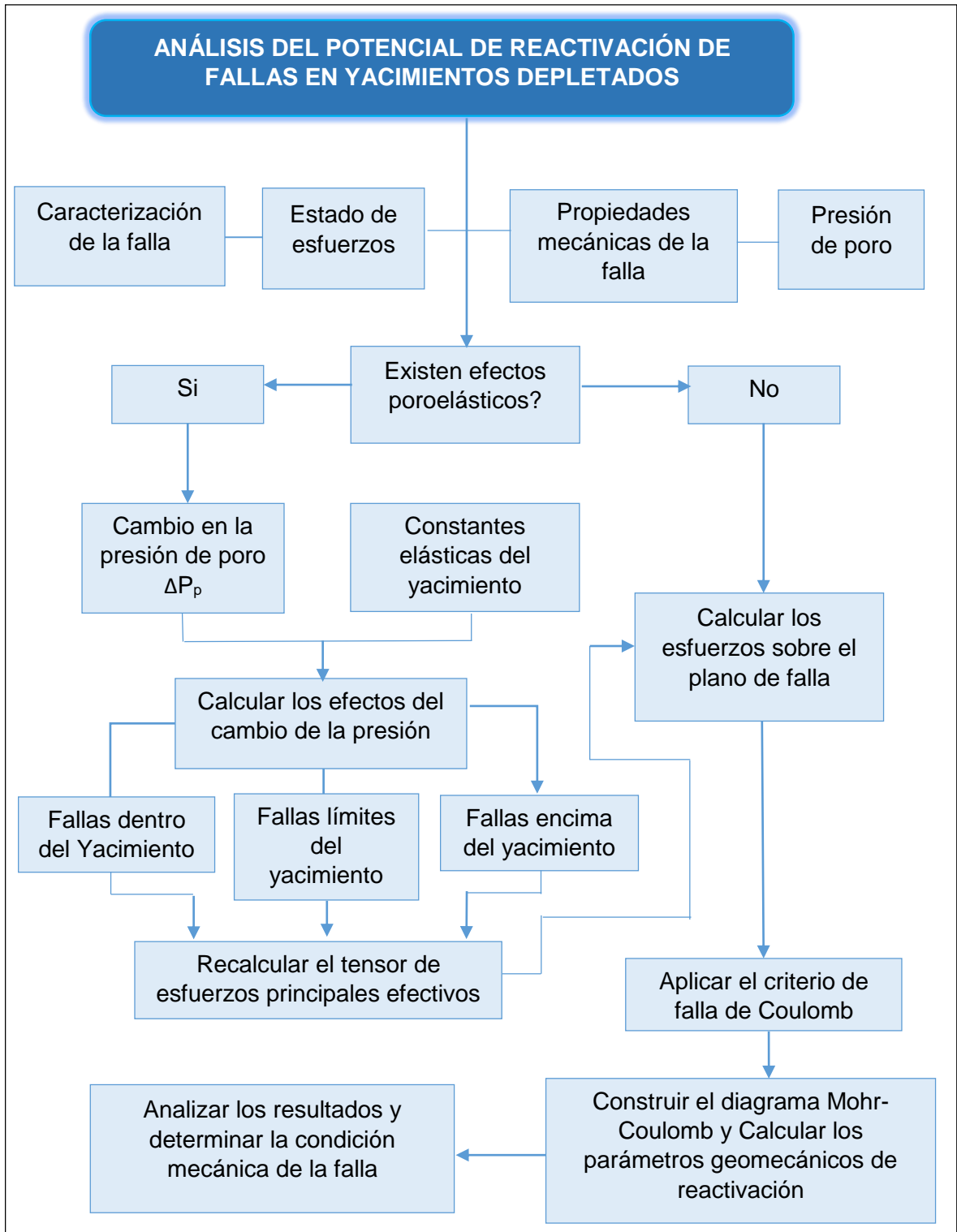
### **3.3 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REACTIVACIÓN DE FALLAS EN YACIMIENTOS DEPLETADOS**

Con el objetivo de ilustrar los efectos que induce la depleción en el cambio del estado de esfuerzos regional, se propone un diagrama de flujo que permite analizar la influencia del comportamiento poroelástico en el análisis del potencial de reactivación de fallas en yacimientos depletados (figura 20). La metodología a seguir para evaluar el potencial de reactivación de fallas es diferente si se tienen en cuenta los efectos poroelásticos, como lo muestra el diagrama de flujo.

---

<sup>47</sup> SEGALL, P. y FITZGERALD, S. D. A Note on Induced Stress Changes in Hydrocarbon and Geothermal Reservoirs. *Tectonophysics*. 1996, Vol. 289, p. 117–128.

**Figura 20.** Diagrama de flujo para el análisis de reactivación de una falla.



Con las anteriores técnicas analíticas se modelan los efectos a los que se expone un yacimiento con una presión en depleción. Por consiguiente, se pueden analizar las condiciones mecánicas de las fallas ubicadas tanto dentro, en la vecindad superior y a los costados del yacimiento depletado. Para procesos de inyección, al no presentarse cambios poroelásticos en la roca, solo se tiene en cuenta el cambio de los esfuerzos efectivos con el aumento de la presión de poro.

### **3.4 VALIDACIÓN DEL MODELO ACOPLADO**

La validación del modelo se realiza comparando resultados obtenidos en investigaciones publicadas por diferentes autores, con los resultados conseguidos con el modelo acoplado para un caso en particular.

Los resultados se presentan en forma de diagramas polares, ya que estos permiten una mejor interpretación y comparación a simple vista de los resultados. Estos diagramas representan los planos de una falla como polos proyectados en el hemisferio sur de una esfera. Los primeros resultados en ser comparados con los del modelo, son los publicados por Zoback (2007), sobre la orientación que tendrán los planos de fallas críticamente forzados bajo un determinado régimen de esfuerzos<sup>48</sup>.

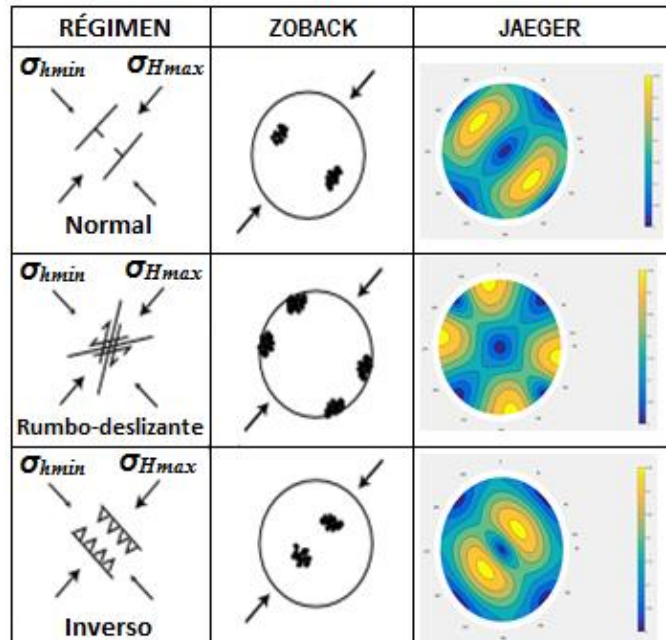
Ingresando todos los posibles ángulos de buzamiento de 0° a 90° y de direcciones de buzamiento de 0° a 360°, en una plantilla de Excel. Se consiguen todos los resultados para cierto parámetro de reactivación en cada orientación en forma de una matriz de 361X91. Utilizando Matlab se adquieren los diagramas polares con

---

<sup>48</sup> ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. New York: Cambridge University Press, 2007. 445 p. ISBN 978-0-521-77069-9.

diferentes contornos que indican las orientaciones con mayor riesgo de activación, bajo un régimen de estado de esfuerzos definido. Estos diagramas se comparan con los presentados por Zoback (2007) para fallas críticamente forzadas (figura 21).

**Figura 21.** Diagramas polares en cada régimen de esfuerzos.



**Fuente:** tomada de ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. New York: Cambridge University Press, 2007. 445 p. ISBN 978-0-521-77069-9.

Como se observa en la figura 21, los diagramas construidos poseen una gran similitud con los publicados por Zoback, 2007. Los contornos de amarillo representan las zonas en que las fallas tendrán mayor probabilidad de estar críticamente forzadas bajo un determinado régimen de esfuerzos. En cambio, en las zonas azules las fallas permanecerán estables. Para un régimen normal, el azimut de las fallas activas suele ser paralelo a la dirección del esfuerzo horizontal máximo y su buzamiento cercano a o los 60°. En un régimen inverso, el azimut de las fallas activas es perpendicular al esfuerzo horizontal máximo y su buzamiento está cerca

a los 30° y en un régimen rumbo-deslizante, el azimut de las fallas activas se encontrara a 30° del esfuerzo horizontal máximo.

Ahora los resultados del modelo son comparados con los resultados obtenidos por Safari et al, 2013. Haciendo uso de datos de entrada mostrados por la tabla (6) para un ejercicio de análisis, determinan el parámetro geomecánico de presión de poro crítica para un conjunto de fallas sintéticas<sup>49</sup>.

**Tabla 6.** Datos de entrada para el ejercicio de análisis de validación.

VARIABLES	VALORES	UNIDADES
Gradiente del esfuerzo de sobrecarga	22	KPa/m
Gradiente del esfuerzo horizontal máximo	35	KPa/m
Gradiente del esfuerzo horizontal mínimo	20	KPa/m
Gradiente de presión de poro	10	KPa/m
Azimut del esfuerzo horizontal máximo	60	°
Coefficiente de Fricción estático	0.6	adimensional

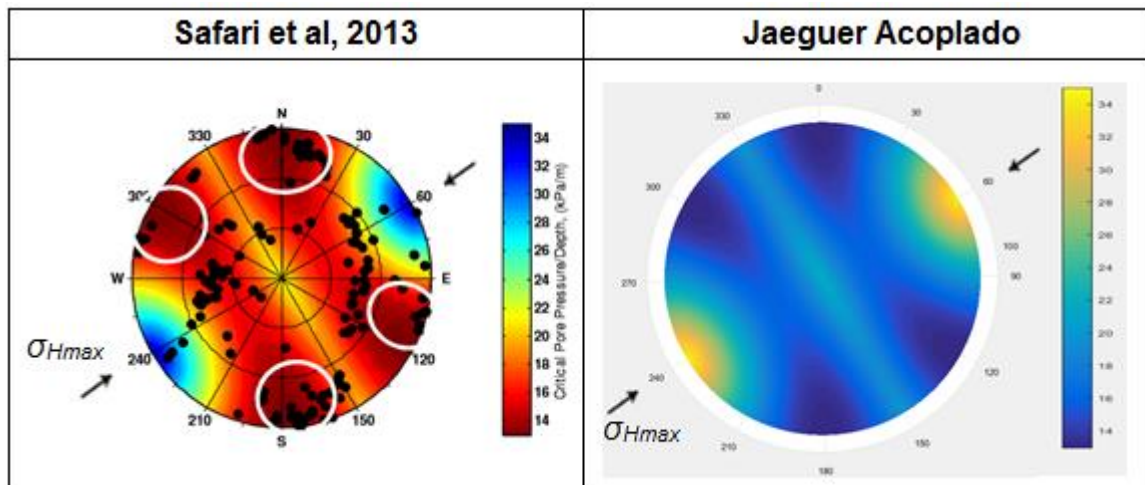
**Fuente:** tomada de SAFARI, M. et al. Effects of Depletion/Injection Induced Stress Changes on Natural Fracture Reactivation. *American Rock Mechanics Association*. 2013. 20 p.

Los resultados conseguidos por Safari et al, 2013 son enseñados en un diagrama polar construido por un software de la compañía Weatherford (figura 22). Comparando los resultados de los dos modelos se aprecia que el parámetro geomecánico de reactivación de presión de poro crítica, está en el mismo rango que el arrojado por el software de Weatherford. Además, las áreas contorneadas

<sup>49</sup> SAFARI, M. et al. Effects of Depletion/Injection Induced Stress Changes on Natural Fracture Reactivation. *American Rock Mechanics Association*. 2013. 20 p.

coinciden en los dos diagramas. Las áreas de color azul oscuro en el diagrama del modelo acoplado muestran una baja presión de poro crítica, alrededor de 13 KPa/m, mientras, en las zonas amarillas la presión de poro crítica es de 35 KPa/m. Es decir, que las fallas con sus polos en el área azul se reactivaran más fácilmente con un aumento en la presión de poro, ya que una perturbación en la presión de 3 KPa/m en los planos de falla que se ubican dentro de las áreas de contorno azul, causara la reactivación del plano de falla. Por otro lado, las fallas ubicadas en las zonas amarillas necesitan una perturbación de presión de 25 KPa/m para su reactivación.

**Figura 22.** Comparación de resultados de la presión de poro crítica.



**Fuente:** tomada de SAFARI, M. et al. Effects of Depletion/Injection Induced Stress Changes on Natural Fracture Reactivation. *American Rock Mechanics Association*. 2013. 20 p.

A partir de la validación del modelo con resultados obtenidos en otras investigaciones, se puede decir, que este arroja resultados coherentes con respecto a los valores de entrada. Lo que lo hace confiable para usarlo en un análisis de sensibilidad. La figura 23 describe la metodología de la validación del modelo.

**Figura 23.** Diagrama de flujo de la metodología de la validación del modelo.



### 3.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

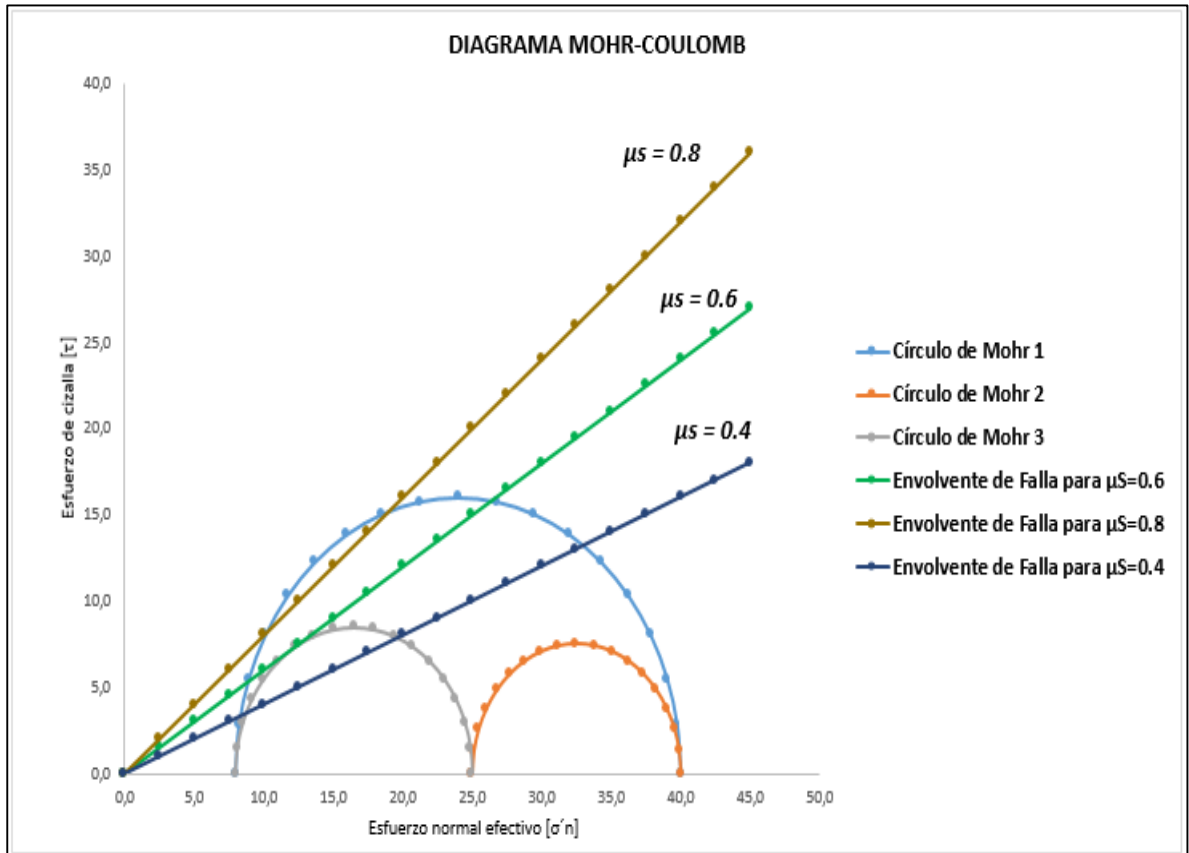
En el siguiente análisis de sensibilidad se varían los valores de algunas variables de entrada específicas, con el fin, de obtener una idea del efecto que tiene la sensibilidad de cada variable sobre el potencial de reactivación de fallas en yacimientos depletados.

**3.5.1 Sensibilidad de las Propiedades Friccionales de la Falla.** Ya que el modelo considera planos sin cohesión, la única variable que representa las propiedades friccionales del plano es el coeficiente de fricción estático. Este según la ley de Byerlee puede tomar valores de 0.6 a 1, aunque, se han encontrado valores de 0.5 asignados a fallas con alta presencia de arcillas en el interior de sus planos. La sensibilidad de esta propiedad afecta directamente la envolvente del criterio de falla, por consiguiente su variación representa un análisis importante en la estabilidad de las fallas.

Utilizando tres valores para el coeficiente de fricción estático de 0.4, 0.6 y 0.8 se puede observar el efecto que este tiene en la resistencia friccional de la falla y como puede alterar las condiciones de equilibrio de una falla.

El valor de coeficiente de fricción más recomendado y el más utilizado en estudios de reactivación de fallas es el de 0.6. Es el valor utilizado a lo largo de este análisis para todas las fallas.

Figura 24. Sensibilidad del coeficiente de fricción.



De la sensibilidad del coeficiente de fricción estático se puede deducir que mientras más bajo sean los valores de este, mayor serán el número de las orientaciones de fallas que pueden ser reactivadas bajo un estado de esfuerzos determinado. Esto se aprecia en cualquiera de los tres regímenes de esfuerzos que podrán existir en una zona. Es decir, que la probabilidad de reactivación en una población de fallas bajo un mismo estado de esfuerzos in-situ será alta, siempre y cuando el coeficiente de fricción estático de las fallas en la zona sea bajo. Debido a que la resistencia friccional de un plano de falla depende en gran medida del valor del coeficiente de fricción estático, cuando este tiende a cero lo mismo ocurre con la resistencia friccional de la falla, haciéndola más inestable.

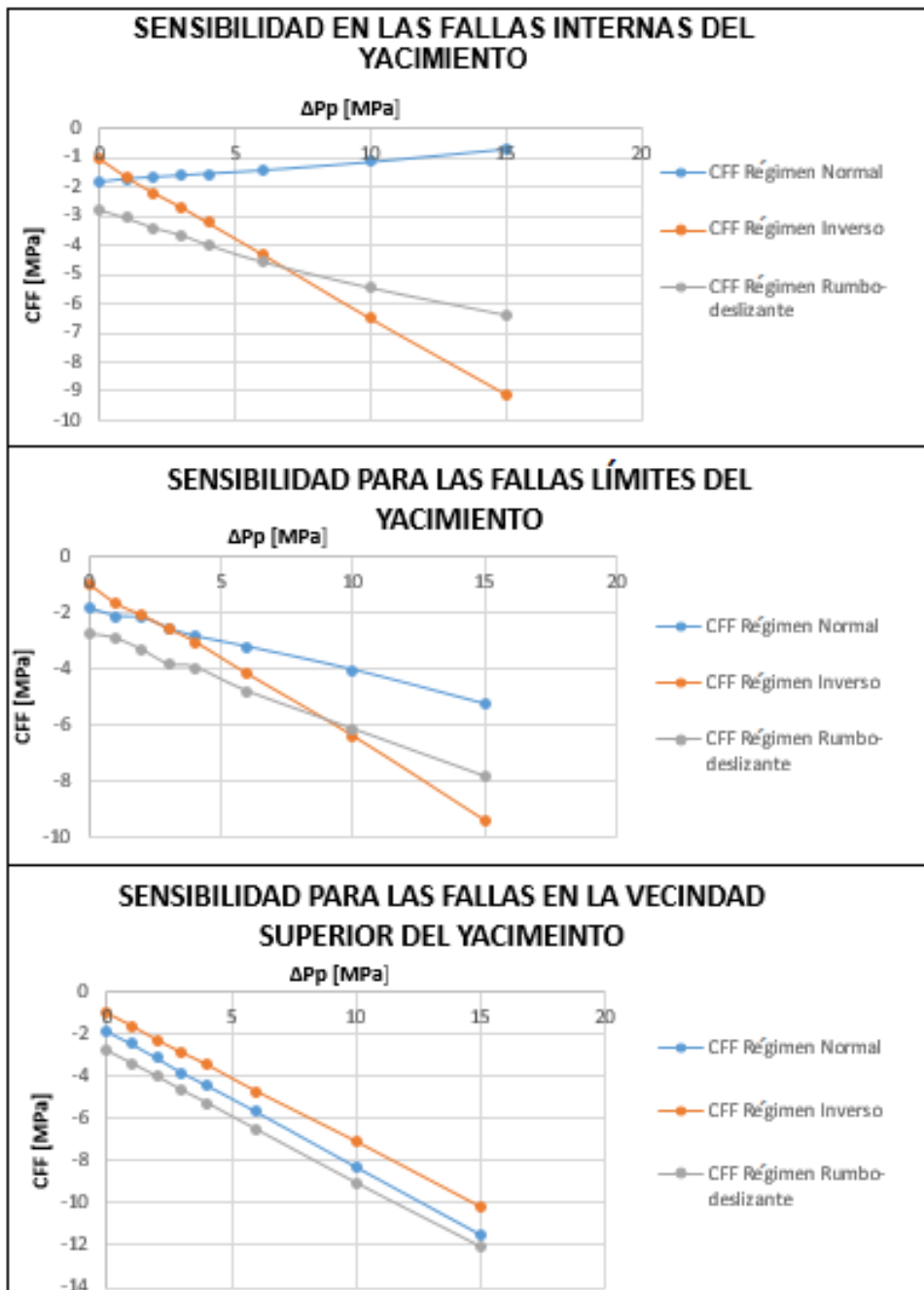
**3.5.2 Sensibilidad del Cambio de la Presión de Poro.** Para analizar el efecto que tiene la sensibilidad del cambio en la presión de poro en el potencial de reactivación de fallas en yacimientos depletados. Se compara el potencial de reactivación a partir de un parámetro geomecánico de reactivación de una falla con una orientación arbitraria antes del cambio de presión, con el potencial de reactivación debido a cada cambio en la presión. Los resultados se presentan en graficas de Excel.

Para el proceso de producción, la sensibilidad del cambio en la presión de poro se realiza tanto para fallas que se encuentran dentro, limitando y en la vecindad superior del yacimiento en depleción, en cualquiera de los tres regímenes de esfuerzos (figura 25). El parámetro geomecánico de reactivación analizado es la función de falla de Coulomb (**CFF**).

De los resultados obtenidos por la sensibilidad del cambio en la presión de poro, se observa que la falla se encuentra estable bajo las condiciones iniciales en los tres tipos de regímenes de esfuerzo, ya que el valor de CFF cuando  $\Delta P_p$  es igual a cero, es negativo. Al comenzar la depleción, el potencial de reactivación de las fallas en el interior del yacimiento sometidas a un régimen de esfuerzos normal, aumenta, debido a que el valor de CFF tiende a cero, a medida que  $\Delta P_p$  incrementa. Por el contrario, para el régimen inverso y rumbo-deslizante estas fallas se vuelven más estables, alejándose de las condiciones friccionales de la falla por causa de la traslación del círculo de Mohr sobre el eje de las abscisas hacia la derecha por el aumento de los esfuerzos efectivos como consecuencia de la producción. Aunque para las fallas críticamente forzadas esta traslación podría provocar un deslizamiento al momento de la falla pasar de la región activa a la región estable del círculo de Mohr. Para las fallas que limitan el yacimiento, el cambio de la presión por la producción no representa riesgo de reactivación. Mientras que, las fallas en

la vecindad superior presentaran riesgo de reactivación si se encuentran críticamente forzadas.

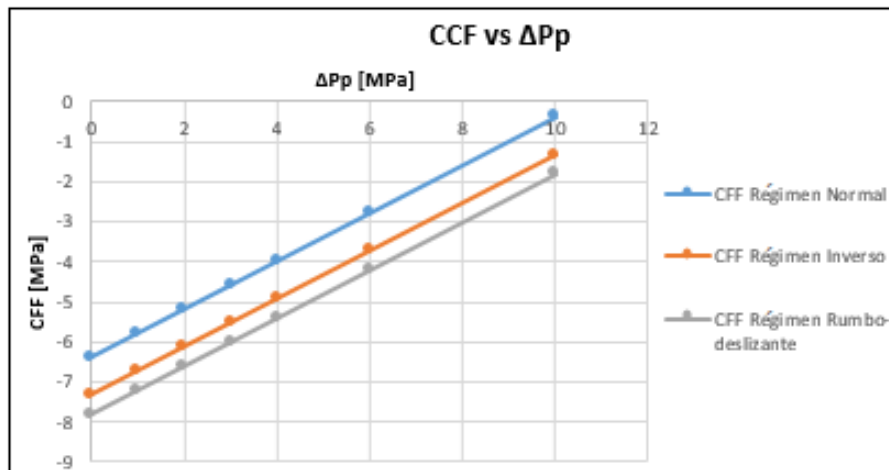
**Figura 25.** Sensibilidad del cambio en la presión de poro en la producción.



En las fallas internas y límites del yacimiento en depleción que se encuentran bajo la influencia de un régimen inverso, a medida que el cambio de presión aumenta, ocurre una disminución del esfuerzo de cizalla que actúa en el plano de falla, la cual se ve compensada por un aumento en el esfuerzo normal efectivo del mismo. Esto explica la declinación pronunciada del CCF con respecto al aumento de  $\Delta P_p$ . Cabe aclarar que los valores del cambio en la presión de poro son negativos debido a la producción, y que para una mejor comprensión gráfica se tomaron como aumentos absolutos.

Para evaluar el efecto de la sensibilidad del cambio en la presión de poro por procesos de inyección, se grafica el parámetro geomecánico de reactivación CCF vs la variación del cambio en la presión de poro  $\Delta P_p$  para una falla determinada bajo cada régimen de esfuerzos (figura 26).

**Figura 26.** Sensibilidad del cambio de la presión de poro por la inyección.



Como se aprecia en la figura 26 la tendencia a la reactivación con el aumento de la presión de poro dentro del yacimiento debido a procesos de inyección, incrementa

conforme aumenta el cambio en la presión de poro. Esto ocurre porque el incremento de la presión de poro debilita la magnitud del esfuerzo normal efectivo al plano de falla, mientras el esfuerzo de cizalla permanece constante durante el desarrollo de la presión, por ende, la resistencia friccional se reduce y el potencial de reactivación se acrecienta en las fallas del yacimiento.

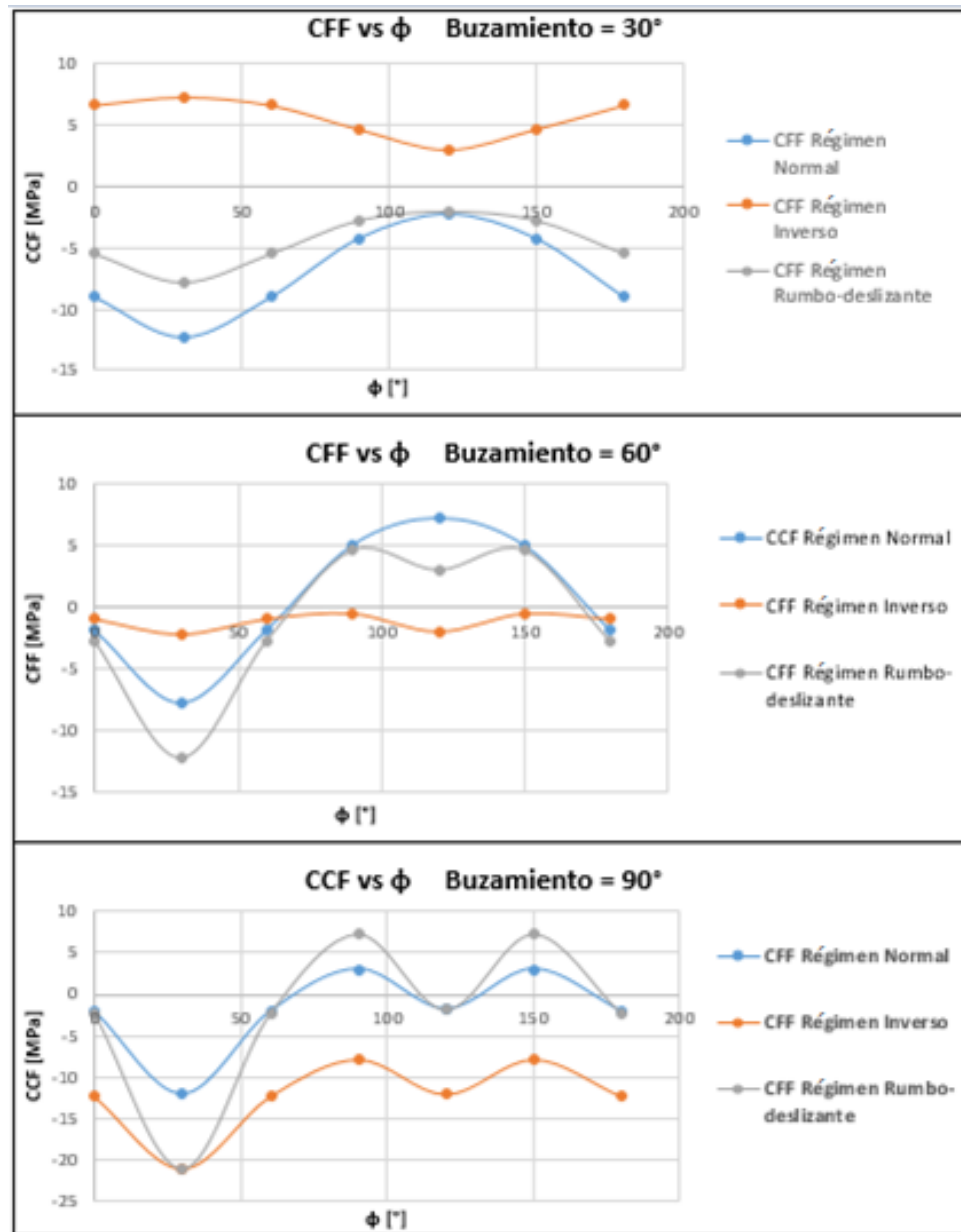
De la sensibilidad del cambio en la presión de poro para procesos de inyección y de producción dentro del yacimiento se puede decir, que las fallas son más probables a reactivarse durante procesos de inyección que durante procesos de producción.

**3.5.3 Sensibilidad del Azimut del Esfuerzo Horizontal Máximo.** Para la sensibilidad del azimut del esfuerzo horizontal máximo ( $\phi$ ), se calculan los esfuerzos en un plano de una falla con buzamientos de 30°, 60° y 90°, un azimut de 300° medido en sentido horario, para cada dirección de  $\sigma_{Hmax}$ , y con estos se determina el parámetro geomecánico de reactivación CFF el cual da una idea de cómo afecta la variación del azimut del esfuerzo horizontal máximo al potencial de reactivación de fallas con distinto buzamiento (figura 27).

En la figura 27, se ve que el potencial de reactivación se comporta de una manera cíclica. Para el régimen inverso el potencial de reactivación disminuye con forme aumenta el ángulo de buzamiento de las fallas. En fallas con altos buzamientos el potencial de reactivación es mínimo cuando el azimut de  $\sigma_{Hmax}$  actúa en dirección perpendicular a la azimut de la falla, y es alto, cuando el azimut de  $\sigma_{Hmax}$  forma un ángulo de 30 grados con el azimut de la falla. En fallas con bajos buzamientos sometidas a un régimen normal, el potencial de reactivación es máximo, cuando el azimut de  $\sigma_{Hmax}$  es paralelo al azimut de la falla.

La sensibilidad de la dirección del esfuerzo horizontal máximo se aplicó a diferentes buzamientos de falla, para comprender de forma global el comportamiento del potencial de reactivación como consecuencia de la rotación horizontal del tensor de esfuerzos, en las posibles orientaciones de fallas en el subsuelo.

**Figura 27.** Sensibilidad del azimuth del esfuerzo horizontal máximo.



### **3.6 CALIBRACIÓN DEL MODELO**

La calibración del modelo es posible mediante datos de microsismicidad en campo. A partir de la identificación de mecanismos focales en una zona del yacimiento, se puede aplicar el modelo para estudiar la estabilidad de las fallas en dicha zona. Una vez conocidos los resultados arrojados por el modelo son comparados con los datos sísmicos de la zona, según la comparación se ajusta las variables de entrada de forma razonable conforme la diferencia en los resultados.

La variable más adecuada para ajustar, es el coeficiente de fricción estático, ya que es una variable con alto grado de incertidumbre, además, de representar las propiedades friccionales de una población de fallas de manera general.

Cabe aclarar que el modelo acoplado tiene limitaciones con respecto a la forma del yacimiento y al comportamiento tomado por los esfuerzos poroelásticos. Lo que se plantea en este trabajo, es una aproximación analítica razonable propuesta por investigadores que han obtenido resultados confiables para el estudio de la estabilidad en fallas en diferentes yacimientos del mundo.

## 4 EJERCICIO DE APLICACIÓN

En esta sección se emplea el modelo acoplado para analizar el potencial de reactivación en las fallas presentes en un campo de hidrocarburos a partir de una plantilla de Excel en la que se programa el modelo. Se analiza la estabilidad de fallas específicas pertenecientes al sistema de fallas que componen el yacimiento y se plantearán dos escenarios futuros con respecto a una presión inicial del yacimiento, uno de producción y otro de inyección, donde la presión disminuye y aumenta respectivamente a un determinado valor del que se partió inicialmente.

La información del campo, como los valores de algunas variables de entrada al modelo, son obtenidos a partir de investigaciones publicadas en papers de años anteriores, y se utilizan sus valores promedios.

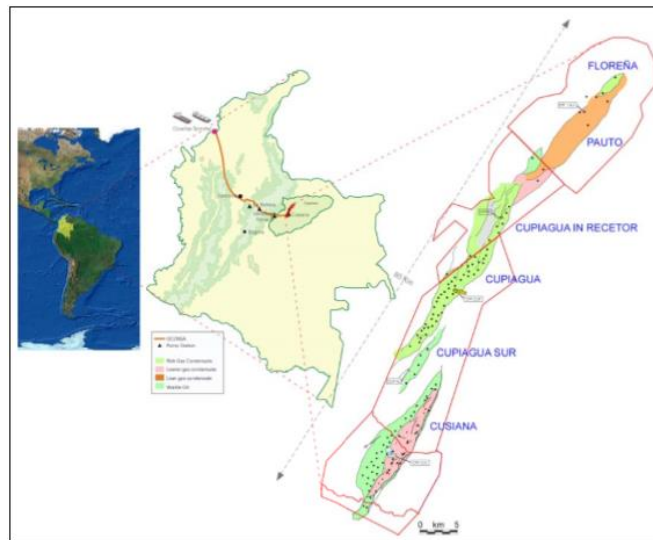
### 4.1 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS, ESTRUCTURALES Y GEOLÓGICAS DEL CAMPO

El campo de hidrocarburos está localizado en el piedemonte llanero, al este de la cordillera de los andes, en la cuenca de los llanos orientales (figura 28). El yacimiento está caracterizada por una estructura anticlinal limitada por dos fallas de cabalgamiento que lo compartimentalizan. La falla Yopal y la falla Cusiana (figura 29). El campo tiene 14 millas de longitud y 3 millas de amplitud. El yacimiento principal del campo es la formación Mirador con un buzamiento de 7°, compuesta por cuarzo-arenitas bien cementadas, depositadas en ambientes fluviales y marinos poco profundos<sup>50</sup>.

---

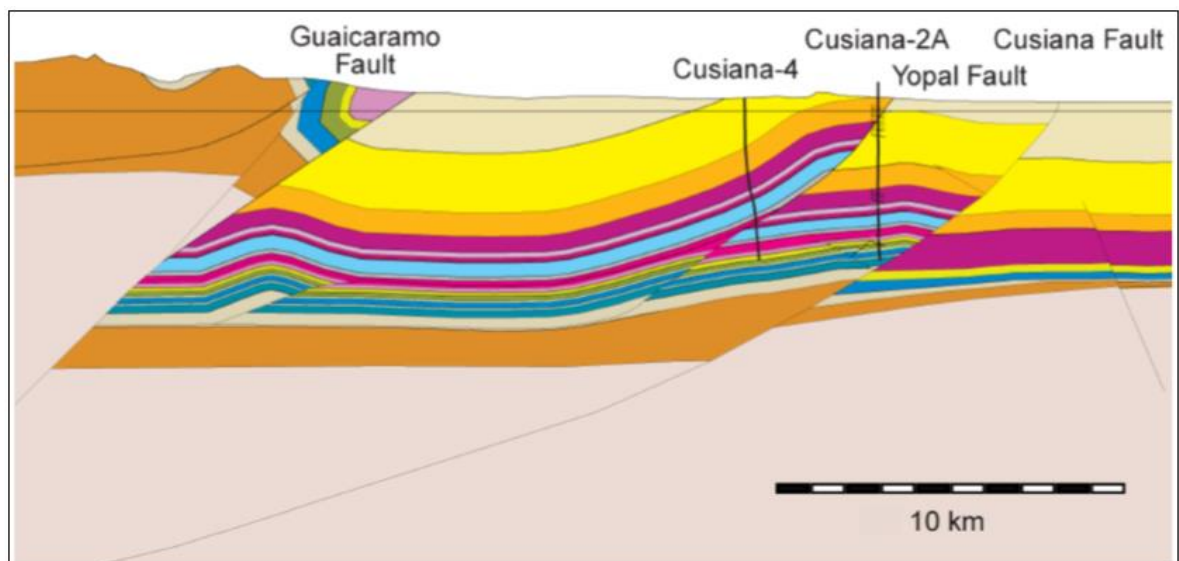
<sup>50</sup> ADDIS, M. A. The Geology of Geomechanics: Petroleum Geomechanical Engineering in Field Development Planning. *The Geological Society of London*. 2017. 23 p.

**Figura 28.** Ubicación del campo de hidrocarburos.



**Fuente:** Tomada de OSORIO, J.G.; PEÑUELA, G. y OTALORA, O. Correlation between Microseismicity and Reservoir Dynamics in a Tectonically Active Area of Colombia. *Society of Petroleum Engineers*. 2008. 14 p.

**Figura 29.** Sección transversal del campo de hidrocarburos.



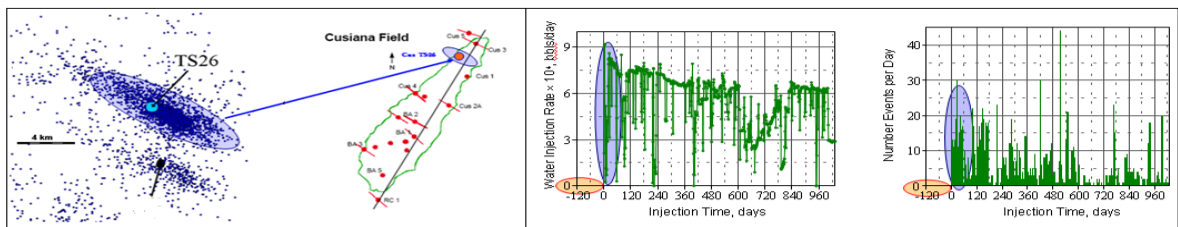
**Fuente:** Tomada de ADDIS, M. A. The Geology of Geomechanics: Petroleum Geomechanical Engineering in Field Development Planning. *The Geological Society of London*. 2017. 23 p.

## 4.2 EVENTOS DE LA ZONA

El campo de hidrocarburos se caracteriza por situarse en una cuenca tectónicamente activa debido a la anisotropía de esfuerzos causada por procesos orogénicos. Esto indica que hay presencia de fallas activas en el lugar. Además, inmediatamente después del comienzo de la producción, iniciaron procesos de inyección de gas miscible en la formación Mirador. Lo que cambio las condiciones mecánicas de la fallas. Fallas que se comportaban como sello en condiciones iniciales pasaron a ser conductivas y presentaron fugas.<sup>51</sup>

Investigaciones demuestran la presencia de eventos sísmicos en el campo y una fuerte correlación de estos con los procesos de inyección (figura 30). Todos registrados por una red sísmica de 10 estaciones ubicada en los campo de hidrocarburos desde el año 1992, donde se registraban en promedio 1000 microsismos de magnitud de 1.0 y 2.0 en la escala de Richter<sup>52</sup>.

**Figura 30.** Correlación de la microsismicidad con el cambio en la presión de poro.



**Fuente:** Tomada de OSORIO, J.G.; PEÑUELA, G. y OTALORA, O. Correlation Between Microseismicity and Reservoir Dynamics in a Tectonically Active Area of Colombia. *Society of Petroleum Engineers*. 2008. 14 p.

<sup>51</sup> SOTO, L. et al. Gas-Injection Redistribution Revitalize a Mature Volatile Oil Field: Cusiana Field Case Study. *Society of Petroleum Engineers*. 2006. 7 p.

<sup>52</sup> OSORIO, J.G.; PEÑUELA, G. y OTALORA, O. Correlation Between Microseismicity and Reservoir Dynamics in a Tectonically Active Area of Colombia. *Society of Petroleum Engineers*. 2008. 14 p.

### 4.3 MODELO GEOMECÁNICO

El modelo geomecánico del campo expone el gradiente de los esfuerzos, el gradiente de presión de poro y en este caso el coeficiente de Poisson de la formación. Como el objetivo es el estudio de fallas ya formadas, no es relevante la resistencia de la roca.

El gradiente del esfuerzo horizontal mínimo lo determinaron a partir de datos de pruebas de flujo escalonado (fracturas hidráulicas). El gradiente del esfuerzo horizontal máximo fue más difícil de encontrar, este se obtuvo con análisis de la resistencia de núcleos y la iniciación de los breakouts, mientras, su dirección se calculó con registro caliper de cuatro brazos y registros de imagen. Para el gradiente del esfuerzo vertical se utilizó el registro de densidad. La tabla (7), muestra los datos del modelo con sus respectivas unidades<sup>53</sup>.

**Tabla 7.** Modelo geomecánico.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
<b>Gradiente del esfuerzo horizontal máximo</b>	8.26 – 11.72	KPa/ft
<b>Gradiente del esfuerzo horizontal mínimo</b>	4.83	KPa/ft
<b>Gradiente del esfuerzo de sobrecarga</b>	7.38	KPa/ft
<b>Gradiente de presión de poro</b>	3.03	KPa/ft
<b>Orientación del esfuerzo horizontal máximo</b>	135 N	°
<b>Coeficiente de Poisson</b>	0.26	adimensional
<b>Coeficiente de Biot</b>	1	adimensional

**Fuente:** tomada de P. A. Charles, et al. Understanding the Present day In-Situ State of Stress in the Cusiana Field – Colombia. *Society of Petroleum Engineers*. 1998. 8 p.

<sup>53</sup> P. A. Charles, et al. Understanding the Present day In-Situ State of Stress in the Cusiana Field – Colombia. *Society of Petroleum Engineers*. 1998. 8 p.

Aplicando comúnmente el gradiente de presión hidrostática teórico para la presión de poro, un coeficiente de Biot de 1 para rocas porosas y un coeficiente de Poisson empleado en anteriores investigaciones para el modelado de la evolución de los esfuerzos en el campo y estabilidad de pozos<sup>54</sup>.

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS FALLAS

Las dos fallas principales del campo. La falla Yopal ubicada al oeste del bloque cusiana, con un azimut de N-E y buzamiento hacia el N-W. La falla Cusiana define el comienzo de la extensa área de los llanos orientales. Presenta un azimut de N-E. Para este ejercicio de aplicación se aproxima a un sistema de fallas subparalelas entre sí. Para analizar cómo cambian los esfuerzos de las fallas dentro y en la vecindad superior del yacimiento, se crea una falla sintética con un buzamiento de 40° W con un azimut de 30°N demás. La tabla (8) muestra las propiedades de las fallas en estudio.

**Tabla 8.** Propiedades de las principales fallas del yacimiento.

	FALLA YOPAL	FALLA CUSIANA	FALLA SINTÉTICA
Azimut	27°N	27°N	30°N
Buzamiento	20° – 30° W	25° – 35° W	40° W
Coeficiente de fricción	0.6	0.6	0.6
cohesión	0	0	0

**Fuente:** Tomada de ADDIS, M. A. The Geology of Geomechanics: Petroleum Geomechanical Engineering in Field Development Planning. *The Geological Society of London*. 2017. 23 p.

<sup>54</sup> N. Last, et al. An Integrate Approach to Evaluate and Managin Wellbore Stabiliti in the Cusiana Field, Colombia, South America. *Society of Petroleum Engineers*. 1995. 14 p.

Con respecto a los valores de las propiedades friccionales de la falla, se consideran fallas sin cohesión y se asume la ley de Byerlee para el coeficiente de fricción estático.

#### 4.5 ESCENARIOS PROPUESTOS

Para aplicar el modelo en su totalidad es necesario plantear dos escenarios que representan las condiciones, en las que el yacimiento se somete a un proceso de producción e inyección de fluidos. Partiendo de las condiciones iniciales y sin considerar cambio alguno en las propiedades mecánicas del yacimiento, se llega a unas condiciones finales, determinadas por un valor de presión de poro que depende del proceso planteado. La tabla (9) muestra los datos para cada escenario.

**Tabla 9.** Valores de la presión para cada escenario propuesto.

	ESCENARIO DE PRODUCCIÓN	ESCENARIO DE INYECCIÓN
Presión de poro inicial	37 MPa	37 MPa
Presión de poro Final	17 MPa	47 MPa
Cambio en la presión de poro	-20 MPa	10 MPa

#### 4.6 DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO

Los datos de las variables de entrada para el análisis del potencial de reactivación de fallas se integran en una Tabla de Excel, que muestra el tensor de esfuerzos in-situ, principal, las características de las fallas y las del yacimiento (figura 31).

**Figura 31.** Datos de entrada al modelo del ejercicio de aplicación.

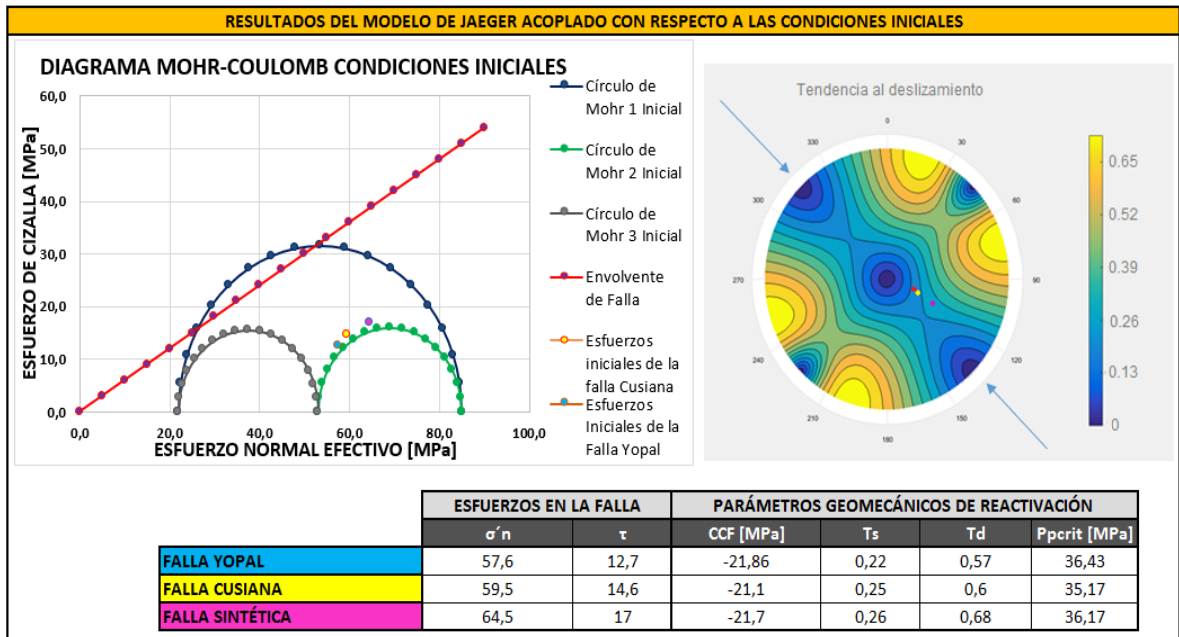
VARIABLES DE ENTRADA DEL MODELO DE JAEGER ACOPLADO			
TENSOR DE ESFUERZOS			
ESFUERZO DE SOBRECARGA [ $\sigma_v$ ]		90	MPa
ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO [ $\sigma_{Hmax}$ ]		122	MPa
ESFUERZO HORIZONTAL MÍNIMO [ $\sigma_{Hmin}$ ]		58,9	MPa
ESFUERZO PRINCIPAL MÁXIMO [ $\sigma_1$ ]		122	MPa
ESFUERZO PRINCIPAL INTERMEDIO [ $\sigma_2$ ]		90	MPa
ESFUERZO PRINCIPAL MÍNIMO [ $\sigma_3$ ]		58,9	MPa
AZIMUT DEL ESFUERZO HORIZONTAL MÁXIMO [ $\phi$ ]		135	°
ATRIBUTOS DE LA FALLA			
BUZAMIENTO [ $\delta$ ]	Falla Yopal	25	°
	Falla Cusiana	30	°
	Falla Sintética	45	°
DIRECCIÓN DE BUZAMIENTO [ $\theta$ ]	Falla Yopal	297	°
	Falla Cusiana	297	°
	Falla Sintética	300	°
COEFICIENTE DE FRICCIÓN ESTÁTICO [ $\mu_s$ ]		0,6	adimensional
ÁNGULO AGUDO ENTRE EL AZIMUT DE LA FALLA Y EL AZIMUT DE $\sigma_{Hmax}$ [ $\beta$ ]		72	°
PROPIEDADES DEL YACIMIENTO			
PRESIÓN DE PORO [ $P_p$ ]		37	MPa
PROFUNDIDAD DEL YACIMIENTO		12200	ft
COEFICIENTE DE BIOT [ $\alpha$ ]		1	adimensional
RELACIÓN DE POISSON [ $\nu$ ]		0,26	adimensional
RELACIÓN DE FORMA [ $E$ ]		0,022	adimensional
PROCESO DE PRODUCCIÓN	PRESIÓN DE PORO FINAL [ $P_{p2}$ ]	17	MPa
	CAMBIO DE PRESIÓN DE PORO [ $\Delta P_p$ ]	-20	MPa
PROCESO DE INYECCIÓN	PRESIÓN DE PORO FINAL [ $P_{p2}$ ]	47	MPa
	CAMBIO DE PRESIÓN DE PORO [ $\Delta P_p$ ]	10	MPa

**Fuente:** tomada de P. A. Charles, et al. Understanding the Present day In-Situ State of Stress in the Cusiana Field – Colombia. *Society of Petroleum Engineers*. 1998. 8 p.

#### 4.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados se presentan de forma gráfica, y en forma matemática por los parámetros geomecánicos de reactivación. Primero se muestran los resultados bajo las condiciones iniciales del yacimiento (figura 32).

Figura 32. Resultados de las condiciones iniciales



En las condiciones iniciales se aprecia que las tres fallas no presentan riesgo alguno de reactivación, pues los esfuerzos del plano de falla dentro del círculo de Mohr se encuentran en la zona estable, alejados de la envolvente. Esto se puede corroborar con el valor de los parámetros geomecánicos de cada falla. Por ejemplo, todos los valores de CFF son negativos y de gran magnitud, indicando que existe una gran resistencia friccional, mayor que el esfuerzo de cizalla actuando en la falla. Esta elevada resistencia friccional se debe a altos valores del esfuerzo normal efectivo, como lo muestra la baja tendencia a la dilatación y al deslizamiento que presentan las fallas. Estos esfuerzos normales efectivos altos en el plano de falla permiten que la falla tenga la capacidad de soportar grandes perturbaciones en la presión de poro sin que estas se vean afectadas por el fenómeno de reactivación.

Ahora bien, dado que el estado de esfuerzos efectivo de la zona es crítico (intersecta a la envolvente de falla). Existirán orientaciones de fallas en las que estas

probablemente de reactivaran o estarán críticamente forzadas, afianzando la información de los eventos de fallas activas presentes en el campo, por Soto et al, 2006. Estas orientaciones son apreciables en el diagrama polar de los resultados. Donde las fallas con alto potencial de reactivación o a comportarse como conductivas tienen buzamientos mayores a  $60^\circ$  y con azimuts entre los  $30^\circ$  y  $45^\circ$  con respecto a la dirección del esfuerzo horizontal máximo.

Se puede decir que tanto la falla Cusiana como la falla Yopal, son fallas en las que no se van a presentar fugas, ni deslizamiento que generen sismicidad en la sección del yacimiento. Esto debido a sus orientaciones con respecto al estado de esfuerzos in-situ.

Ahora se muestran los resultados obtenidos luego de la disminución de presión de poro por cuenta del escenario de producción planteado. Los resultados constan de un diagrama de Mohr-Coulomb y los parámetros geomecánicos de reactivación para fallas ubicadas en diferentes zonas del yacimiento (figura 33, 34 y 35).

Para las fallas ubicadas en el interior del yacimiento, en este caso la falla sintética. Se observa que durante el proceso de producción, su potencial de reactivación disminuye conforme lo hace la presión. Esto se debe en parte, a que sus esfuerzos normales efectivos aumentan. Pero más que todo por el efecto que causa el cambio de los esfuerzos poroelásticos del yacimiento (Stress Path), en la magnitud de los esfuerzos de cizalla que actúa en el plano de falla. A medida que la presión disminuye lo hace la magnitud del esfuerzo de cizalla, esta disminución se presenta porque el diferencial del estado de esfuerzos efectivos cambia. En este caso por el aumento del diferencial entre el esfuerzo principal efectivo intermedio y el esfuerzo principal efectivo mínimo.

Figura 33. Resultados de la producción en la falla sintética interior.

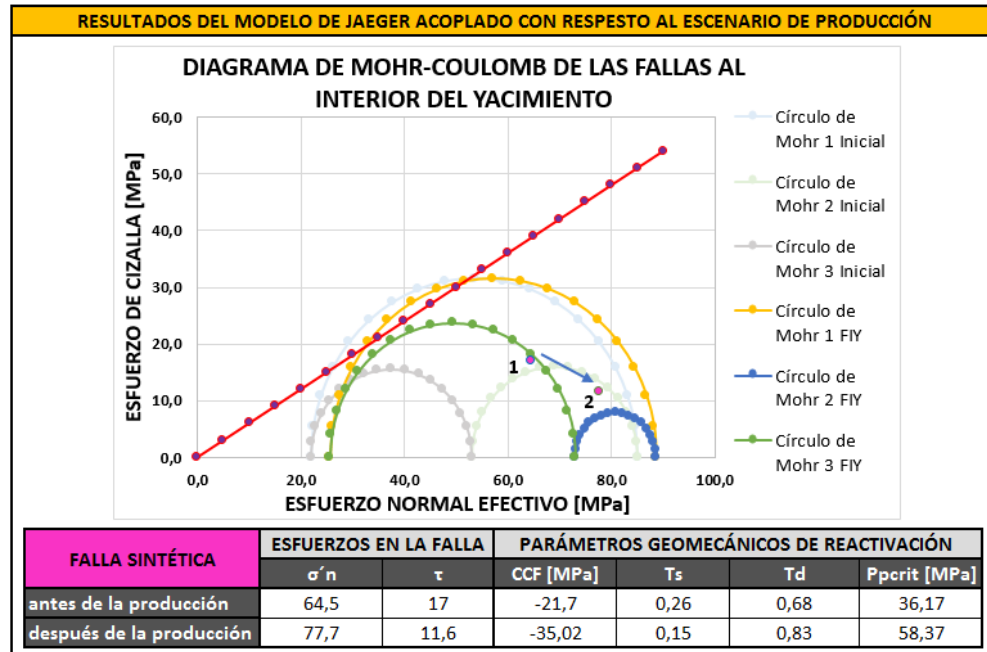


Figura 34. Resultado de la producción en las fallas límites.

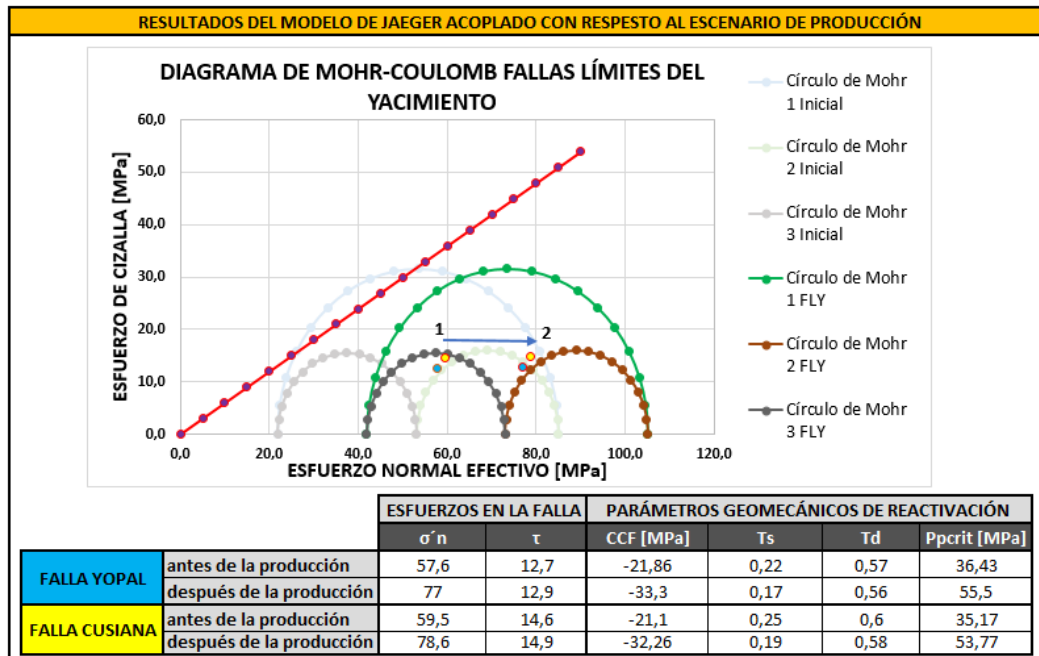
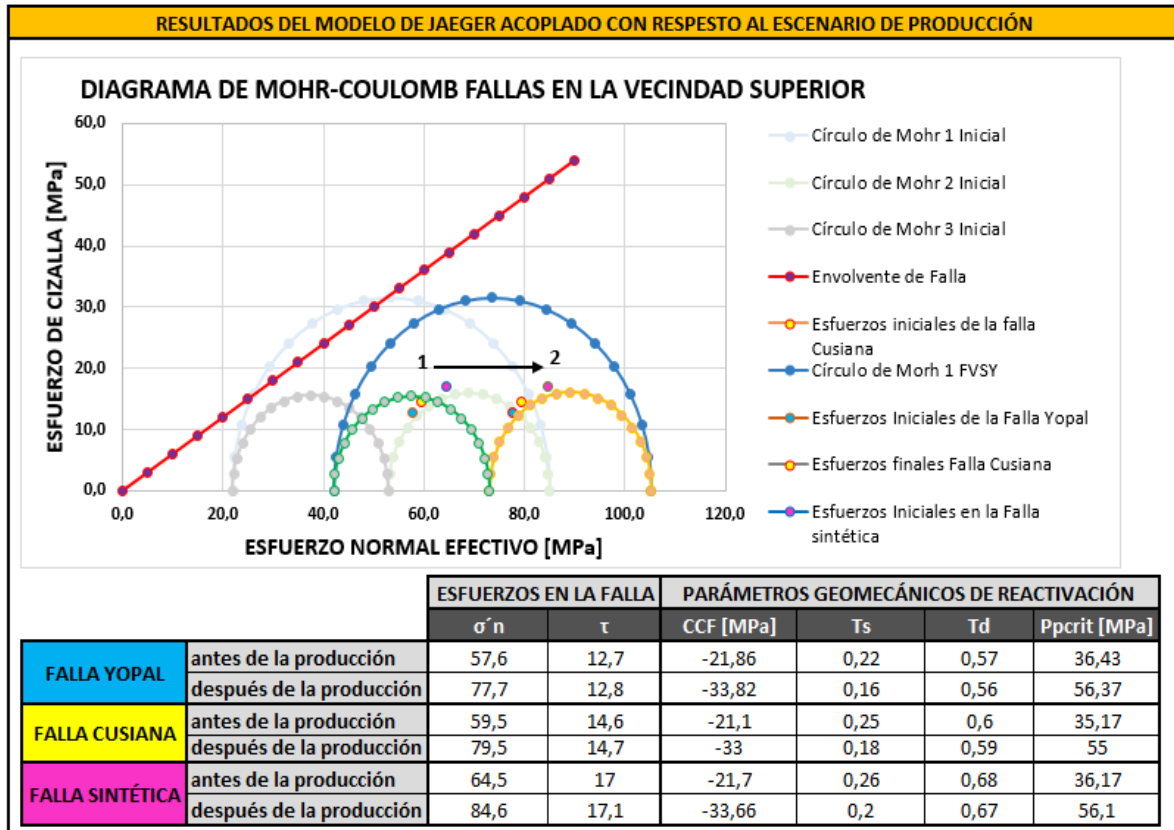


Figura 35. Resultados de la producción en las fallas de la vecindad superior.



La única forma de que se induzca la reactivación de las fallas dentro del yacimiento con la producción, es que estas se encuentren críticamente forzadas y se disminuyan sus esfuerzos tal que su tendencia al deslizamiento sea el valor del coeficiente de fricción estático de la falla.

Para las fallas que limitan el yacimiento o que presentan alguna barrera al flujo, la falla Yopal y la falla Cusiana. Se aprecia un cambio contrario al de las fallas dentro del yacimiento. Aunque estas se vuelven más estables, el cambio de dirección del esfuerzo horizontal máximo en 5° hacia el azimut de la falla hace que el esfuerzo de cizalla en lugar de disminuir aumente entre 0.2 y 0.3 MPa. Debido a que la rotación del esfuerzo horizontal máximo en cercanías a las fallas es pequeño, no se aprecia

un aumento significativo, pero donde la depleción sea tal que el cambio del esfuerzos sea considerable como para generar reactivación, las fallas sello perderán su capacidad de retener fluidos y se puede presentar una disminución en las reservas.

Para estudiar el efecto en las fallas de la vecindad superior del yacimiento. Se consideraron las secciones de fallas en la parte superior del yacimiento de las fallas en estudio. Donde se ve el mismo comportamiento que tienen las fallas límites del yacimiento, sino con la diferencia, de que el aumento del esfuerzo de cizalla es menor, de 0,1 MPa. Esto respalda la teoría de que el cambio en los esfuerzos fuera del yacimiento es mínimo comparado con los del interior del yacimiento. Para que estas secciones de las fallas se vean afectadas estas deben de estar en equilibrio friccional, es decir próximas a reactivarse.

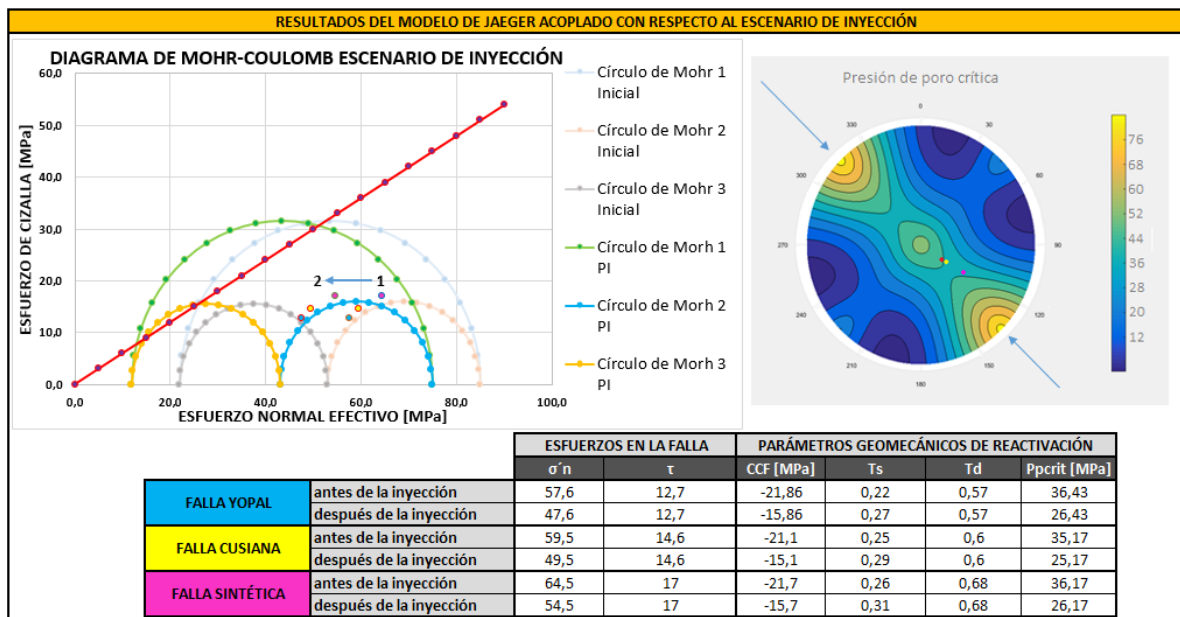
Ahora se presentan los resultados obtenidos por el escenario de inyección propuestos (figura 36).

Los resultados mostrados por el diagrama de Mohr-Coulomb sobre el comportamiento de los esfuerzos actuando en el plano de fallas durante el proceso de inyección, exponen una tendencia hacia la reactivación. Esto se debe a la disminución de los esfuerzos normales efectivos por el aumento de la presión de poro en los planos de las fallas.

La resistencia friccional del plano disminuye, lo que se traduce en valores del parámetro de reactivación CFF, más bajos. Debido a que no se considera ningún tipo de deformación de la roca. Los esfuerzos poroelásticos no existen, y la única componente que afecta el cambio del estado de esfuerzos, son los esfuerzos

efectivos. Esto además quiere decir, que el esfuerzo de cizalla no se ve afectado por la inyección, permaneciendo constante. Lo que respalda el aumento del valor en la tendencia al deslizamiento. En el diagrama polar se muestran las orientaciones de fallas para las cuales existirá una menor presión de poro crítica. Es decir, que cualquier aumento en la presión reactivara la falla. La falla Cusiana y la falla Yopal, poseen una presión crítica relativamente alta, esto les permite soportar aumentos de presión considerables sin tener riesgo de reactivación durante la inyección.

**Figura 36.** Resultados del proceso de inyección en el campo.



## 5 CONCLUSIONES

- Se demostró que el modelo de Jaeger permite una evaluación completa al determinar los valores de los esfuerzos que actúan en el plano de falla, por lo que es posible, aplicar los diferentes parámetros geomecánicos de reactivación de fallas, consiguiendo un estudio integral de la estabilidad de la falla, en comparación con los resultados del modelo de Jaeger.
- Se logró analizar el potencial de reactivación de las fallas ubicadas dentro, en los costados y en la vecindad superior de un yacimiento depletado, acoplando el modelo de reactivación de fallas seleccionado, con los cambios que sufren los esfuerzos que actúan en dichas zonas del yacimiento por la depleción.
- De los resultados obtenidos por el modelo acoplado en el ejercicio de aplicación, se comprobó que las fallas límites del yacimiento tienen gran capacidad de sello debido a que presentan altos valores de presión de poro crítica. Lo que las hace estables a cualquier perturbación de presión de poro.
- Se evidenció a partir del análisis de sensibilidad del modelo acoplado que la reactivación de fallas por la producción solo es posible en yacimientos bajo régimen de esfuerzos normales. Mientras, la reactivación de las fallas en procesos de inyección es factible en cualquiera de los tres regímenes de esfuerzos.
- se diseñó un diagrama de flujo que permite observar la metodología para el análisis de fallas en yacimientos depletados.

## 6 RECOMENDACIONES

- Debido a que solo se consideran los cambios en la presión de poro dentro del yacimiento para el análisis de reactivación de las fallas, sería interesante realizar un análisis introduciendo variables que permitan determinar de qué depende este cambio de la presión de poro, por ejemplo, la composición de los fluidos, las propiedades del yacimiento, la tasa de producción. Con el objetivo de asociar el potencial de reactivación a estas variables y obtener un análisis más completo del fenómeno de reactivación de fallas.
- Realizar una metodología para el análisis de reactivación utilizando métodos de simulación numérica que permitan analizar escenarios más completos como las dimensiones de la falla, la geometría del yacimiento y las rocas circundantes y un comportamiento porelastoplástico del yacimiento.
- Se recomienda hacer una calibración o validación en campo del modelo si se cuenta con datos de eventos sísmicos actuales disponibles, como el número, la magnitud y el tiempo los de microsismos en la zona, el comportamiento de la presión con el tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

ADDIS, M. A. The Geology of Geomechanics: Petroleum Geomechanical Engineering in Field Development Planning. *The Geological Society of London*. 2017. 23 p.

ADUSHKIN, Vitaly. Seismicity in the Oil Field. *Oilfield Review*. 2000, Vol. 12, No. 1, 16 p.

AROGUN, Olubunmi y FOKKER, Peter. Geomechanical Assessment of Fault Slip and Top Seal Integrity for a Deepwater Turbidite Field Development. *Society of Petroleum Engineers*. 2015. 8 p.

BARTON, Colleen; ZOBACK, Mark y MOOS, Daniel. Fluid Flow along Potentially Active Faults in Crystalline Rock. *Geology*. 1995, Vol. 23, No. 8, p. 683-686.

BRADY, B. y BROWN, E. Rock Mechanics: for Underground Mining. 3 ed. Sydney: George Allen, 2005. 645 p. ISBN 978-94-011-6503-7.

BRAJA, Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. 4 ed. México D.F.: Cengage Learning, 2013. 630 p. ISBN 978-607-519-373-1.

DUNAYEVSKY, V.; MYERS, M. y BENNETT, M. Reservoir Pressure Depletion Induced Exterior Fault Activation. *American Rock Mechanics Association*. 2010. 6 p.

DUSSEAULT, Maurice. BRUNO, Michael y BARRERA, John. Casing Shear: Causes, Cases, and Cures. *Society of Petroleum Engineers*. 2001. 10 p.

ERNERST, Anderson. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain. Edimburgo: Oliver y Boyd, 1951. 206 p.

FERNANDEZ, Fermín y CASTILLO, David. Assessing Stability of Reservoir Bounding Faults While Drilling. *Society of Petroleum Engineers*. 2010. 10 p.

FJAER, E. et al. Petroleum Related Rock Mechanics. 2 ed. Amsterdam: Elsevier, 2008. 483 p. ISBN 978-0-444-50260-5.

FROHLICH, Cliff, et al. A Historical Review of Induced Earthquakes in Texas. *Seismological Research Letters*. 2016, Vol. 87, No. 4, p. 2–4.

FRYDMAN, M. et al. Reducing Fault Reactivation Risk on Deepwater Drilling. *Society of Petroleum Engineers*. 2017 p.

GALIBIN, A.; GRIGORYAN, S. y MUKHAMEDIEV, A. Model of Induced Seismicity Caused By Water Injection. *Society of Petroleum Engineers*. 1998. 8 p.

GOULTY, N. R. Reservoir Stress Path during Depletion of Norwegian Chalk Oilfields. *Petroleum Geoscience*. 2003. p. 233-241.

HAMAD, Rashid; MOHAMMED, Faisal y GILL, Harmohan. Identifying, Characterizing and Locating Conductive Faults: Multi-Well Analysis Approach. *Society of Petroleum Engineers*. 2005. 7p.

J. Erick. Rapid Subsidence over Oil Fields Measured by SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*. 1998, Vol. 25, No. 17, p. 3215 – 3218.

JAEGER, John; COOK, Neville y ZIMMERMAN, Robert. Fundamentals of Rock Mechanics. 4 ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007. 469 p. ISBN 978-0-632-05759-7.

JAMES, W. Dally y WILLIAM, F. Riley. Experimental Stress Analysis. Tokyo: McGraw-Hill, 1965. 345 p.

JIANMIN, Yin; XIFENG, Guo y YUNFANG, Liu. Rock Stress and Earthquakes. Study on Characteristics of In-Situ Stress Affected by Faults. Londres: Furen Xie, 2010. pp. 291-294. ISBN 978-8-0-415-60165-8.

JONES, Richard, et al. Geomechanical Fault Characterization: Impact on Quantitative Fault Seal Risking. *Society of petroleum Engineers*. 2002. 8p.

KING, Geoffrey; STEIN, Ross y LIN, Jian. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *The Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. 46 p.

LECLERE, Henri y FABBRI, Oliver. A New Three-dimensional Method of Fault Reactivation Analysis. Elsevier. 2012. 10 p.

LELE, S. y DASARI, G. Geomechanical Analysis of Fault Reactivation Due to Hydraulic Fracturing. *American Rock Mechanics Association*. 2017. 7 p.

LILLO, Javier y OYARZUN, Roberto. Geología Estructural Aplicada a la Minería y Exploración Minera: Principios Básicos. Madrid: Ediciones GEMM, 2013. 210 p.

MEHRAN, S. y AMINZADEH, F. Effects of the Earth Characteristics on Induced Seismicity Potential. *Society of Petroleum Engineers*. 2016. 7 p.

MEIXNER, Jorg, et al. Slip and Dilation Tendency Analysis: Implications for Geothermal Exploration in the Upper Rhine Graben. *Institute für Nukleare Entsorgung*. 2013. 5 p.

MORRIS, Alan; FERRILL, David y HENDERSON, Brent. Slip Tendency Analysis and Fault Reactivation. *Geology*. 1996, Vol. 24, No.3, p. 275-278.

MUKUHIRA, Y., et al. Stress State Analysis of a Fault Plane with Large Induced Seismicity. *American Rock Mechanics Association*. 2016. 7 p.

MULDERS, Marie. Modelling of Stress development and fault Slip in and Around a Producing Gas Reservoir. Delft, 2003, 288 p. Thesis to obtain the degree of Doctor. Delft University of technology.

N. Last, et al. An Integrate Approach to Evaluate and Managin Wellbore Stabiliti in the Cusiana Field, Colombia, South America. *Society of Petroleum Engineers*. 1995. 14 p.

NACHT, Pedro, et al. Investigation of Geological Fault Reactivation and Opening. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*. 2010. p. 8687-8697.

National Research Council. Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2012. 263 p. ISBN 978-0-309-25367-3.

OSORIO, J.G.; PEÑUELA, G. y OTALORA, O. Correlation Between Microseismicity and Reservoir Dynamics in a Tectonically Active Area of Colombia. *Society of Petroleum Engineers*. 2008. 14 p.

OZAN, C.; BRUDY, M. y VAN DER ZEE, W. Fault Reactivation due to Fluid Production and Injection in Compacting Reservoirs. *American Rock Mechanics Association*. 2011. 7 p.

P. A. Charles, et al. Understanding the Present day In-Situ State of Stress in the Cusiana Field – Colombia. *Society of Petroleum Engineers*. 1998. 8 p.

PETER M. Mechanisms of Reservoir Induced Seismicity. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2000. 6 p.

RAFIEEPOUR, Saeed, et al. Experimental Study of Reservoir Stress Path and Hysteresis During Depletion and Injection Under Different Deformational Conditions. *American Rock Mechanics Association*. 2017. 10 p.

RUTQVIST, J., et al. Estimating Maximum Sustainable Injection Pressure during Geological Sequestration of CO<sub>2</sub> Using Coupled Fluid Flow and Geomechanical Fault Slip Analysis. Elsevier. 2006. 10 p.

SAFARI, M. et al. Effects of Depletion/Injection Induced Stress Changes on Natural Fracture Reactivation. *American Rock Mechanics Association*. 2013. 20 p.

SEGALL, Paul. Poroelastic Stressing and Induce Seismicity near the Lacq Gas Oil Field, Southwestern France. *Journal of Geophysical Research*. 1994, Vol. 99, No. B8, p. 424 – 438.

SEGALL, P. y FITZGERALD, S. D. A Note on Induced Stress Changes in Hydrocarbon and Geothermal Reservoirs. *Tectonophysics*. 1996, Vol. 289, p. 117–128.

SFONDRINI, G. y STERLACCHINI, S. Influence of Joint Roughness on Discontinuity Shear Strength. *International Society for Rock Mechanics*. 1996. 8 p.

SHEN, X; DIAZ, A. y BAI, M. A Study of Stress Rotation in Formations: Occurrences, Mechanisms, and Numerical Simulation. *American Rock Mechanics Association*. 2011. 9 p.

SOLTANZADEH, Hamidreza. Geomechanical Analysis of Caprock Integrity. Saskatoon, 2009, 242 p. Thesis (Doctorate of Philosophy). University of Saskatchewan. Department of Civil and Geological Engineering.

SOTO, L. et al. Gas-Injection Redistribution Revitalize a Mature Volatile Oil Field: Cusiana Field Case Study. *Society of Petroleum Engineers*. 2006. 7 p.

SUCKALE, Jenny. Advances and Geophysics. Induced Seismicity in Hydrocarbon Fields. Cambridge: Elsevier, 2009. 171 p. ISBN 978-0-12-374911-6.

TWISS, Robert y MOORES, Eldridge. Structural Geology. 2 Ed. New York: W. H. Freeman, 2006. 532 p. ISBN 978-0-716-74951-6.

WANG, Chaoyi y ELSWORTH, Derek. Numerical Investigation of the effect of frictionally Weak Minerals on Shear strength of Fault. *American Rock Mechanics Association*. 2016. 6 p.

WIPRUT, D. y ZOBACK, M. Fault Reactivation and Fluid Flow along a Previously Dormant Normal Fault in the Northern North Sea. *Geology*. 2000, Vol. 28, No. 7, p. 595-598.

WIPRUT, D. y ZOBACK, M. Fault Reactivation, Leakage Potential and Hydrocarbon Column Heights in the Northern North Sea. *Elsevier Science*. 2002, p. 203-219.

XU, S.; NIETO, A. y ALANIZ, S. 3D Mohr Diagram to Explain Reactivation of Pre-existing Planes due to Changes in Applied Stresses. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2010. 7p.

YAWEI, ChunMing et al. Evaluation of Fault Sealing Ability and Prediction of Fault Critical Reactivation Pressure in Water Flooding Reservoir. *Society of Petroleum Engineers*. 2014. 9 p.

ZOBACK, Mark D. Reservoir Geomechanics. New York: Cambridge University Press, 2007. 445 p. ISBN 978-0-521-77069-9.

ZOBACK, Mark y ZINKE, Jens. Production-Induced Normal Faulting in the Valhall and Ekofisk Oil Fields. *Pure & Applied Geophysics*. 2002. p. 403-420.

