

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EFECTO FISICOQUÍMICO DE LOS FLUIDOS DE  
PERFORACIÓN BASE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO  
MECÁNICO DE LAS ROCAS LUTÍICAS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Meza H., Ezequiel  
para optar al Título  
de Ingeniero Químico

*Caracas, 2008*

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EFFECTO FISICOQUÍMICO DE LOS FLUIDOS DE  
PERFORACIÓN BASE AGUA EN EL COMPORTAMIENTO  
MECÁNICO DE LAS ROCAS LUTÍICAS**

TUTORES: Ing. Francisco J. Volpicella  
          Profa. Nólides Guzmán  
          Prof. Alí Lara

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Meza H., Ezequiel  
para optar al Título  
de Ingeniero Químico

*Caracas, 2008*

Caracas, noviembre de 2008

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Ezequiel Enrique Meza Hidalgo, titulado:

**“Efecto Fisicoquímico de los Fluidos de Perforación Base Agua en el Comportamiento Mecánico de las Rocas Lutíticas”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Luis García  
Jurado



Ing. Leonardo Graterol  
Jurado

Profa. Nólides Guzmán  
Tutora Académica

Prof. Ali Lara  
Tutor Académico

Ing. Francisco Volpicella  
Tutor Industrial



Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

## MENCIÓN HONORÍFICA

Nosotros los abajo firmantes, integrantes del Jurado Evaluador del Trabajo Especial de Grado titulado **“Efecto Físicoquímico de los Fluidos de Perforación Base Agua en el Comportamiento Mecánico de las Rocas Lutíticas”** realizado por el Bachiller Ezequiel E. Meza H., bajo la tutoría de los Profesores Nólides Guzmán y Alf Lara, de la Escuela de Ingeniería Química, y Francisco Volpicella de PDVSA-INTEVEP, hemos decidido conferirle **Mención Honorífica**, porque el trabajo contribuye de manera significativa a la creación de conocimiento en el estudio del comportamiento mecánico de las rocas lutíticas, para el desarrollo de la formulación de fluidos de perforación base agua que minimicen el impacto ambiental. Adicionalmente, por la excelente presentación, por la elevada calidad y nivel de su contenido.

Dado en Caracas a los catorce días del mes de Noviembre de 2008

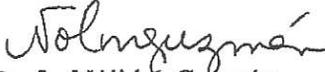
  
Ing. Leonardo Graterol  
Jurado

  
Prof. Luis V. García B  
Jurado

  
Francisco Volpicella  
Tutor Industrial

  
Prof. Alf Lara  
Tutor Académico



  
Profa. Nólides Guzmán  
Tutor Académico

*A Miriam,  
alfarera de mi existencia.*

*A Venezuela,  
cuna de mis sueños.*

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar, agradezco a mi madre, Miriam Claret, por su inagotable entrega. Todo lo que hoy es, fuera nada sin ella. A mi familia, con quienes he aprendido el verdadero valor de esa palabra. Ellos han puesto ante mis ojos un mundo de honradez y han envuelto con amor todos mis pasos. Entre tantos nombro a Cecilia y Carlos, sus hombros me conocen bien; a mi Ita Ángela, ejemplo de constancia.*

*A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, que ha llenado mi vida de Artes y Ciencia desde el nacer. Única que con nubes vence sombras y con su reloj catapulta azules ideas desde una tierra que no es de nadie, hacia una que de todos debe ser. Junto a sus guacamayas volarán por siempre mis recuerdos.*

*Al Ing. Leonardo Graterol, por haber confiado en mí para la realización de esta investigación junto al grupo que lidera. Al Ing. Francisco Javier Volpicella, sin cuya constante orientación técnica no hubiera sido posible esta tesis. A la Profesora Nólides Guzmán, bloque esencial de este trabajo, por su dedicación y empeño para conmigo, incluso estando lejos. Al Profesor Alí Lara, quien con su experiencia pudo ayudarme a plasmar incontables ideas en estas páginas.*

*A mi novia, María Virginia Carrero. Por su denuedo, por su incondicional apoyo y compañía, por caminar conmigo. Fue protagonista su luz en las largas noches de este trabajo.*

*A mis hermanos, Luis Edgardo Novoa, Iván Oliveira, Fradel Pacheco y Alejandro Guédez. Por su lealtad y por estar ahí, no más lejos de donde un grito alcanza.*

*A mis amigas, Aura Carballo y Graziana Valletta, por su enorme paciencia. Con ellas emprendí el viaje, y ahora comparto la cima.*

*A todo el Grupo de Estabilidad de Hoyo de PDVSA-INTEVEP, en especial a Juan Almeida, Antonio Bravo y Patricia Gil, quienes sin mezquindad contribuyeron enormemente a la realización de este trabajo. Por todo el apoyo técnico que gracias a sus conocimientos pudieron prestarme, debo agradecer a Martín Solfo, Héctor González, Jhon Quiroz y Felipe Quintero. A mis compañeros, Cioly Gari, Zulenny Urdaneta, Raquelisa Arellano, Michael Lerch y Giuseppe Vacca, quienes contribuyeron a la creación de un ambiente ideal para la investigación.*

*A todos los buenos amigos que han marcado mi paso por la UCV, por haber sido protagonistas de tantas discusiones fructíferas, trabajo duro y jocosas tertulias que hacen inolvidable esta etapa de mi vida. Son vivo ejemplo de camaradería y abnegación.*

*Por su inspiración y entrega, agradezco a todos los hombres y mujeres que hacen ciencia en los institutos y universidades de nuestro país.*

**Meza Hidalgo, Ezequiel E.**

**EFFECTO FISICOQUÍMICO DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE  
AGUA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS ROCAS LUTÍICAS**

**Tutor Industrial: Ing. Francisco Volpicella. Tutores Académicos: Profa. Nólides Guzmán, Prof. Alí Lara. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2008, 98 p.**

**Palabras Claves:** Estabilidad de Hoyos, Lodos de Perforación, Lutitas, Interacción Roca-Fluido.

**Resumen.** En el área de perforación de petróleo, la inestabilidad de hoyo en lutitas es el problema de mayor importancia, representando altos costos y pérdidas de tiempo. Una de sus principales causas es la interacción fisicoquímica entre los fluidos de perforación base agua y los minerales de arcilla.

Con la finalidad de entender la problemática antes mencionada, enmarcado en un proyecto de investigación de PDVSA-INTEVEP, se desarrolló este trabajo, el cual pretende evaluar variaciones en parámetros mecánicos y características petrográficas de rocas lutíticas expuestas a distintas soluciones salinas durante un tiempo determinado. La determinación de dichos parámetros permitirá el desarrollo de aditivos inhibitorios para ser usados en la formulación de fluidos de perforación base agua de alto desempeño. Para esto fue utilizado una muestra lutítica de la formación Carapita y KCl como aditivo. La metodología empleada consistió en la caracterización petrográfica de la roca en su estado inicial. Luego de ser expuesta a agua destilada y soluciones de KCl entre 2 y 5% , se llevaron a cabo ensayos uniaxiales sobre todas las muestras para establecer su comportamiento esfuerzo-deformación, al igual que la caracterización final para determinar cambios en la estructura rocosa debidos a la variación de la concentración del catión  $K^+$ .

De los resultados obtenidos se pudo observar que existe un desplazamiento del agua presente en el fluido externo hacia la matriz de la roca debido a los fenómenos de ósmosis e hinchamiento, y que de los fluidos estudiados, la solución de KCl al 3,5% es la que evidenció una menor interacción con la sección lutítica del Núcleo SBC-140, disminuyendo a su vez el flujo de agua hacia la formación. Se pudo constatar el carácter inhibitorio del Cloruro de Potasio, se recomienda el uso de ensayos triaxiales en futuros estudios con otros aditivos para observar la alteración de la envolvente de falla de la lutita debida a éstos, así como la realización de las pruebas con los fluidos de perforación base agua usados actualmente en el país, con el fin de conocer las interacciones fisicoquímicas que actualmente ocurren durante la perforación.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	IX
<b>CAPÍTULO I: Fundamentos de la Investigación.....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema .....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Antecedentes.....	4
<b>CAPÍTULO II: Marco Teórico .....</b>	<b>6</b>
2.1. Lutitas .....	6
2.1.1. <i>Generalidades de las Lutitas.</i> .....	6
2.1.2. <i>Descripción de los Minerales de Arcilla.</i> .....	7
2.1.3. <i>Hidratación de Algunos Tipos de Arcilla.</i> .....	8
2.1.4. <i>Origen de los Minerales de Arcilla y Fenómenos Asociados.</i> .....	10
2.2. Fluidos de Perforación .....	12
2.2.1. <i>Funciones de los Fluidos de Perforación</i> .....	13
2.2.2. <i>Propiedades de los Fluidos de Perforación.</i> .....	17
2.2.3. <i>Composición de los Fluidos de Perforación.</i> .....	21
2.3. Mecánica de Rocas. ....	22
2.3.1. <i>Orientación y Magnitud de los Esfuerzos in situ</i> .....	23
2.3.2. <i>Esfuerzos Inducidos Alrededor del Hoyo.</i> .....	25
2.3.3. <i>Relaciones Esfuerzo-Deformación.</i> .....	26
2.3.4. <i>Criterios de Falla de la Roca</i> .....	27

2.4. Problemas Asociados a la Perforación de Lutitas. _____	28
2.4.1 <i>Desintegración de los Recortes.</i> .....	29
2.4.2. <i>Embolamiento de la Mecha.</i> .....	30
2.4.3. <i>Inestabilidad de Hoyo.</i> .....	30
2.5. Factores Fisicoquímicos en la Inestabilidad del Hoyo. _____	31
2.5.1. <i>Ósmosis.</i> .....	32
2.5.2. <i>Hinchamiento de Arcilla.</i> .....	34
2.5.3. <i>Intercambio Catiónico.</i> .....	36
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....</b>	<b>38</b>
3.1. Revisión Bibliográfica. _____	38
3.2. Selección de las Muestras _____	38
3.3. Caracterización Previa de la Muestra _____	40
3.3.1. <i>Estudios Mineralógicos</i> .....	40
3.3.2. <i>Contenido de Humedad</i> .....	42
3.3.4. <i>Determinación de la Estructura Rocosa.</i> .....	43
3.4. Determinación de las Concentraciones de KCl a Utilizar. _____	46
3.5. Método de Interacción _____	48
3.6. Ensayos Mecánicos _____	49
3.6.1 <i>Preparación de las Muestras.</i> .....	49
3.6.2. <i>Determinación de la Resistencia a la Compresión No Confinada (UCS)</i> .....	50
3.7. Caracterización Final de la Muestra _____	51
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>52</b>
4.1. Caracterización Previa de la Muestra _____	52

4.1.1. <i>Difracción de Rayos X (XRD)</i> .....	52
4.1.2. <i>Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)</i> .....	55
4.1.3. <i>Termogravimetría (TGA)</i> .....	59
4.1.4. <i>Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC)</i> .....	60
4.1.5. <i>Área Superficial y Porosidad. Método BET</i> .....	61
4.1.6. <i>Porosidad. Método de Intrusión de Mercurio.</i> .....	63
4.2. <b>Hinchamiento Lineal</b> _____	66
4.3. <b>Ensayos Mecánicos</b> _____	68
4.4. <b>Caracterización Final de la Muestra</b> _____	73
4.4.1. <i>Difracción de Rayos X (XRD)</i> .....	73
4.4.2. <i>Termogravimetría (TGA)</i> .....	74
4.4.3. <i>Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC)</i> .....	76
4.4.4. <i>Área Superficial y Porosidad. Método BET</i> .....	77
4.4.5. <i>Porosidad. Método de Intrusión de Mercurio.</i> .....	79
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES</b> .....	<b>82</b>
<b>CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES</b> .....	<b>85</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>87</b>
<b>APÉNDICES</b> .....	<b>91</b>
APÉNDICE I: GLOSARIO _____	91
APÉNDICE II: FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL _____	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Afloramiento de estratos lutíticos.....	7
<b>Figura 2.</b> Corte transversal de lutita altamente consolidada.....	7
<b>Figura 3.</b> Modelo de un cristal de Caolinita.....	8
<b>Figura 4.</b> Modelo de un cristal típico de Clorita.....	8
<b>Figura 5.</b> Interacción molecular agua-arcilla.....	10
<b>Figura 6.</b> Interacción molecular agua-arcilla luego de alcanzar una carga de esfuerzo alta.....	10
<b>Figura 7.</b> Esquema básico de perforación mostrando el sistema del fluido de perforación.....	12
<b>Figura 8.</b> Representación gráfica de los esfuerzos <i>in situ</i> .....	24
<b>Figura 9.</b> Representación gráfica de las fuerzas intergranulares.....	24
<b>Figura 10.</b> Representación gráfica de los esfuerzos inducidos alrededor del hoyo... ..	25
<b>Figura 11.</b> Diagrama esfuerzo-deformación.....	27
<b>Figura 12.</b> Criterio de falla de Mohr-Coulomb.....	28
<b>Figura 13.</b> Representación de una sección del hoyo con inestabilidad.....	31
<b>Figura 14.</b> Representación de la hidratación de los cationes intercapa.....	35
<b>Figura 15.</b> Ilustración de la procedencia de los núcleos disponibles.....	39
<b>Figura 16.</b> Microscopía Electrónica de Barrido.....	42
<b>Figura 17.</b> TriStar. Equipo de adsorción.....	46

<b>Figura 18.</b> AutoPore IV. Micromeritics. ....	46
<b>Figura 19.</b> Ofite Linear Swellmeter. ....	47
<b>Figura 20.</b> Mineralogía total inicial de la muestra del núcleo SBC-140.....	53
<b>Figura 21.</b> Distintas imágenes del Núcleo SBC-140 obtenidas mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	56
<b>Figura 22.</b> Imagen de SEM (E) para EDX. ....	58
<b>Figura 23.</b> Análisis EDX sobre los puntos identificados en la imagen E. ....	58
<b>Figura 24.</b> Termograma inicial de la muestra de lutita. ....	60
<b>Figura 25.</b> Gráfica de Capacidad de Intercambio Catiónico.....	61
<b>Figura 26.</b> Isotherma de adsorción de N <sub>2</sub> para la muestra inicial de lutita. ....	62
<b>Figura 27.</b> Distribución de tamaño de poro para la muestra inicial. ....	63
<b>Figura 28.</b> Curva de intrusión de Mercurio para la muestra sin alterar. ....	64
<b>Figura 29.</b> Curva de distribución de tamaño de poro para la muestra inicial. ....	65
<b>Figura 30.</b> Resultados de la prueba de Hinchamiento Lineal. ....	67
<b>Figura 31.</b> Curvas esfuerzo-deformación de los tapones con orientación vertical. ...	69
<b>Figura 32.</b> Módulo de Young para cada tapón vertical.....	70
<b>Figura 33.</b> Relación de Poisson para cada tapón vertical.....	70
<b>Figura 34.</b> Curva esfuerzo-deformación de los tapones con orientación horizontal..	71
<b>Figura 35.</b> Módulo de Young para cada tapón horizontal. ....	72

<b>Figura 36.</b> Relación de Poisson para cada tapón horizontal. ....	72
<b>Figura 37.</b> Comparación de los resultados del análisis por XRD. ....	73
<b>Figura 38.</b> Curvas termogravimétricas de las distintas muestras de lutita. ....	75
<b>Figura 39.</b> Coeficiente de Intercambio Catiónico para las distintas muestras de lutita. .....	76
<b>Figura 40.</b> Curvas de Adsorción de N <sub>2</sub> sobre las distintas muestras de lutita.....	77
<b>Figura 41.</b> Valores de área superficial específica para las distintas muestras de lutita. .....	78
<b>Figura 42.</b> Valores de diámetro de poro promedio para las distintas muestras de lutita. ....	79
<b>Figura 43.</b> Curvas de intrusión de Mercurio para las distintas muestras de lutita. ....	80
<b>Figura 44.</b> Porosidad para cada una de las muestras de lutita.....	81
<b>Figura 45.</b> Lavado de las muestras previo a los ensayos petrográficos. ....	95
<b>Figura 46.</b> Lavado de las muestras previo a los ensayos petrográficos. ....	95
<b>Figura 47.</b> Proceso de corte de los tapones a las dimensiones requeridas .....	95
<b>Figura 48.</b> Proceso de refrentado de las caras de los tapones .....	95
<b>Figura 49.</b> Interacción roca-fluido .....	96
<b>Figura 50.</b> Interacción roca-fluido .....	96
<b>Figura 51.</b> Tapón horizontal luego de la interacción con KCl 3,5%.....	96
<b>Figura 52.</b> Tapón horizontal luego de la interacción con KCl 2%.....	96

<b>Figura 53.</b> Tapón vertical antes de ser ensayado en la celda uniaxial .....	97
<b>Figura 54.</b> Proceso de enchaquetamiento de los tapones .....	97
<b>Figura 55.</b> Preparación de los ensayos uniaxiales.....	97
<b>Figura 56.</b> Tapón en celda uniaxial.....	97
<b>Figura 57.</b> Tapón vertical luego del ensayo uniaxial. ....	98
<b>Figura 58.</b> Tapón vertical luego del ensayo uniaxial. ....	98
<b>Figura 59.</b> Tapón horizontal luego del ensayo uniaxial.....	98
<b>Figura 60.</b> Tapón horizontal luego del ensayo uniaxial.....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Mineralogía total inicial del núcleo SBC-140.....	52
<b>Tabla 2.</b> Mineralogía de Arcillas inicial del núcleo SBC-140 .....	54
<b>Tabla 3.</b> Resultado del Análisis Elemental EDX durante el estudio SEM. ....	59
<b>Tabla 4.</b> Comparación de resultados de porosimetría. ....	66
<b>Tabla 5.</b> Pruebas uniaxiales para todos los tapones ensayados. ....	72
<b>Tabla 6.</b> Composición de arcillas para las distintas muestras de lutita. ....	74

## LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

### Dimensiones Fundamentales:

<b><i>F</i></b> :	Fuerza
<b><i>M</i></b> :	Masa
<b><i>L</i></b> :	Longitud
<b><i>T</i></b> :	Temperatura
<b><i>θ</i></b> :	Tiempo

### Símbolos Arábigos:

<b>C</b> :	Cohesión. $[C] = F/L^2$
<b>E</b> :	Módulo de Young. $[E] = F/L^2$
<b><i>l<sub>i</sub></i></b> :	Longitud inicial. $[l_i] = L$
<b>P<sub>h</sub></b> :	Presión de hinchamiento. $[P] = F/L^2$
<b>P<sub>p</sub></b> :	Presión de poro. $[P] = F/L^2$
<b>pm</b> :	Peso de la muestra. $[pm] = M$
<b>V</b> :	Volumen. $[V] = L^3$
<b>S<sub>BET</sub></b> :	Área Superficial específica calculada usando el método BET. $[S_{BET}] = L^2/M$
<b><i>t<sub>i</sub></i></b> :	Diámetro inicial. $[t_i] = L$

### Símbolos Griegos:

<b><math>\epsilon_t</math></b> :	Deformación transversal. $[\epsilon_t] = (\text{Adimensional})$
<b><math>\epsilon_z, \epsilon_{ax}</math></b> :	Deformación axial. $[\epsilon_z] = (\text{Adimensional})$
<b><math>\Delta_l</math></b> :	Variación de longitud. $[\Delta_l] = L$
<b><math>\Delta_t</math></b> :	Variación de diámetro. $[\Delta_t] = L$
<b><math>\sigma_v</math></b> :	Esfuerzo de sobrecarga total. $[\sigma] = F/L^2$
<b><math>\sigma'_v</math></b> :	Esfuerzo de sobrecarga efectivo. $[\sigma] = F/L^2$

$\sigma'_h$ :	Esfuerzo horizontal mínimo efectivo. $[\sigma] = F/L^2$
$\sigma'_H$ :	Esfuerzo horizontal máximo efectivo. $[\sigma] = F/L^2$
$\sigma_r$ :	Componente radial del esfuerzo en un hoyo. $[\sigma] = F/L^2$
$\sigma_\theta$ :	Componente tangencial del esfuerzo en un hoyo. $[\sigma] = F/L^2$
$\sigma_z, \sigma_{ax}$ :	Componente vertical del esfuerzo en un hoyo. $[\sigma] = F/L^2$
$\tau$ :	Esfuerzo de corte. $[\tau] = F/L^2$
$\nu$ :	Relación de Poisson. $[\nu] = (\text{Adimensional})$
$\phi$ :	Ángulo de fricción.

#### Abreviaturas:

<b>BET:</b>	Método para determinar el área superficial específica de un sólido diseñado por Brunauer, Emmet y Teller en 1938.
<b>CAOL:</b>	Mineral de caolinita.
<b>CEC:</b>	Capacidad de Intercambio Catiónico ( <i>Cation Exchange Capacity</i> )
<b>CLO:</b>	Mineral de clorita.
<b>EDX:</b>	Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos X ( <i>Energy Dispersive Using X-Ray</i> )
<b>HPWBM:</b>	Fluido de Perforación Base Agua de Alto Desempeño ( <i>High Performance Water Based Mud</i> ).
<b>OBM:</b>	Fluido de Perforación Base Aceite ( <i>Oil Based Mud</i> ).
<b>PPTT:</b>	Ensayo de Transmisión de Presión de Poro ( <i>Pore Pressure Transmission Test</i> ).
<b>ROP:</b>	Tasa de Penetración ( <i>Rate of Penetration</i> ). $[\text{ROP}] = L/\theta$
<b>SEM:</b>	Microscopía Electrónica de Barrido ( <i>Scanning Electron Microscopy</i> )
<b>S/I:</b>	Sin interacción.
<b>TGA:</b>	Análisis por Termogravimetría. ( <i>Thermogravimetric Analysis</i> ).
<b>TVD:</b>	Profundidad Vertical Verdadera ( <i>True Vertical Depth</i> ). $[\text{TVD}] = L$
<b>UCS:</b>	Resistencia a la Compresión No-Confinada ( <i>Unconfined Compressive Strength</i> ). $[\text{UCS}] = F/L^2$

**WBM:** Fluido de Perforación Base Agua (*Water Based Mud*).  
**XRD:** Difracción de Rayos X (*X-Ray Diffraction*)

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las lutitas son rocas sedimentarias que constituyen el 75% de las secciones perforadas mundialmente (*Tan et al, 1998*). La inestabilidad de hoyo en las formaciones lutíticas es considerado como el problema técnico de mayor importancia en el área de perforación en la industria petrolera, siendo fuente principal de pérdidas de tiempo y representando entre 12 y 15% de los costos de perforación promedio alrededor del mundo (*Fam et al, 1998*). Varios autores en la década de los noventa reconocieron que los fluidos de perforación juegan un rol importante al reducir o ser detonantes de problemas de inestabilidad en estas formaciones.

La ciencia petrolera ha tenido grandes avances en los últimos años en comprender los mecanismos responsables de la inestabilidad de las lutitas y problemas consecuentes, tales como: la incorporación de sólidos de formación al fluido de perforación, taponamiento de las líneas de flujo, embolamiento de la mecha, pegas y atascamientos de tuberías, pérdidas de circulación, derrumbes de las paredes del hoyo y hasta un eventual colapso total del hoyo. A pesar de estos avances, hasta el momento no ha sido posible identificar una solución única y sencilla para resolver los problemas relacionados con inestabilidad de hoyo en lutitas.

Actualmente, en Venezuela se evitan los problemas antes mencionados utilizando fluidos de perforación base aceite debido a la buena estabilidad proporcionada por este tipo de fluidos. Este comportamiento es atribuido en parte a la formación de una membrana semipermeable ideal en la interfaz roca/fluido de la perforación, la cual previene el paso de iones disueltos y moléculas (*Tan et al, 1999*), y al establecer la cantidad necesaria de solutos en el lodo, es posible controlar la ósmosis química y el consecuente hinchamiento o hidratación de la roca.

Sin embargo, debido a los efectos ambientales negativos, el uso de este tipo de fluido de perforación ha sido revisado y se incentiva utilizar fluidos base agua, a pesar de que el desempeño global comparado de éste es menos eficiente. Es por esto que a nivel mundial se están haciendo esfuerzos continuos para desarrollar fluidos de perforación base agua que proporcionen un comportamiento de membrana osmótica y una estabilidad de hoyo similar a la que se obtendría utilizando un fluido base aceite (*Carminati et al, 2001*).

El presente trabajo de investigación pretende estudiar los efectos fisicoquímicos que tienen los fluidos de perforación base agua sobre el comportamiento mecánico de las lutitas, con el fin de ayudar en la formulación de un fluido de perforación base agua que pueda ser empleado en futuras perforaciones en el país, especialmente costa afuera, proporcionando estabilidad al hoyo y disminuyendo los efectos ambientales.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. General:**

Estudiar los efectos fisicoquímicos de los fluidos de perforación base agua sobre las formaciones lutíticas, para generar nuevos enfoques en la formulación de lodos de perforación base agua.

### **1.2.2. Específicos:**

- Determinar la composición mineralógica de las muestras de lutita disponibles.
- Determinar las características petrográficas de muestras de lutita en estado de preservación inicial.
- Determinar la concentración de KCl ideal para que la roca en estudio presente el menor efecto de hinchamiento.
- Determinar el comportamiento esfuerzo-deformación de muestras de lutita en estado de preservación inicial.
- Determinar el comportamiento esfuerzo-deformación de muestras de lutita, expuestas a interacciones químicas con agua destilada y soluciones de KCl a distintas concentraciones.
- Determinar cambios en el comportamiento mecánico de las rocas luego de la interacción con agua destilada y soluciones de KCl.
- Determinar cambios en la composición mineralógica de muestras de lutita sometidas a interacciones químicas con agua destilada y soluciones de KCl.
- Determinar cambios en las características petrográficas de muestras de lutita sometidas a interacciones con agua destilada y soluciones de KCl.
- Determinar la concentración de sal ideal con la cual la muestra de lutita mantiene mayor estabilidad.

### 1.3. ANTECEDENTES

Debido a la urgente necesidad de utilizar fluidos de perforación que tengan un menor impacto ambiental, como son los base agua, y tomando en cuenta la inestabilidad que éstos generan en las formaciones arcillosas, numerosos estudios se han llevado a cabo a nivel internacional para comprender a fondo los mecanismos de interacción entre estos fluidos y las rocas lutíticas. *Eric van Oort (2003)* sintetiza muchos de estos avances en su trabajo.

En 1994, *van Oort* planteó una técnica a utilizar en el estudio de inestabilidad del hoyo, el Ensayo de Transmisión de Presión de Poro (PPTT), el cual permitía obtener buenos valores de permeabilidad en las lutitas. El año siguiente, *van Oort et al* concluyeron que las lutitas actuaban como una membrana imperfecta que permitía el flujo osmótico de agua y propusieron que se explotara esta propiedad de las lutitas para mejorar la formulación de fluidos de perforación base agua.

Otra técnica fue propuesta en 1997 por *Santos et al* llamada Prueba de Reactividad de Lutita. Ésta evalúa la reactividad de una roca cuando está en contacto con un fluido usando una celda triaxial para reproducir esfuerzos del hoyo *in situ*. Los resultados expuestos en su trabajo demuestran que este ensayo provee información mucho más detallada acerca del comportamiento de la roca que los ensayos de medición de presión de hinchamiento que se llevaban a cabo hasta ese momento.

*Fam y Dusseault (1998)* identificaron los procesos de intercambio másico debido a diferenciales de potencial químico como una de las principales causas de inestabilidad en lutitas. Ese mismo año, *Santos y Rogiers* plantearon un nuevo enfoque para estudiar la estabilidad de lutitas, basándose en un estudio comprensivo de los cambios energéticos en el hoyo, tomando en cuenta cambios en la energía mecánica, energía térmica y energía de tensión. En su trabajo argumentan que utilizando este enfoque, más información es recabada para lograr un mejor entendimiento de los mecanismos de falla en las formaciones.

En 1999, en unos informes obtenidos como resultado de un trabajo en conjunto con la empresa Petrobras, la Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro reporta una serie de resultados para distintas fases del estudio de los efectos de la interacción entre fluidos de perforación base agua y rocas lutíticas, como la etapa de caracterización de lutitas, ensayos triaxiales y ensayos de difusión. Algunas recomendaciones que se dieron en estos informes han sido muy pertinentes en la investigación que se lleva a cabo, especialmente en el desarrollo del procedimiento experimental.

*Tveit (2003)* y *Nes (2004)* desarrollaron en Noruega varios estudios de factibilidad para utilizar muestras más pequeñas de lutita en las celdas triaxiales, tomando en cuenta que uno de los principales obstáculos en este tipo de investigación es la poca disponibilidad de material lutítico bien preservado.

Utilizando de nuevo una celda triaxial y ensayos con invasión de fluido, *Al-Bazali et al (2006)* determinaron que la eficiencia de membrana de las lutitas es directamente proporcional a la capacidad de intercambio catiónico y la permeabilidad de la roca.

Este Trabajo Especial de Grado se apoyará en estos logros que a nivel mundial han abierto una ventana en el área de estabilidad de hoyo, para intentar dar un nuevo enfoque en el desarrollo de tecnología de perforación en nuestro país.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. LUTITAS

Las lutitas constituyen más del 75% de las secciones perforadas con fines de producción de petróleo, por lo cual la estabilidad en este tipo de roca es un tema de estudio de gran importancia (*Tan et al, 1998*). Actualmente se llevan a cabo a nivel mundial discusiones acerca de los mecanismos que causan los cambios en la estabilidad y cómo se pueden modelar. Es necesario conocer un poco acerca de la mineralogía de algunas arcillas para entender mejor los principales mecanismos que ocurren cuando la lutita interactúa con los fluidos de perforación.

##### 2.1.1. Generalidades de las Lutitas.

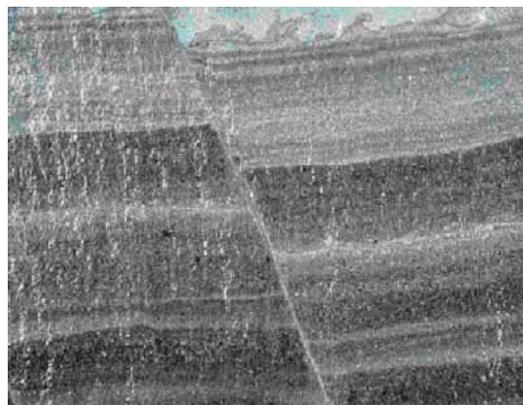
Las lutitas son rocas sedimentarias de grano fino formadas por la consolidación de arcilla, limo o lodo, y se caracterizan por poseer una estructura laminar. Las lutitas cubren un amplio rango de composiciones, pero están constituidas principalmente por minerales de arcilla y minerales accesorios como el cuarzo, los carbonatos y los feldespatos.

Las lutitas se caracterizan por poseer una baja permeabilidad, debido entre otras cosas a los pequeños diámetros de poro. La permeabilidad, por lo general, se encuentra en el orden de los nanodarcies ( $10^{-6}$  D) aunque puede oscilar entre  $10^{-6}$  y  $10^{-12}$  D. El tamaño de poro también es muy pequeño, oscila entre 1 y 10 nm, y disminuye con la profundidad al igual que sucede con otras rocas. Como consecuencia, los mecanismos de transporte tanto hacia adentro como hacia afuera de la formación son muy lentos.

Las rocas sedimentarias son el tipo de roca más común en la superficie terrestre, siendo la lutita la roca sedimentaria más abundante. Debido a que los minerales de arcilla son los principales constituyentes de las lutitas, son los minerales más abundantes en la superficie del planeta (con la posible excepción del cuarzo) (*Eslinger et al, 1980*).



**Figura 1.** Afloramiento de estratos lutíticos. Puede observarse la estructura laminar.



**Figura 2.** Corte transversal de lutita altamente consolidada.

### 2.1.2. Descripción de los Minerales de Arcilla.

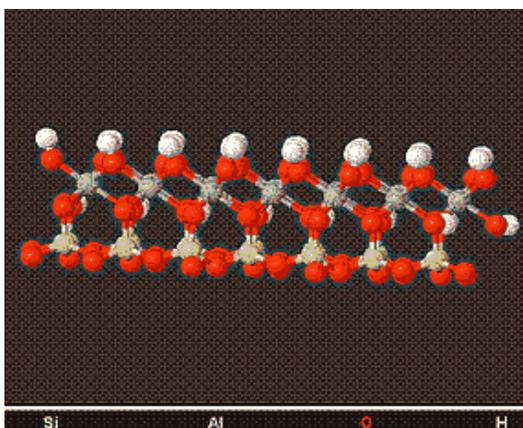
Se definen las arcillas, desde el punto de vista granulométrico, como sólidos coloidales cuyo tamaño es normalmente menor a las 2  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, esta definición tampoco es del todo correcta desde el punto de vista mineralógico: los minerales de arcilla pueden poseer partículas mayores a 2  $\mu\text{m}$ , así como también otros minerales de tamaño menor pueden estar presentes junto con la arcilla, como el cuarzo u óxidos de Titanio o Hierro (*Durand et al, 1995*). Desde el punto de vista ingenieril, la arcilla se diferencia por tener la propiedad de la plasticidad, además de endurecerse a altas temperaturas (*Eslinger et al, 1980*).

Los minerales de arcilla están hechos de combinaciones de dos unidades estructurales simples, el tetraedro de Silicio y el octaedro. La estructura de la arcilla se basa en planos de Oxígeno y/o grupos hidroxilo, arreglados para formar láminas que son tetraédricas si los cationes internos son Silicio, u octaédricas si los cationes internos son Aluminio, Hierro, o Magnesio. La fórmula general de estas unidades es  $(\text{Si}_2\text{O}_5^{2-})$  para el tetraedro y  $(\text{Al}_2(\text{OH})_6)_n$  o  $((\text{Fe},\text{M})_3(\text{OH})_6)_n$  para la lámina octaédrica.

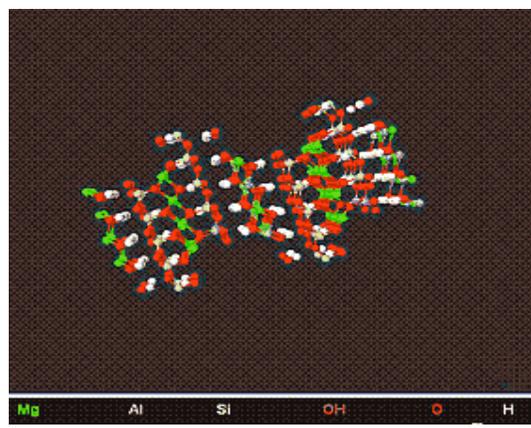
Los grupos de arcilla se diferencian en el empaquetamiento de estas láminas y por la manera en que son enlazadas. Las láminas de arcilla se arreglan de tal manera de formar capas constituidas por combinaciones de una lámina tetraédrica y una

octaédrica, o bien una tetraédrica, una octaédrica y nuevamente una tetraédrica (Sánchez et al, 2001).

El catión Silicio  $\text{Si}^{4+}$  presente en las láminas tetraédricas puede ser reemplazado por otro tipo de cationes de menor valencia, en un proceso conocido como sustitución isomórfica. Igualmente, este fenómeno puede ocurrir con el catión Aluminio  $\text{Al}^{3+}$  de las láminas octaédricas, siempre por cationes de similar tamaño y coordinación. Este proceso genera estructuras con una carga neta negativa permanentemente, la cual es balanceada por la adsorción de cationes externos del medio, que pueden o no ser intercambiables (Sánchez et al, 2001). Como se verá más adelante, la cantidad y localización de los cationes intercambiables determinan las características de hinchamiento de la arcilla en agua.



**Figura 3.** Modelo de un cristal de Caolinita.



**Figura 4.** Modelo de un cristal típico de Clorita

En las Figuras 3 y 4 se muestran modelos de dos de los minerales de arcilla más comunes. En ellos se puede observar la estructura tetraédrica y octaédrica. Estos minerales forman estructuras laminares que son visibles en el Microscopio Electrónico.

### 2.1.3. Hidratación de Algunos Tipos de Arcilla.

La arcilla más simple, la pirofilita, está formada por la superposición de dos láminas tetraédricas, entre las cuales existe una lámina octaédrica que contiene cationes  $\text{Al}^{3+}$ .

La estructura de la pirofilita es eléctricamente neutra, y las láminas están conectadas entre sí mediante enlaces de van der Waals. La sustitución de los cationes  $\text{Si}^{4+}$  en la lámina tetraédrica por  $\text{Al}^{3+}$  crea una carga negativa, que es compensada por la adsorción de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) y agua entre las capas. Este nuevo tipo de estructura es característico de las esmectitas, entre las cuales se destacan las montmorillonitas. La elevada área superficial de las esmectitas (entre 700 y 800  $\text{m}^2/\text{g}$ ), permite intercalar un gran número y variedad de cationes intercambiables, lo que se refleja en una elevada capacidad de intercambio catiónico, característica de esta familia de arcillas. Esta capacidad de intercambio catiónico es la responsable de la elevada capacidad de adsorción de agua (hinchamiento) de las esmectitas al entrar en contacto con un medio acuoso. El hinchamiento de las esmectitas depende de la naturaleza de los cationes intercambiables, de la localización y cantidad de las sustituciones isomórficas, y del tamaño de la partícula de la esmectita (*Sánchez et al, 2001*).

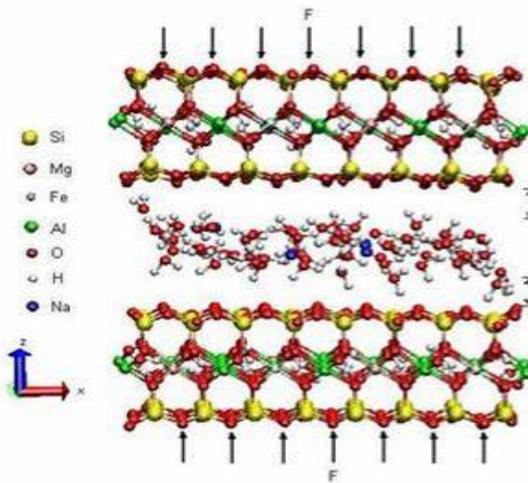
Posteriores sustituciones de los cationes  $\text{Si}^{4+}$  por  $\text{Al}^{3+}$  incrementan el desbalance eléctrico y permiten que los iones calcio y potasio puedan colocarse en el espacio entre las capas. La arcilla pierde su capacidad para adsorber agua y puede cambiar gradualmente a otro tipo de mineral, la ilita, que pertenece a la familia de las micas.

La caolinita es otro constituyente de la lutita. Este mineral es una variante puramente aluminosa como la pirofilita, con la diferencia de que la estructura de la caolinita es asimétrica, y posee mejor estabilidad termodinámica que la esmectita. En su estructura las cargas eléctricas se encuentran balanceadas, existen muy pocas sustituciones y fuertes enlaces de hidrógeno entre las capas de la celda unitaria, evitando el hinchamiento de esta arcilla (*Sánchez et al, 2001*).

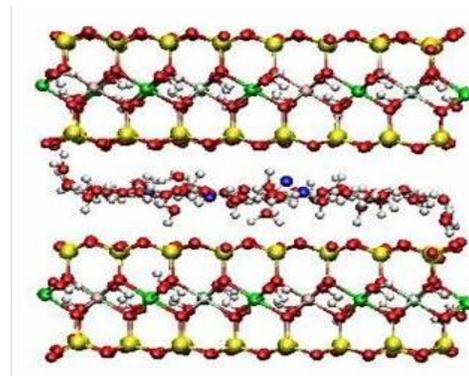
En resumen, la capacidad de intercambio catiónico de la esmectita es mayor que la de la ilita, y estas a su vez mayores que la de la caolinita. En el caso de las arcillas con baja capacidad de intercambio catiónico, la sustitución de los cationes intercambiables ejerce poco efecto sobre las características de hinchamiento y las

propiedades mecánicas de la roca. Sin embargo, en el caso de las arcillas con alta capacidad de intercambio catiónico, el reemplazo de los cationes intercambiables por otros cationes provenientes del fluido de perforación u otro medio extraño puede afectar notablemente las características de hidratación de la arcilla así como las propiedades mecánicas. Por ejemplo, las esmectitas que poseen cationes intercambiables polivalentes como el calcio y el magnesio, o bien las que poseen el catión potasio, tienden a hincharse menos que las que poseen otros cationes monovalentes como el sodio.

En la Figura 5 se muestra un modelo de interacción molecular agua-arcilla en la intercapa de un cristal de esmectita sujeta a un esfuerzo externo. Luego de alcanzar una carga de esfuerzos lo suficientemente alta, las dos capas de agua colapsan en una sola, como se muestra en la Figura 6.



**Figura 5.** Interacción molecular agua-arcilla.



**Figura 6.** Interacción molecular agua-arcilla luego de alcanzar una carga de esfuerzo alta

#### 2.1.4. Origen de los Minerales de Arcilla y Fenómenos Asociados.

Una alta proporción de arcillas en suelos y sedimentos han sido formadas por la descomposición mecánica de minerales preexistentes en las rocas. Éstas son

denominadas arcillas detríticas e incluyen micas de altas temperaturas de esquistos y otras rocas metamórficas, cuarzo, feldespato y minerales de arcilla reciclados.

Los procesos químicos de formación deben ser comprendidos por dos mecanismos: la neoformación, definida como precipitación de una solución, y la transformación, proceso a través del cual el nuevo mineral hereda una gran parte de su esqueleto de silicato de un mineral preexistente, usualmente un polisilicato. Estos dos mecanismos no siempre son distinguibles el uno del otro, e incluyen descomposición química en los suelos, formación de minerales autigénicos en el sitio de deposición del sedimento, formación de minerales diagenéticos después de la deposición, y minerales arcillosos formados por alteración hidrotérmica (*Eslinger et al, 1980*).

Los minerales de arcilla sufren los efectos de la presión y la temperatura desde su enterramiento y su posterior transformación en lutitas. Durante este proceso de compactación, se expulsa el agua y se observa un aumento en la dureza del material. Al mismo tiempo comienzan a ocurrir las reacciones diagenéticas, en particular la conocida transición de esmectita a ilita. La combinación de estos cambios conduce a una disminución general de la reactividad de la lutita, que puede caracterizarse por la capacidad de intercambio catiónico y su tendencia de hidratación (*Eslinger et al, 1980*).

El agua se encuentra presente en los depósitos de arcilla en dos formas, como agua libre en los poros, y como agua de hidratación o interlaminar, que es sostenida más fuertemente dentro de la estructura de capas de las lutitas. La liberación del agua interlaminar de las esmectitas se debe a los efectos combinados de temperaturas, actividad iónica y en menor grado, a la presión. La cantidad de agua interlaminar que se libera de esta manera depende de la capacidad de adsorción de las esmectitas, la cual varía de acuerdo a la composición de las mismas (*Sánchez et al, 2001*).

A medida que la esmectita se transforma gradualmente en ilita, el agua adsorbida se libera en forma de agua libre, que se incorpora al agua de poro. Esta adición puede llegar a generar presiones anormales adicionales cuando la permeabilidad de los sedimentos suprayacentes es suficientemente baja.

La composición química del sistema afecta el proceso de conversión de esmectita a ilita. Una concentración muy alta de cationes potasio  $K^+$  favorece la conversión a ilita a poca profundidad. Por el contrario, la carencia de cationes potasio retarda el proceso de conversión y hace que la formación conserve las capas mixtas de ilita/esmectita hasta mayores profundidades (Eslinger et al, 1980).

## 2.2. FLUIDOS DE PERFORACIÓN

La completación exitosa de un pozo depende considerablemente de las propiedades del fluido de perforación. El costo del fluido en sí es relativamente pequeño, pero la escogencia del fluido correcto y el mantenimiento de sus propiedades mientras se perfora tienen gran influencia en los costos del pozo (Darley, 1988).

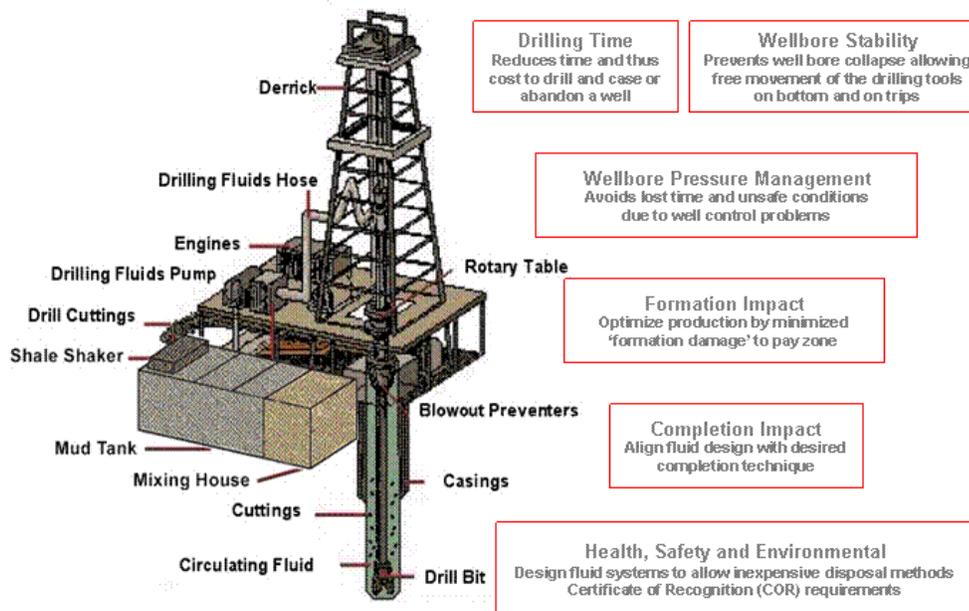


Figura 7. Esquema básico de perforación mostrando el sistema del fluido de perforación

Un fluido de perforación, o lodo, es cualquier fluido que en una operación de perforación es bombeado desde la superficie hasta el fondo del hoyo a una determinada presión vía el circuito descendiente formado por la tubería de descarga de la bomba, el tubo del paral, la manguera, la junta rotatoria, la junta Kelly, la sarta de perforación y la mecha para ascender a la superficie por el espacio anular creado

por la pared del hoyo y el perímetro exterior de la sarta de perforación. La figura 7 muestra un esquema del sistema de fluido de perforación.

### 2.2.1. Funciones de los Fluidos de Perforación (*MI Drilling Fluids, 2001*).

Las principales funciones de un fluido de perforación se nombran a continuación:

- *Remoción de los recortes del pozo.*

Los recortes de perforación o ripios deben ser retirados del pozo a medida que son generados por la mecha. El fluido de perforación arrastra y transporta los recortes hasta la superficie, al subir por el espacio anular. La limpieza del hoyo depende del tamaño, forma y densidad de los recortes, la velocidad de penetración (ROP), la rotación de la columna de perforación, así como de la viscosidad, densidad y velocidad anular del fluido de perforación.

- *Control de las presiones de formación.*

Una función básica del fluido de perforación es controlar las presiones de la formación para garantizar una operación de perforación segura. Típicamente, a medida que la presión de la formación aumenta, se aumenta la densidad del fluido de perforación para equilibrar las presiones y mantener la estabilidad del hoyo.

- *Suspensión y descarga de recortes.*

Los fluidos de perforación deben suspender los recortes de perforación, los materiales densificantes y los aditivos bajo una amplia variedad de condiciones, sin embargo deben permitir la remoción de los recortes por un equipo de control de sólidos.

- *Obtención de las formaciones permeables.*

Cuando la presión de la columna de lodo es más alta que la presión de formación, el filtrado invade la formación y un revoque se deposita en la pared del pozo. Los sistemas de fluido de perforación deberían estar diseñados para depositar sobre la formación un delgado revoque de baja permeabilidad con el fin de limitar la invasión de filtrado. Esto mejora la estabilidad del pozo y evita numerosos

problemas de perforación y producción. Los posibles problemas relacionados con un grueso revoque y la filtración excesiva incluyen las condiciones de hoyo estrecho o “*tight hole*”, registros de mala calidad, mayor torque y arrastre, tuberías atascadas, pérdidas de circulación y daños a la formación.

- *Mantenimiento de la estabilidad del hoyo.*

La estabilidad del pozo constituye un equilibrio complejo de factores mecánicos y químicos. La composición química y las propiedades del fluido de perforación deben combinarse para proporcionar un pozo estable hasta que se pueda introducir y cementar la tubería de revestimiento.

- *Minimización de los daños a la formación.*

La protección del yacimiento contra daños que podrían perjudicar la producción es muy importante. Cualquier reducción de la porosidad o permeabilidad natural de una formación productiva es considerada como daño a la formación. Estos daños pueden producirse como resultado de la obturación causada por el lodo o los sólidos de perforación, o de las interacciones químicas y mecánicas con la formación.

- *Enfriamiento, lubricación y sostenimiento de la mecha y del conjunto de perforación.*

Las fuerzas mecánicas e hidráulicas generan una cantidad considerable de calor por fricción en la mecha y en las zonas donde la columna de perforación rotatoria roza contra la tubería de revestimiento y el pozo. La circulación del fluido de perforación enfría la mecha y el conjunto de perforación, alejando este calor de la fuente y distribuyéndolo en todo el pozo. Además de enfriar, el fluido de perforación lubrica la columna de perforación, reduciendo aún más el calor generado por fricción.

El fluido de perforación también ayuda a soportar una porción del peso de la columna de perforación o tubería de revestimiento mediante la flotabilidad. Cuando una columna de perforación o una tubería de revestimiento está

suspendida en el fluido de perforación, una fuerza igual al peso del lodo desplazado la mantiene a flote, reduciendo la carga del gancho en la torre de perforación.

- *Transmisión de la energía hidráulica a las herramientas y a la mecha.*

La energía hidráulica puede ser usada para maximizar la velocidad de penetración (ROP), mejorando la remoción de recortes en la mecha. Esta energía también alimenta los motores de fondo que hacen girar la mecha y las herramientas de medición al perforar así como de registro.

- *Asegurar la evaluación adecuada de la formación.*

Durante la perforación, se controla la circulación del lodo y de los recortes para detectar indicios de petróleo o gas. Se examinan los recortes para determinar la composición mineral, la paleontología y detectar cualquier indicio visual de hidrocarburos. También son realizados registros eléctricos para evaluar la formación con el fin de obtener información adicional. Los registros con cable incluyen la medición de las propiedades eléctricas, sónicas, nucleares y de resonancia magnética de la formación para identificar la litología y los fluidos de la formación.

Todos estos métodos de evaluación son afectados por el fluido de perforación. Por ejemplo, si los recortes se dispersan en el lodo, no se tendrá nada que evaluar en la superficie. Si el transporte de los ripios no es bueno, será difícil determinar la profundidad a la cual se generaron los mismos. Los lodos a base de aceites ocultarán los indicios de hidrocarburos en los recortes. Ciertos registros eléctricos son eficaces en fluidos conductores, mientras que otros lo son en fluidos no conductores. Los lodos que contienen altas concentraciones iónicas de potasio perjudican el registro de la radioactividad natural de la formación. Por estas razones, la selección del lodo requerido para perforar un pozo está basada en el tipo de evaluación a realizar.

▪ *Control de la corrosión.*

Los componentes de la columna de perforación y tubería de revestimiento que están en constante contacto con el fluido de perforación están propensos a varias formas de corrosión. Los gases disueltos como el oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno, pueden causar graves problemas de corrosión, tanto en la superficie como en el fondo del pozo. En general, un bajo pH agrava la situación. Por lo tanto, una función importante del fluido de perforación es mantener la corrosión a un nivel aceptable. La aireación del lodo, formación de espuma y otras condiciones de oxígeno ocluido pueden causar graves daños por corrosión en poco tiempo. Cuando se perfora en ambientes de alto contenido de sulfuro de hidrógeno, se recomienda usar fluidos de alto pH, combinado con un secuestrador como el zinc, ya que el H<sub>2</sub>S puede causar una falla rápida y catastrófica de la columna de perforación.

▪ *Facilitar la cementación y completación.*

El fluido de perforación debe producir un pozo dentro del cual la tubería de revestimiento pueda ser introducida y cementada eficazmente, y que no dificulte las operaciones de completación. La cementación es crítica para el aislamiento eficaz de la zona y la completación exitosa del pozo. Durante la introducción de la tubería de revestimiento, el lodo debe permanecer fluido y minimizar el suabeo y pistoneo de manera que no se produzca ninguna pérdida de circulación inducida por las fracturas. El lodo debería tener un revoque fino y liso. Para que se pueda cementar correctamente la tubería de revestimiento, todo el lodo debería ser desplazado por los espaciadores, los fluidos de limpieza y el cemento. El desplazamiento eficaz del lodo requiere que el pozo tenga una baja viscosidad y bajas resistencias de gel no progresivas. Las operaciones de completación tales como la perforación y la colocación de filtros de grava también requieren que el hoyo tenga un diámetro casi uniforme y puedan ser afectadas por las características del lodo.

- *Minimizar el impacto sobre el medio ambiente.*

Con el tiempo, el fluido de perforación se convierte en desecho y debe ser eliminado de conformidad con los reglamentos ambientales locales. Lo más deseable es la utilización de fluidos de bajo impacto ambiental, para que puedan ser eliminados en la cercanía del pozo.

La mayoría de los países han establecido reglamentos ambientales locales para los desechos de fluidos de perforación. Los fluidos a base de agua, a base de aceite, anhidros y sintéticos están sujetos a diferentes consideraciones ambientales y no existe ningún conjunto único de características ambientales que sea aceptable para todas las ubicaciones. Esto se debe principalmente a las condiciones complejas y cambiantes que existen por todo el mundo, como la ubicación y densidad de las poblaciones humanas, la situación geográfica local, altos o bajos niveles de precipitación, las proximidades del sitio de eliminación respecto a las fuentes de agua superficiales y subterráneas, la flora y fauna local, entre otras condiciones.

### **2.2.2. Propiedades de los fluidos de perforación (Darley et al, 1988).**

Los cambios en las propiedades del fluido de perforación se verán reflejados en la manera como cumplen algunas de las funciones mencionadas anteriormente. A continuación se detallará cómo afectan algunas de estas propiedades.

- *Densidad.*

La densidad es definida como masa por unidad de volumen. La presión que ejerce una columna estática de fluido depende tanto de la densidad como de la profundidad. Para prevenir el flujo de lodo hacia adentro de la formación y para formar un revoque delgado de baja permeabilidad en las paredes del hoyo, la presión de la columna de fluido debe exceder la presión de poro en al menos 200 psi o 14 kg/cm<sup>2</sup>.

Además de controlar los fluidos de formación, la presión de la columna de fluido en las paredes del hoyo ayuda a mantener la estabilidad del hoyo desnudo. En el

caso de formaciones plásticas, como arcillas no consolidadas, la presión del lodo es crucial.

La efectividad del fluido en su tarea de transportar los ripios hacia la superficie aumenta al aumentar su densidad, pero retarda el proceso de regeneración del fluido en la superficie.

Existe una tendencia natural para proteger el hoyo de llevar la densidad del fluido muy por encima de aquella que se necesita para controlar los fluidos de la formación, pero esto puede ser gravemente contraproducente. Primero, la densidad excesiva del fluido incrementa la presión en las paredes del hoyo a tal punto que el hoyo falla por tensión. Esta falla se conoce como fractura inducida.

Otra desventaja de tener densidades de lodo excesivas es su influencia en la velocidad de perforación (ROP). Experimentos de laboratorio han demostrado que la ROP es reducida al aumentar la diferencia entre la presión de la columna de fluido y la presión del fluido de poro, así como por la presión absoluta de la columna de lodo cuando se perforan rocas de baja permeabilidad. Esto también incrementa los riesgos de pegas de la tubería de perforación. Por último, densidades de fluido muy altas son una desventaja debido a que incrementan los costos de los fluidos de perforación innecesariamente.

- *Propiedades de flujo.*

Las propiedades de flujo del fluido de perforación es importante a la hora de llevar a cabo con éxito la operación de perforación. Estas propiedades son responsables de remover los ripios, pero influyen el progreso de la perforación de otras maneras. Un desempeño pobre puede traer problemas de embolamiento de la mecha, reducción de la ROP, ensanchamiento del hoyo, pegas de tuberías, pérdida de circulación y hasta un reventón.

El comportamiento del fluido está regido por los regímenes de flujo, la relación entre la presión y la velocidad. El flujo laminar prevalece a bajas velocidades y es

una función de las propiedades viscosas del fluido, y el régimen turbulento es influenciado por las propiedades de inercia del fluido y sólo indirectamente por la viscosidad.

Los fluidos de perforación no se comportan de acuerdo a las leyes de Newton, ya que poseen grandes cantidades de partículas de mayor tamaño que moléculas, por lo que entran en la clasificación general de fluidos no-newtonianos. Los fluidos con arcillas en suspensión, como soluciones de bentonita, si contienen un alto contenido de sólidos, se comportan aproximadamente de acuerdo con la teoría de flujo plástico de Bingham, que postula que es necesario un esfuerzo finito para iniciar el flujo, y que a mayores esfuerzos, el flujo será newtoniano. La mayoría de los fluidos de perforación evidencian un comportamiento intermedio entre plásticos ideales de Bingham y fluidos que siguen la Ley de la Potencia.

El conocimiento de algunos parámetros del fluido de perforación durante la perforación, como la viscosidad plástica, punto de cedencia, viscosidad aparente y resistencia de gel, provee la información necesaria para el control diario del lodo.

- *Propiedades de filtrado.*

Otro requerimiento esencial para la completación exitosa del hoyo es la habilidad del fluido de sellar formaciones permeables expuestas por la mecha con una fina capa de torta de filtrado de baja permeabilidad. Si no se forma este revoque, el fluido de perforación invadiría constantemente la formación.

Para que se forme un revoque, es esencial que el fluido contenga partículas de un tamaño un poco menor que el tamaño de las aberturas de poro de la formación. Estas partículas, conocidas como partículas de puenteo, quedan atrapadas en los poros de la superficie, mientras que las partículas más finas se adentran en la formación al principio. La zona donde quedaron atrapadas las partículas de puenteo en la superficie comienza progresivamente a atrapar partículas más finas, y en unos segundos, solamente líquido invade la formación.

La permeabilidad de la torta de filtrado depende de la distribución del tamaño de las partículas en el lodo y de las condiciones electromecánicas. En general, la presencia de sales diluibles en lodos con arcilla incrementa la permeabilidad de la torta, aunque algunos coloides orgánicos habilitan la baja permeabilidad de la misma, incluso en soluciones de sales saturadas.

- *pH.*

El control óptimo de algunos sistemas de fluidos de perforación se basa en el monitoreo del pH, al igual que la detección y tratamiento de algunos contaminantes. Por ejemplo, un lodo hecho con agua fresca y bentonita tendrá un pH entre 8 y 9. La contaminación por cemento elevará el pH a 10 u 11, y al tratarlo con ácido polifosfático disminuirá el pH de nuevo a 8. Otra razón para controlar el pH es la reducción de la corrosión.

- *Conductividad eléctrica.*

La resistividad eléctrica de los fluidos de perforación base agua es medida y controlada en cualquier momento que se desee, con el fin de permitir una mejor evaluación de las características de la formación por medio de registros eléctricos. Para disminuir la resistividad se utilizan sales, y para aumentarla solamente se añade agua fresca.

- *Lubricidad.*

Como se mencionó anteriormente, una de las funciones del lodo es lubricar la columna de perforación. La necesidad de lubricación se hace especialmente crítica en pozos direccionales o con cierta desviación, y especialmente para prevenir pegas de la tubería a las paredes del hoyo.

- *Corrosividad.*

Se ha determinado que la corrosión es la principal causa de las fallas en las tuberías de perforación. La corrosión en la superficie de la tubería de perforación

es monitoreada al colocar aros de acero en los empates y determinar la pérdida de masa luego de un tiempo establecido. Observar ante qué tipo de ataque por corrosión se está presente es a veces más importante que la medición de pérdida de masa. Por ejemplo, la corrosión por picadura tiene como síntoma una baja pérdida de peso comparada con la corrosión en general, pero es responsable de muchos casos de fallas de tuberías de perforación.

Al planificar la programación de fluidos de perforación se le debe prestar atención no sólo a los efectos corrosivos del lodo, sino también a los efectos causados por los aditivos inhibidores de corrosión, ya que existen algunos de estos aditivos que afectan severamente las propiedades de los fluidos de perforación base agua. La fuente de los agentes corrosivos, su composición y métodos para contrarrestar su acción se deben considerar al seleccionar un fluido de perforación.

### **2.2.3. Composición de los fluidos de perforación.**

Los fluidos de perforación están clasificados según su base como se muestra a continuación:

- *Fluidos de perforación base agua (WBM).*

El fluido de perforación más común está compuesto por agua y sustancia coloidal. Durante la perforación puede darse la oportunidad de que el contenido coloidal de ciertos estratos sirva para alimentar la mezcla pero hay estratos tan carentes de material coloidal que su contribución es nula. Por tanto, es preferible utilizar bentonita preparada con fines comerciales como la mejor fuente del componente coloidal del fluido. El fluido bentonítico es muy favorable para la formación del revoque sobre la pared del hoyo. Sin embargo, a este tipo de fluido hay que agregarle un material pesado como la baritina para que la presión que ejerza contra los estratos domine las presiones subterráneas que se estiman encontrar durante la perforación (*Darley et al, 1988*). Para mantener las características deseadas en este tipo de fluido, se recurre a la utilización de sustancias químicas como quebracho, soda cáustica, silicatos y arseniatos (*Barberii, 1983*).

- *Fluidos de perforación base aceite (OBM).*

En ciertos casos de perforación, terminación o reacondicionamiento de pozos se utilizan fluidos base aceite. En ocasiones se ha usado crudo liviano, pero la gran mayoría de las veces se emplea diesel u otro tipo de destilado pesado al cual hay que agregarle asfalto para impartirle consistencia y poder mantener en suspensión el material pesante y controlar otras características. Generalmente, este tipo de fluido contiene un pequeño porcentaje de agua que forma parte de la emulsión, que se mantiene con la adición de soda cáustica, cal cáustica u otro ácido orgánico. La composición del fluido puede controlarse para mantener sus características, así sea básicamente petróleo o emulsión (*Darley et al, 1988*).

Estos tipos de fluidos requieren un manejo cuidadoso, tanto por el costo, el aseo del taladro, el mantenimiento de sus propiedades químicas y el peligro de incendio (*Barberii, 1983*).

- *Gas.*

Los ripios son removidos por un flujo de aire o gas natural a alta velocidad. Agentes espumantes son añadidos para remover algunas invasiones de agua menores (*Barberii, 1983*).

Para disminuir costos de perforación y efectos ambientales, actualmente se está intentando desarrollar a nivel mundial fluidos de perforación base agua que tengan las mismas ventajas que los fluidos base aceite, como el bajo grado de corrosión y especialmente la propiedad de no desestabilizar significativamente la formación al perforar lutitas. Esto se pretende lograr formulando aditivos que puedan inhibir la reactividad de las lutitas, a la vez que permitan regular propiedades como densidad, viscosidad, régimen de flujo, alcalinidad y conductividad eléctrica.

### **2.3. MECÁNICA DE ROCAS.**

La mecánica de rocas se ocupa del estudio teórico y práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y de su respuesta ante la acción

de fuerzas aplicadas en su entorno físico. La finalidad de ésta es conocer y predecir el comportamiento de las rocas ante la actuación de las fuerzas externas que se ejercen sobre ellos. Cuando se excava un hoyo, se modifican las condiciones iniciales del medio rocoso, el cual responde a estos cambios deformándose y/o rompiéndose.

Es importante conocer el estado de tensiones y las deformaciones que puede llegar a soportar el material rocoso ante determinadas condiciones, ya que el comportamiento mecánico permite evaluar el diseño de la perforación, la cual modifica el estado de esfuerzos al que está sometido el macizo rocoso en un tiempo muy corto en relación a los procesos geológicos, y pueden tener lugar interacciones mutuas entre la liberación o redistribución de los esfuerzos naturales alterando la estabilidad de la formación.

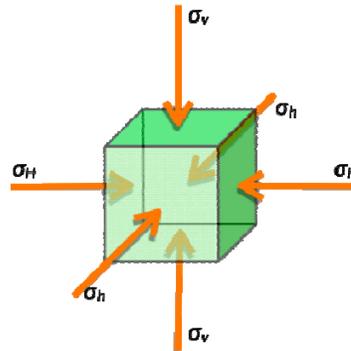
### **2.3.1. Orientación y Magnitud de los Esfuerzos *in situ***

La roca se encuentra sometida a un estado de esfuerzos antes de la perforación, los cuales se conocen como esfuerzos *in situ*: el esfuerzo de sobrecarga total ( $\sigma_v$ ), el esfuerzo de sobrecarga efectivo ( $\sigma'_v$ ), el esfuerzo horizontal mínimo efectivo ( $\sigma'_h$ ), y el esfuerzo horizontal máximo efectivo ( $\sigma'_H$ ). Normalmente, estos esfuerzos son compresivos debido al peso de la sobrecarga (Sánchez *et al*, 2002).

El esfuerzo de sobrecarga es la fuerza que se ejerce sobre la formación a una profundidad dada debido al peso total de la roca y los fluidos encima de esta profundidad. El valor típico de gradiente de sobrecarga es de 1 psi/pie. Generalmente se utiliza la integración de un registro de densidad para estimar el valor de esfuerzo de sobrecarga (González *et al*, 2002).

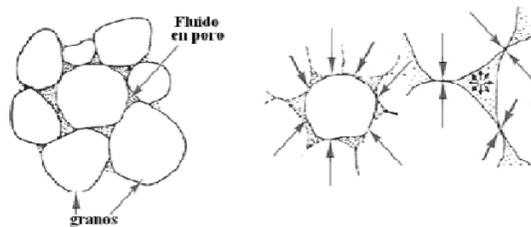
En la mayoría de las áreas de perforación, los esfuerzos horizontales suelen ser iguales. Sin embargo, cuando se perfora cerca de estructuras enormes como domos de sal o áreas tectónicas, los esfuerzos horizontales pueden diferir entre sí y se describen como componentes de esfuerzos mínimo y máximo. El esfuerzo horizontal mínimo se puede estimar a partir de un ensayo de integridad de formación (*leakoff test*) o de datos de microfracturamiento hidráulico. Es difícil determinar el esfuerzo horizontal máximo usando mediciones de campo, pero se puede estimar a partir de fallas en la

roca en la pared del hoyo y utilizando algún modelo de comportamiento de la roca (Sánchez *et al*, 2002).



**Figura 8.** Representación gráfica de los esfuerzos *in situ*.

Debido a la naturaleza porosa de las lutitas, y que éstas consisten en varios tipos de partículas distintas como arcillas, cuarzo y carbonatos, éstas reaccionan no sólo ante los esfuerzos totales sino también ante la presión de los fluidos en los poros. La presión de poro en las lutitas se debe a la presión hidrostática del agua localizada en los poros entre las distintas partículas. La presión de hinchamiento es distinta a la presión de poro, y se define como la presión de las moléculas de agua en la intercapa dentro de las partículas de esmectita (Nes, 2007).



**Figura 9.** Representación gráfica de las fuerzas intergranulares.

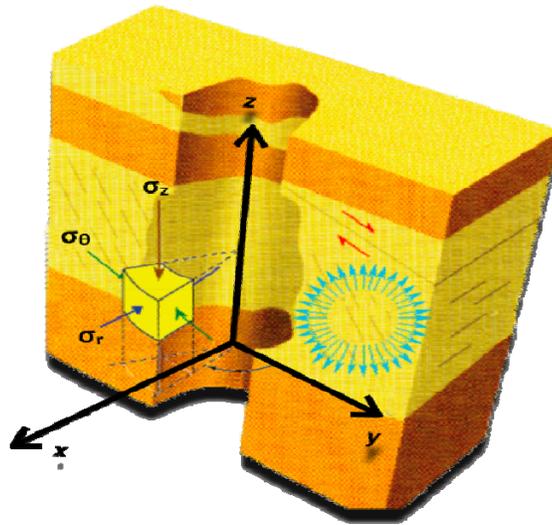
De ahí que el esfuerzo de sobrecarga efectivo dependa tanto de la presión de poro como de la presión de hinchamiento y venga dado por la diferencia entre el esfuerzo de sobrecarga total y la suma de la presión de poro y la presión de hinchamiento como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\sigma'_v = S_v - (P_p + P_h) \tag{I}$$

La presencia de un fluido de poro resulta en una disminución del esfuerzo compresivo. Si la presión de poro se incrementa lo suficiente, el esfuerzo efectivo se puede reducir a tal punto que se puede producir una falla en la roca y causar un colapso del hoyo (Sánchez *et al*, 2002).

### 2.3.2. Esfuerzos Inducidos Alrededor del Hoyo

A medida que se perfora el hoyo, el apoyo que suministraba la roca desaparece y es reemplazado por la presión hidrostática del fluido de perforación. Este cambio altera los esfuerzos alrededor del hoyo.



**Figura 10.** Representación gráfica de los esfuerzos inducidos alrededor del hoyo.

El esfuerzo en cualquier punto sobre las paredes del hoyo o en la cercanía, puede describirse ahora en coordenadas cilíndricas: una componente de esfuerzo radial que actúa a lo largo del radio del hoyo ( $\sigma_r$ ), una componente de esfuerzo tangencial que actúa alrededor de la circunferencia del hoyo ( $\sigma_\theta$ ), y una componente de esfuerzo axial que actúa paralelo a la dirección del hoyo ( $\sigma_z$ ). Normalmente, estos esfuerzos son compresivos y originan esfuerzos de corte en la roca; sin embargo, pueden llegar a ser esfuerzos de tracción dependiendo del peso del fluido de perforación, de los esfuerzos *in situ* y de la trayectoria del hoyo. Para garantizar la estabilidad mecánica de la roca estos esfuerzos deben ser lo más similares posibles (Sánchez *et al*, 2002).

### 2.3.3. Relaciones Esfuerzo-Deformación.

En ensayos con muestras de núcleos, las muestras son sometidas a un esfuerzo de confinamiento y la roca responde al esfuerzo bien sea por cambio en el volumen, por cambio de forma, o ambos. El cambio porcentual en el volumen o las dimensiones de la muestra debido a la aplicación de un esfuerzo es llamado deformación. En la Figura 11 se representa el resultado típico de un ensayo a través de la curva esfuerzo-deformación, en la cual se representa el esfuerzo aplicado axialmente como una función de la deformación axial de la muestra.

Esta curva se obtiene con ensayos de compresión que pueden ser uniaxiales o triaxiales. Si el esfuerzo radial o de confinamiento es igual a cero, se trata de un ensayo uniaxial, mientras que si el esfuerzo radial es diferente de cero, entonces es un ensayo triaxial. Mediante esta curva se pueden definir algunos conceptos importantes:

- Zona elástica: en esta zona la roca se deforma mientras es sometida a un esfuerzo, sin deformaciones permanentes. Bajo esta condición, la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado según la Ley de Hooke.
- Zona plástica: bajo esta condición, la roca retornará parcialmente a su forma original una vez que ese esfuerzo haya cesado, es decir, presenta deformaciones permanentes. Si se continúa aplicando el esfuerzo, la roca fallará (resistencia última).
- Punto de cedencia: es el punto por encima del cual las deformaciones serán permanentes. La muestra no retornará a su condición original.
- Resistencia a la compresión máxima: es el punto máximo de la curva. Si se obtiene de un ensayo uniaxial se denomina Resistencia a la Compresión Uniaxial (UCS).

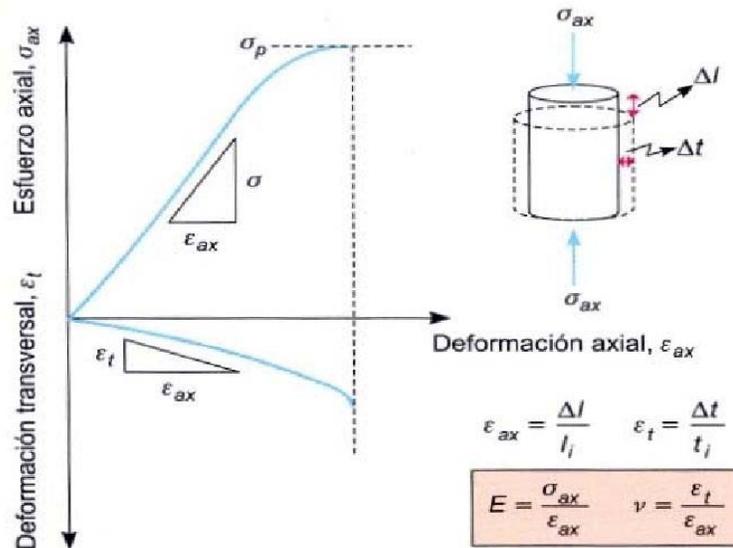


Figura 11. Diagrama esfuerzo-deformación.

Dentro del grupo de propiedades elásticas básicas se encuentran el módulo de Young y la relación de Poisson. Éstas son propiedades de rigidez de la roca.

- Módulo de Young (E): Es la relación existente entre el esfuerzo axial ( $\sigma_z$ ) y la deformación axial ( $\epsilon_z$ ), cuando se aplica una fuerza sobre la superficie de los extremos a una muestra cilíndrica de roca. En la zona elástica, existe una relación lineal entre  $\sigma_z$  y  $\epsilon_z$ , la cual se expresa tomando en cuenta la Ley de Hooke, como se observa en la ecuación (2):

$$\sigma_z = E \cdot \epsilon_z \quad (2)$$

- Relación de Poisson ( $\nu$ ): el diámetro de la muestra incrementa al aplicar un esfuerzo  $\sigma_z$ . La relación de Poisson es una medida de la deformación lateral ( $\epsilon_t$ ) con respecto a la contracción longitudinal ( $\epsilon_z$ ). Esto es:

$$\nu = - \epsilon_t / \epsilon_z \quad (3)$$

#### 2.3.4. Criterios de Falla de la Roca

Existen dos criterios ampliamente utilizados para describir el comportamiento de falla de las lutitas. Éstos son el criterio de falla de Mohr-Coulomb y el de Drucker Prager (Sánchez et al, 2002). Un modelo muy sencillo para la resistencia al corte ( $\tau$ ) de una

lutita es el de Mohr-Coulomb, el cual presenta una relación lineal con el esfuerzo normal ( $\sigma$ ), expresada por:

$$\tau = c + \sigma \tan\phi \quad (4)$$

En la ecuación (4), ( $c$ ) es la cohesión, mientras que la fricción intergranular está definida por el ángulo de fricción ( $\phi$ ). Estos parámetros se determinan a través de ensayos triaxiales que se realizan con núcleos de una misma profundidad, a varias presiones de confinamiento (Lal *et al*, 1996). La ecuación (4) permite observar que la resistencia al corte de la lutita no es constante, sino que depende del esfuerzo de confinamiento efectivo, como se muestra en la Figura 12.

La cohesión de una roca particular depende de varios parámetros, que incluyen el tamaño de partícula, la mineralogía y la cementación. El ángulo de fricción interna viene dado por la relación entre las resistencias al corte y compresiva de la roca a varias presiones de confinamiento (Sánchez *et al*, 2002).

Bajo un estado de esfuerzos *in situ*, el grado de compactación parece ser el factor dominante que determina la resistencia de la lutita, mientras que el contenido de arcilla de la lutita y la mineralogía de dicha arcilla son factores secundarios (Lal, 1999).

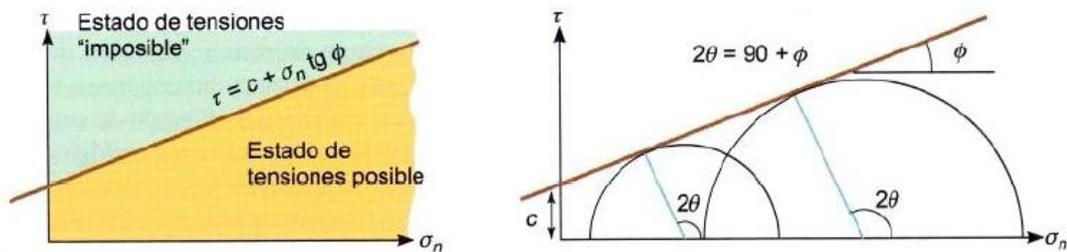


Figura 12. Criterio de falla de Mohr-Coulomb.

#### 2.4. PROBLEMAS ASOCIADOS A LA PERFORACIÓN DE LUTITAS.

Los problemas asociados a la perforación de las formaciones lutíticas incrementan significativamente los costos de construcción de pozos petroleros. Las pérdidas de

tiempo generadas por estos problemas están entre el 12 y 15 % de los costos de perforación promedio alrededor del mundo (Fam, 1998). Entre estos problemas, se encuentran: poco control de la densidad del fluido de perforación por incorporación de sólidos de formación, taponamiento de las líneas de flujo, embolamiento de la mecha, derrumbe de las paredes del hoyo, exceso de torque, pegas y atascamiento de tuberías, pérdidas de circulación, disminución en la eficiencia de limpieza y hasta colapso del hoyo.

Hasta el momento no ha sido posible identificar una solución única y sencilla para resolver los problemas relacionados con la perforación en lutitas. Todos los factores que afecten el estado de esfuerzos, la presión de poro y la resistencia mecánica de la lutita afectará la estabilidad del hoyo. Recientemente se han identificado tres factores bien diferenciados que influyen en estos problemas: los factores externos, como las malas prácticas operacionales, los factores mecánicos, que consideran la orientación y la magnitud de los esfuerzos *in situ*, y los fisicoquímicos, que se centran en mecanismos de transporte de fluidos y alteración química de la lutita (Sánchez et al, 2002).

Se ha propuesto subdividir los problemas ocasionados por la inestabilidad de lutitas en tres categorías: desintegración de recortes, embolamiento de la mecha e inestabilidad de hoyo. Los problemas de desintegración de recortes y de inestabilidad de hoyo han sido considerados como un mismo problema. Sin embargo, existen diferencias esenciales que requieren un enfoque separado, como que cada uno tiene una solución particular (van Oort, 1997).

#### **2.4.1 Desintegración de los Recortes.**

La desintegración sucesiva del ripio implica la disminución de su tamaño hasta convertirlo en una partícula coloidal, la cual no puede ser removida por los sistemas de control de sólidos de superficie. Esta situación es la responsable del aumento progresivo de la viscosidad plástica, el punto de cedencia y las resistencias de gel, de la disminución de la ROP, del aumento de torque y de arrastre. En este caso, el único tratamiento efectivo para recuperar las propiedades del fluido consiste en la dilución

del mismo, lo cual resulta muy costoso, ya que es necesario incorporar nuevamente los aditivos restantes de la formulación.

En este proceso, los ripios pierden su integridad mecánica debido a dos razones: en primer lugar, durante la perforación los ripios que se acumulan en el fondo pueden ser retrititados progresivamente por la mecha, debido a un mal diseño de la hidráulica. En segundo lugar, las interacciones del ripio con el fluido de perforación en el espacio anular, pueden debilitar el ripio al colocarlo en tensión, hasta superar la resistencia de la cementación interna del material (*Sánchez et al, 2001*).

#### **2.4.2. Embolamiento de la Mecha.**

El embolamiento de la mecha ocurre cuando los recortes arcillosos se adhieren a ésta y esto dependerá de las características de resistencia y de plasticidad de los recortes, los cuales son función del contenido de agua y de arcilla que ellos poseen.

Dependiendo del contenido de agua, las arcillas pueden presentar tres comportamientos: Una zona seca, una zona plástica y una zona líquida. En la zona seca no se presentan problemas de adhesión a la mecha. Por otra parte, en la zona líquida la arcilla posee una resistencia muy baja y puede retirarse de la mecha por el mismo flujo de lodo. En la zona plástica es donde se presenta el problema de adhesión a la mecha (*Sánchez et al, 2001*).

#### **2.4.3. Inestabilidad de hoyo.**

Con este nombre se engloban todas aquellas situaciones que involucran una desestabilización de las paredes del hoyo. Los síntomas directos de inestabilidad de hoyo como agrandamiento o reducción del hoyo se observan en registros de calíper. Exceso de ripios o derrumbes en superficie u hoyo relleno después de un viaje dan indicaciones del agrandamiento del hoyo. También cuando se requieren cantidades en exceso de cemento con respecto al calculado indica que ocurrió un agrandamiento del hoyo. La Figura 13 muestra una representación de este problema.

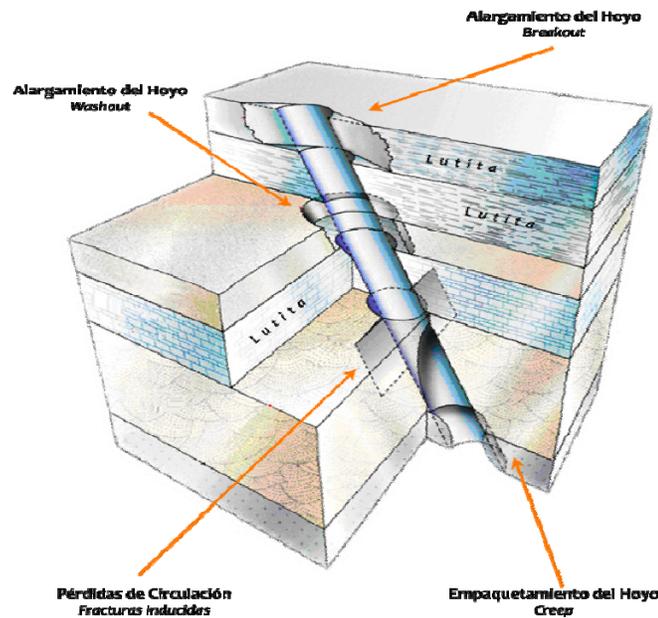


Figura 13. Representación de una sección del hoyo con inestabilidad.

Existen otros síntomas indirectos de problemas de inestabilidad de hoyo tales como altos torques, apoyos, arrastres, atascamiento de tubería, revestidores o herramientas de registros. Estos síntomas pueden ser causados por colapsos del hoyo, especialmente en hoyos altamente inclinados u horizontales. La ausencia o disminución de la circulación, así como el aumento de densidad del fluido por incremento de sólidos de perforación puede indicar la presencia de un atascamiento de tubería debido al derrumbe del hoyo. El exceso de ripios o derrumbes puede deteriorar las propiedades del fluido por exceso de sólidos. También se sabe que las vibraciones de la sarta de perforación, así como los impactos laterales a las paredes pueden provocar la falla del hoyo (Sánchez *et al*, 2001).

## 2.5. FACTORES FÍSICOQUÍMICOS EN LA INESTABILIDAD DEL HOYO.

La estabilidad química de las lutitas depende de tres mecanismos diferentes, los cuales se estudiarán más a fondo en esta sección:

- Ósmosis química, la cual afecta la presión de poro y causa la difusión de iones hacia la roca.

- Hinchamiento de arcilla, la cual afecta la presión de hinchamiento y es particularmente importante en lutitas ricas en esmectita.
- Intercambio catiónico, fenómeno que afecta la presión de hinchamiento debido a la hidratación de los minerales de arcilla.

### 2.5.1. Ósmosis

El fenómeno osmótico se refiere a un proceso de transporte de agua cuando el transporte de moléculas de soluto está restringido, debido a la existencia de un medio poroso relativo al de las moléculas de agua.

La ósmosis química es el flujo de una solución a través de una membrana semipermeable, debido a una diferencia en la composición química del fluido en algún lado de la membrana. El flujo ocurre desde la solución diluida hacia la solución más concentrada, y la fuerza impulsora involucrada es el gradiente químico a través de la membrana. Sin embargo, otras fuerzas involucradas pueden inducir flujo de fluido como la existencia de un gradiente hidráulico o un gradiente eléctrico.

Por definición, una membrana semipermeable rechaza solutos y admite solvente. El rechazo de soluto se puede deber al tamaño de las partículas o a restricciones eléctricas. Si la membrana es ideal, se dice que es impermeable para el soluto y el diferencial de presión cuando se alcanza el equilibrio osmótico es mayor y persiste indefinidamente (*Garavito, 2005*).

El comportamiento de membrana en los minerales arcillosos de baja permeabilidad se debe principalmente a las propiedades eléctricas de los minerales que constituyen el material geológico (*Fritz, 1986*).

Algunos minerales de arcilla se caracterizan por tener una superficie con carga neta negativa por causa de los rompimientos de enlace y la sustitución de cationes de baja valencia en la estructura. El mineral cargado, en presencia de una solución, absorbe cationes y algunos aniones (para mantener neutralidad eléctrica), creando una capa

móvil cerca de las partículas de arcilla y cargada positivamente. La concentración de las cargas positivas disminuye al alejarse de la superficie a tal punto que se vuelve la misma a la de la solución del agua de poro. La superficie resultante cargada negativamente y las capas cargadas positivamente definen lo que se conoce como la doble capa de Gouy. El grosor de la doble capa está en el orden de los 10 nm o menos. En la arenisca, este grosor es insignificante en relación al tamaño del poro, pero en los sedimentos arcillosos, el grosor de la doble capa se compara con el tamaño de poro, dejando muy poca solución dentro de los poros que no sea influenciada por las dobles capas (*Garavito, 2005*).

La propiedad de las membranas de arcilla de rechazar tanto aniones como cationes se debe a la superposición de las dobles capas cuando la arcilla ha sido lo suficientemente compactada. La compactación causa un incremento en las concentraciones de cargas positivas de las dobles capas a la vez que disminuye la concentración de las cargas negativas comparado con la solución de agua de poro. A esto se debe que cuando una solución intenta pasar a través de los poros, los aniones tienden a ser rechazados por la carga neta negativa. El paso de los cationes también es restringido debido a que tienden a quedarse junto a su contraparte aniónica para mantener neutralidad eléctrica en la solución externa. El agua, en cambio, se mueve sin restricción a través de la estructura. Los espacios entre los poros de una membrana ideal no contiene sales libres, los únicos solutos presentes son cationes. Por el contrario, en una membrana no ideal, hay sales dispersas en los espacios entre poros (*Fritz, 1986*).

Una membrana ideal previene completamente el paso de los solutos y permiten exclusivamente el paso de agua a través de ella. Este tipo de membrana no existe en ambientes naturales de baja permeabilidad, sólo en membranas poliméricas hechas artificialmente se exhibe esta idealidad. Las membranas de minerales arcillosos son no ideales, ya que permiten difusión de sales a través de ellas. La eficiencia de membrana está no solamente establecida por el grado de compactación, sino que

depende también de características del material y algunos factores y condiciones determinantes (Garavito, 2005).

### 2.5.2. Hinchamiento de Arcilla.

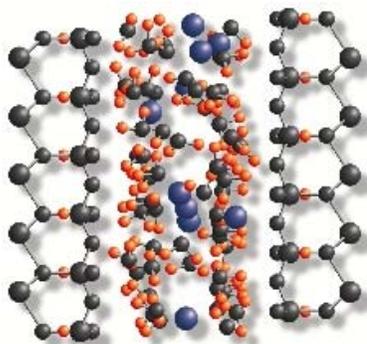
El hinchamiento de arcillas es debido a la hidratación de cationes intercalados dentro de las arcillas con estructura 2:1. El hinchamiento ocurre solamente para arcillas con una carga de capa relativamente baja; por ejemplo, las arcillas en el grupo de las esmectitas. El hinchamiento de las arcillas depende de tres factores: el tipo de cationes intercapa, la concentración y tipo de cationes en la solución, y la carga de la capa de la esmectita. También existen dos tipos de mecanismos de hinchamiento: hinchamiento cristalino e hinchamiento osmótico. En el primero, la distancia intercapa se incrementa de 10 a 20 Å, mientras que en el hinchamiento osmótico esa distancia se incrementa a más de 40 Å (Eslinger et al, 1980).

La hidratación de los cationes intercapa es muy diferente a la hidratación de los iones en una solución acuosa, la hidratación de estos cationes es un delicado balance entre la energía de hidratación de los cationes, la atracción electrostática entre los cationes y la carga negativa en la superficie de la arcilla, y las interacciones hidrofílicas e hidrofóbicas entre las moléculas de agua y la superficie de la arcilla.

Debido a la polaridad de las moléculas, los cationes atraen moléculas de agua en soluciones acuosas. Esta atracción hace que los cationes se “enlacen” con las moléculas de agua y se dice que los cationes han sido hidratados. La habilidad de los cationes de atraer las moléculas de agua, llamada energía de hidratación, depende del tamaño del catión deshidratado y de su valencia. En general, los iones más pequeños atraen más agua, y los iones polivalentes atraen más agua que los iones monovalentes.

El incremento en el tamaño del espaciamiento entre las capas no está relacionado directamente con el tamaño de los cationes completamente hidratados. Por el contrario, se ha observado que el hinchamiento en esmectitas ocurre en pasos discretos, en los cuales espaciamientos de 12,5, 15,5 y 19 Å han sido reportados.

Esto se puede explicar como que el hinchamiento ocurre en pasos discretos, debido a un número discreto de capas de agua presentes entre las capas de arcilla (*Eslinger et al, 1980*).



**Figura 14.** Representación de la hidratación de los cationes intercapa.

Aunque los estados de hinchamiento permitidos están determinados por la fuerza de hidratación, el hinchamiento observado dependerá del tipo y la concentración de los cationes intercapa. En otras palabras, todos los estados de hinchamiento permitidos no son observados para todos los cationes. El hinchamiento es un balance entre la energía de hidratación del catión intercapa específico y la atracción electrostática entre el catión y la superficie negativa de la arcilla. Los estudios han determinado que el hinchamiento máximo cristalino es directamente proporcional a la energía de hinchamiento, mientras que a la vez es inversamente proporcional al cuadrado de la valencia del catión. Es por esto que grandes cationes monovalentes como  $K^+$  y  $Cs^+$  con baja energía de hidratación, no generan tanto hinchamiento como los cationes  $Na^+$  o  $Ca^{2+}$ . Es por esto que el  $K^+$  es comúnmente usado como un inhibidor de hinchamiento en lodos de perforación base agua.

El hinchamiento cristalino también es dependiente de la carga en la superficie de la arcilla. Las esmectitas con cargas más grandes se hinchan menos que aquellas con cargas menores, debido a que la atracción entre los cationes y la superficie negativa es mayor, haciendo que la fuerza de unión entre las capas de arcilla aumente. Otro aspecto importante es que el proceso cristalino de hinchamiento no es

termodinámicamente reversible, es decir, hay una histéresis en el proceso hidratación-deshidratación durante el hinchamiento.

En algunos cationes intercapa, el espacio después del hinchamiento puede ser mayor a 20 Å, ocurriendo por el mecanismo llamado hinchamiento osmótico. Cuando la concentración en la solución es disminuida por debajo de un cierto punto llamado concentración de sal crítica, el espacio entre las capas aumenta directamente desde 20 hasta 40 Å, y luego incrementa linealmente al disminuir su concentración por debajo de ese punto. La concentración crítica de NaCl depende de la carga de las capas de esmectita y varía entre 0,3 y 0,5 M, siendo menor que las concentraciones de agua de poro más comunes.

El hinchamiento osmótico ocurre solamente para los iones pequeños monovalentes como  $\text{Na}^+$  o  $\text{Li}^+$ ; no ocurre para los iones monovalentes más grandes como el  $\text{K}^+$ , o para los cationes divalentes y trivalentes. Esto se debe a la atracción electrostática entre los cationes intercapa y la superficie de arcilla. El  $\text{K}^+$  está menos hidratado que el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Li}^+$ , lo que ocasiona que el  $\text{K}^+$  sea más atraído a la superficie negativa de la arcilla. La naturaleza polivalente de algunos iones como  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Al}^{3+}$  genera una atracción electrostática muy fuerte, por eso actúan como un adhesivo entre las capas y no permiten que el hinchamiento osmótico ocurra (*Eslinger et al, 1980*).

### 2.5.3. Intercambio Catiónico.

A pesar de que los cationes que se encuentran entre las capas (hidratados o no) son atraídos a la superficie de la arcilla, no son absorbidos irreversiblemente. De ahí que estos cationes puedan ser sustituidos por otros cationes provenientes del agua de poro, mediante un proceso llamado intercambio catiónico. Cada tipo de catión tiene una afinidad diferente por la superficie, lo que crea un orden de preferencia para los cationes. Primero, el factor más importante es la valencia, donde la afinidad por las superficies incrementa al aumentar la valencia del catión, debido a la atracción electrostática más fuerte. Segundo, el grado de hidratación también influye la

afinidad por la superficie de los iones, ya que los iones con baja hidratación absorben más fuertemente que los iones con alto grado de hidratación (*Eslinger et al, 1980*).

La secuencia de afinidad para la adsorción superficial de cationes puede ser derivada de la tabla periódica de los elementos, y puede ser expresada como sigue:



Los cationes en la izquierda serán reemplazados por los de la derecha. Esta afinidad por la superficie incrementa al aumentar la carga de la capa. Esta serie de cationes se conocen como la serie liotrópica de la serie de cationes de Hoffmeister y describe generalmente la afinidad de un catión por una superficie cargada negativamente.

Sin embargo, el proceso de adsorción no es termodinámicamente reversible, y también hay una histéresis en el intercambio entre los diferentes cationes. El proceso de intercambio es dependiente tanto de la afinidad por la superficie como de la concentración de los cationes (*Eslinger et al, 1980*).

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

La metodología experimental utilizada para cumplir con los objetivos se puede dividir en cinco etapas, siendo las dos primeras, la revisión bibliográfica y la caracterización de las muestras, determinantes en las medidas a tomar al llevar a cabo las siguientes dos, la interacción roca-fluido y los ensayos mecánicos. La última etapa, la caracterización de la muestra post-interacción, se puede considerar una repetición de la primera ya que se siguieron los mismos pasos, pero esta vez con la muestra alterada por la interacción con los distintos fluidos.

#### **3.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

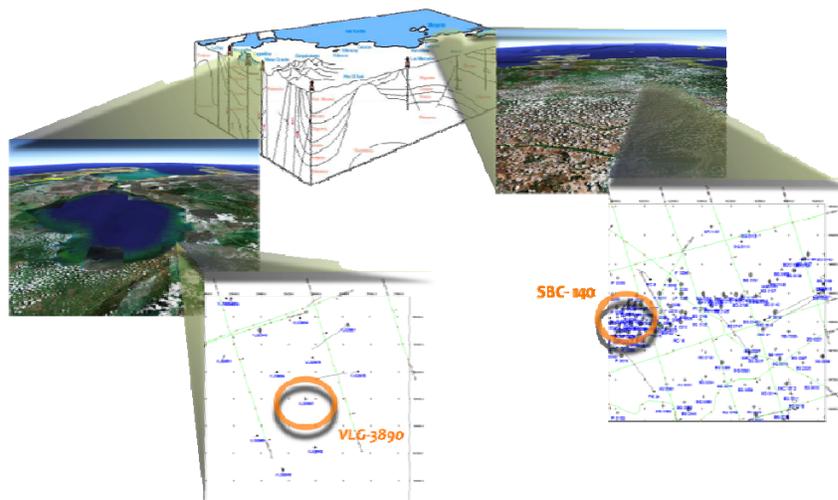
Como una primera fase en la realización de esta investigación, se ha recurrido a la búsqueda de información en diferentes medios, tanto impresos como electrónicos, con la finalidad de ubicar los principales aspectos relacionados con el área de estabilidad de hoyo, haciendo énfasis en lo siguiente:

- Características generales de las lutitas, su composición y propiedades mecánicas, petrofísicas y físico-químicas.
- Características generales de los fluidos de perforación base agua y sus funciones principales.
- Estudio de los mecanismos de interacción roca-fluido: convección, ósmosis y difusión iónica.

#### **3.2. SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS**

Es importante que las muestras de lutita se encuentren en buen estado de preservación para realizar las muestras de laboratorio, particularmente para mantener el contenido de agua original de la lutita (*da Fontoura, 1999*). En los procedimientos de laboratorio, se recomienda cuidado extremo al manipular arcillas con alto contenido de esmectita, ya que estas lutitas se deshidratan más rápido y pueden producir resultados no acordes con la realidad (*Santos, 1997*).

Con el objeto de evitar los problemas de deshidratación asociados con el almacenamiento, manejo y transporte de los núcleos, se recomienda, inmediatamente después de la extracción del núcleo, colocar el núcleo en un tubo de plástico lleno con aceite sintético, sellar posteriormente el tubo con el objeto de garantizar que el núcleo no entrará en contacto con el aire en ningún momento, y así, evitar la hidratación o deshidratación de la lutita (*da Fontoura, 1999*).



**Figura 15.** Ilustración de la procedencia de los núcleos disponibles.

En las instalaciones de PDVSA, se encontraban en supuesto estado de preservación dos núcleos de distintas áreas geográficas del país, los cuales pudieron servir para llevar a cabo el estudio planteado. Estos se mencionan a continuación:

- Núcleo obtenido del pozo VLG-3890, del campo Ceuta-Tomoporo al sureste del Lago de Maracaibo. Fue extraído en el año 2002; las secciones de lutita de este corte pertenecen a la formación Paují.
- Núcleo obtenido del pozo SBC-140, del campo Santa Bárbara al norte del estado Monagas. Fue extraído en el año 2006; las secciones de lutita de este corte pertenecen a la formación Carapita.

Considerando que se tenían acceso a 43 pies (13m) del núcleo del campo Santa Bárbara, y que se contaba con su disponibilidad inmediata, se procedió a realizar las pruebas con el núcleo SBC-140.

Con la finalidad de estudiar el efecto de variar la concentración de KCl en un fluido de perforación base agua, y que el estudio no se vea afectado por la presencia de otros componentes de dicho fluido de perforación, se decidió utilizar agua tridestilada como fluido base.

### **3.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE LA CARACTERIZACIÓN PREVIA DE LA MUESTRA DE LUTITA**

Para poder determinar cómo fue afectada la roca por cada uno de las soluciones de KCl a las que fue expuesta, se necesita conocer el estado inicial de las muestras. Esta caracterización inicial de la lutita consistió principalmente en conocer la naturaleza mineralógica de la roca, medir la porosidad, medir la cantidad de agua presente en los poros, conocer su capacidad de intercambiar iones (CEC), y su área superficial (Sánchez, 2001). Cada uno de los métodos utilizados para medir tales características se detallan a continuación.

#### **3.3.1. Estudios Mineralógicos**

La caracterización mineralógica consiste en determinar la presencia de minerales hidratables, los cuales pueden desarrollar mecanismos de desestabilización de la roca en presencia de fluidos de perforación base agua. Esta caracterización se llevó a cabo mediante dos técnicas, la difracción de Rayos X (XRD), con la cual se determinó la cantidad de cada uno de los minerales de arcilla presentes en la muestra, y la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), que permitió obtener datos de la morfología de la muestra y un análisis elemental de la misma.

- Difracción de Rayos X:

La difracción de rayos X es una técnica instrumental que permite identificar fases cristalinas o planos cristalográficos en muestras de minerales. El fenómeno de la

difracción puede describirse con la Ley de Bragg, que predice la dirección en la que se da interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal.

Es una técnica especialmente útil para identificar minerales de arcilla puesto que estos se caracterizan por su pequeño tamaño, lo cual es precisamente el requerido para el análisis por rayos X. Los registros consecutivos de difractogramas seguidos de post-tratamientos, permiten diferenciar las especies y grupos de minerales de arcilla, los cuales pueden identificarse con mayor seguridad combinando los datos suministrados por este método y la Microscopía Electrónica de Barrido (*Bertolino et al, 1999*).

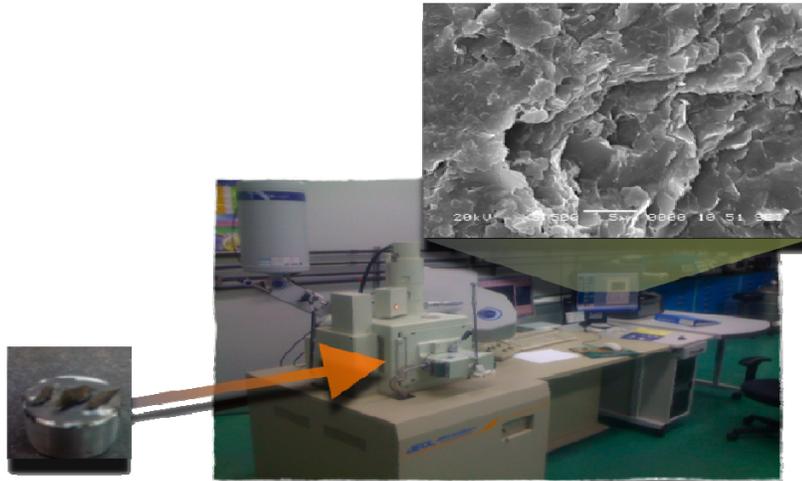
Esta prueba se llevó a cabo gracias a la colaboración del Laboratorio Geológico del Área Norte de Monagas, en El Chaure, donde se cuenta con un equipo de especialistas en esta técnica.

- Microscopía Electrónica de Barrido (SEM):

Es una técnica basada en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones. Los electrones luego son recogidos y contados por un dispositivo electrónico. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel en una pantalla; cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la misma. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 200 000 veces o más. Este tipo de microscopio produce imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto. En la Figura 16 se muestra un esquema de la técnica, desde el posicionamiento de la lutita en el portamuestras de aluminio, hasta el tipo de imagen que se puede obtener del microscopio electrónico.

El espectro de radiación X emitido por el mineral, se utilizó para hacer un microanálisis químico semicuantitativo mediante espectrometría de dispersión de longitudes de onda o EDX. Los electrones incidentes excitan los átomos de la

muestra y provocan la emisión de rayos X, cuya longitud de onda es característica de los elementos presentes en la muestra y cuya intensidad para una determinada longitud de onda es proporcional a la concentración relativa del elemento a esa longitud (*Ingeomin, 2007*).



**Figura 16.** Microscopía Electrónica de Barrido.

Se eligió una muestra de lutita con una fractura reciente y sin alterar mecánicamente. Debido a que la roca no es buena conductora, antes de ser puesta en el portamuestras del microscopio se recubrió con una película conductora de aleación de Au, para evitar que ésta se cargara cuando fuera irradiada y se crearan puntos blancos en la imagen (*Bertolino et al, 1999*).

### 3.3.2. Contenido de Humedad

El cambio del contenido de humedad luego de la interacción de la lutita con los fluidos de perforación determina el flujo de agua hacia adentro o fuera de la formación, ya sea debido al fenómeno de ósmosis o por convección. El contenido de humedad se determinó utilizando el análisis termogravimétrico (TGA).

- Termogravimetría (TGA):

La termogravimetría se basa en el registro de la masa de una muestra de forma continua a medida que aumenta su temperatura en forma lineal. En este caso se llevó la muestra desde la temperatura ambiente hasta 300 °C. Luego, se determinó la gráfica de la masa en función de la temperatura, llamada termograma, que proporciona información tanto cualitativa como cuantitativa de la muestra.

Primero, se partió la muestra preservada hasta que se obtuvo un pedazo pequeño de unos 0,4 o 0,5 gramos, cuidando que no estuviera impregnado del aceite usado en la preservación, por lo cual hubo que obtenerlo del centro del núcleo. Luego, se introdujo la muestra en el equipo de análisis termogravimétrico (SetSys EV 1750), y se llevó a cabo el barrido de temperaturas en un ambiente de Argón, hasta los 300°C para cerciorarse de que se desprendiera toda el agua fisisorbida de la muestra. Luego del barrido, se obtuvo el termograma correspondiente.

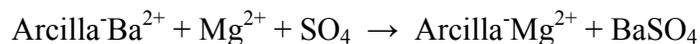
#### **3.3.4. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico, Área Superficial y Porosidad.**

La capacidad de intercambio catiónico, el área superficial y la porosidad son parámetros importantes para describir la naturaleza de las partículas de arcilla. Era posible que estos valores se vieran afectados luego de la interacción de la lutita con el fluido, por lo cual se llevaron a cabo estas pruebas, antes y después de la exposición a las soluciones de KCl.

- Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC):

Se utilizó una variación del método de Mortland y Mellor (*Mortland et al, 1954*), ya que es el método comúnmente usado en la empresa. El procedimiento consistió en triturar la muestra de lutita, saturarla en una solución de  $\text{BaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  y luego triturarla con solución de  $\text{MgSO}_4$  de normalidad adecuada (0,05; 0,1; 0,2; 0,5 y 1N). Luego el CEC de la arcilla se determinó mediante una titulación

conductimétrica, para lo cual se utiliza un conductímetro dotado con una unidad de dosificación. La reacción de intercambio catiónico puede representarse como:



Los valores de conductividad eléctrica resultantes de la titulación se graficaron en función del volumen de  $\text{MgSO}_4$  utilizado, dando como resultado dos rectas, cuya intersección proporcionó el punto final de la titulación (punto donde se efectuó el cambio de arcillas de  $\text{Ba}^{2+}$  a arcillas de  $\text{Mg}^{2+}$ ). El volumen en el punto final de la titulación se obtuvo a través de las ecuaciones de las rectas resultantes. El valor de CEC se determinó mediante la ecuación:

$$CEC = \frac{V \cdot N \cdot 100}{pm} \quad (5)$$

donde:

*CEC*: Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100mg).

*V*: volumen de  $\text{MgSO}_4$  obtenido en el punto de corte entre las dos rectas (mL).

*N*: normalidad de la solución de  $\text{MgSO}_4$  utilizada en la titulación.

*pm*: peso de la muestra (g).

- Determinación del Área Superficial Específica.

Este valor permite conocer qué cantidad del volumen total de la roca está expuesta al fluido de perforación, para relacionarlo con otras características de la misma. La superficie específica es una propiedad que depende de la técnica utilizada para medirla, aunque en este caso se determinó mediante la adsorción superficial de Nitrógeno, según el método de BET (Brunauer, Emmet y Teller, 1938), ya que es reconocido mundialmente como estándar. Es por esto que el valor obtenido se denota como  $S_{\text{BET}}$ . Antes de llevar a cabo este método fue necesario realizar un lavado con tolueno y metanol, para así retirar cualquier fino o restos de aceite adherido a la superficie a consecuencia del proceso de extracción de la muestra.

El método consiste en construir isotermas de adsorción, que se determinan a temperaturas próximas a 77 K y usando métodos de medición volumétricos. El procedimiento para calcular estas curvas comenzó por, previamente lavada y desgasificada la muestra, introducir una cierta cantidad conocida de gas en el recipiente que contiene el adsorbente. El volumen de gas adsorbido a la presión de equilibrio es la diferencia entre el volumen de gas introducido y el que se requiere para llenar el espacio muerto a la presión de equilibrio. La isoterma de adsorción se determinó punto a punto introduciendo sucesivas cargas de gas, dejando el tiempo suficiente para el equilibrio a cada punto (*Lombardi et al, 2001*). Esta prueba se llevó a cabo en el equipo TriStar de la empresa Micromeritics, ubicado en el Laboratorio de propiedades Texturales de Intevp, mostrado en la Figura 17. Este método de adsorción también se usó para determinar la estructura porosa de la roca, con el fin de comparar resultados con el método de intrusión de Mercurio, descrito a continuación.

- Determinación de la Porosidad.

Debido a que el tamaño de los poros varía ampliamente, la determinación de la porosidad tiene por objeto principal conocer la distribución del tamaño o volumen de poros en función del radio.

El porosímetro de Mercurio se ha generalizado comercialmente para determinar la distribución de tamaños de poro, y se basa en la penetración del metal en los poros del sólido. El Mercurio no entra espontáneamente en tubos capilares porque no moja las paredes de los sólidos. Para lograr la penetración, se aplica una presión externa dependiente del radio del capilar.

El volumen de Mercurio desplazado corresponde al que ha penetrado en los poros. El llenado se efectúa desde los poros de mayor diámetro hasta los de menor diámetro; por lo tanto, para medir los volúmenes de manera creciente, es preciso determinar el volumen total de Mercurio que penetra en la muestra a la presión máxima y, a partir del volumen total, restar en forma decreciente y sucesiva los volúmenes incorporados a presiones menores (*Lombardi et al, 2001*).

Este método se llevó a cabo en un AutoPore IV de la empresa Micromeritics, mostrado en la Figura 18 y disponible en el laboratorio de Propiedades Texturales de Intevep.



Figura 17. TriStar. Equipo de adsorción.



Figura 18. AutoPore IV. Micromeritics.

### 3.4. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE KCl A UTILIZAR.

Con el fin de determinar la concentración de KCl a utilizar en los experimentos posteriores, se llevaron a cabo pruebas de hinchamiento lineal con soluciones de distintas concentraciones de dicha sal y agua destilada. Esta prueba consiste en someter la muestra de lutita en forma de pastillas a interacciones estáticas en tiempo finito con soluciones de KCl de concentraciones preestablecidas y agua destilada en un equipo de hinchamiento lineal (Ofite Linear Swellmeter, mostrado en la Figura 19) que mide los cambios en la altura de cada pastilla con respecto al tiempo, para así determinar la concentración de KCl que ofrece el menor hinchamiento final al interactuar con la muestra de arcilla.

A pesar que no existe evidencia que permita afirmar que el fenómeno de hinchamiento ocurre en las paredes del hoyo se utilizará esta prueba porque

economiza la cantidad de muestra, tiene un fácil procedimiento para llevarse a cabo, es relativamente rápida, el equipo está disponible en la empresa con inmediatez, y genera resultados que si bien no son exactos, sirven para determinar las concentraciones de KCl que generan un mayor comportamiento inhibitorio.



**Figura 19.** Ofite Linear Swellmeter. Equipo de medición de hinchamiento lineal.

- Preparación de las Soluciones.

Se prepararon soluciones de KCl de grado técnico de distintas concentraciones, comenzando por 1%, siguiendo por 2% y así sucesivamente hasta que se empezaron a obtener resultados repetidos en la prueba de hinchamiento lineal. Se hizo necesario utilizar calor y agitación durante la preparación de estas soluciones, a partir de 2%.

- Prueba de Hinchamiento Lineal.

Primero, se prepararon pastillas con las dimensiones específicas determinadas por el equipo. Esto se hizo triturando la muestra con un martillo, pulverizándola, y tamizándola a 250 mesh. El polvo que se obtuvo se introdujo en unos moldes de acero, se llevaron a una prensa y se presurizaron hasta 6000 psi durante una hora para darle forma y consistencia a las pastillas de arcilla.

Se introdujeron en la celda de medición de hinchamiento, se midió su altura inicial y luego se le agregaron las respectivas soluciones, previa realización de la prueba con agua destilada. Se dejó interactuar el sistema durante 20 horas, el tiempo necesario para que se estabilizara la altura de las pastillas.

### 3.5. MÉTODO DE INTERACCIÓN LUTITA-SOLUCIÓN DE KCl

Una vez que se procesaron los resultados de la prueba de hinchamiento lineal, se eligieron las tres concentraciones de KCl que generaron el menor hinchamiento lineal, suponiendo que son éstas las que poseen un mayor comportamiento inhibitorio (*Eslinger et al, 1980*), para exponer a ellas muestras de la lutita en estado de preservación. Esto tiene como finalidad caracterizar mineralógicamente la muestra de lutita luego de la interacción y detectar algún cambio respecto al estado inicial de la roca. Esto también se hizo con agua tridestilada con fines comparativos.

- Preparación de las soluciones.

La concentración de las soluciones para estas pruebas de interacción fue producto de los resultados obtenidos de la prueba de hinchamiento lineal. En esta etapa del procedimiento se usó agua tridestilada, al igual que KCl al 99,9% de pureza de grado analítico, debido a que cualquier sal adicional en la solución alteraría los resultados.

- Interacción roca-fluido.

Con este trabajo se pretenden estudiar los procesos fisicoquímicos involucrados entre el fluido y la roca lutítica; por tal motivo se deben aislar los mecanismos de interacción que responden a potenciales hidráulicos, térmicos o eléctricos, como es el caso de la advección o la difusión térmica, por lo cual se decidió que el proceso de interacción se llevara a cabo a temperatura y presión atmosférica.

Inicialmente se determinó el tiempo durante el cual se llevaría a cabo el proceso de interacción, ya que éste es una variable que influye significativamente en los mecanismos involucrados (*van Oort, 1997*). Esto se hizo calculando un promedio

de tiempo en el cual se mantuvo el hoyo desnudo en pozos vecinos a una profundidad cercana a la profundidad de la cual se extrajo el núcleo SBC-140 (entre 14895 pie y 14937 pie). Estos datos se obtuvieron de los registros de perforación del campo Santa Bárbara de la empresa PDVSA.

### **3.6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS**

Para hacer un estudio extenso de estabilidad de hoyo, es necesario conocer las propiedades físicas del macizo rocoso. El proceso usual es evaluar las características mecánicas de un espécimen de roca intacta.

Para clasificar el macizo rocoso desde el cual la muestra fue derivada, un número de ensayos de laboratorio estándares han sido desarrollados para la determinación de las propiedades índices.

El objetivo principal de este estudio es la evaluación de las propiedades mecánicas de la roca como la resistencia a la compresión uniaxial (UCS), el módulo de Young (E), y el módulo de Poisson ( $\nu$ ). La prueba consta de dos partes: preparación de las muestras y ensayo de resistencia a la compresión no confinada (UCS para hallar E y  $\nu$ ).

#### **3.6.1 Preparación de las muestras** (*Guía de Laboratorio de Geotécnia, UC, 2007*).

Existen algunas consideraciones previas para poder obtener tapones aptos para llevar a cabo los ensayos mecánicos, éstas se nombran a continuación:

- Los tapones deberán ser cilindros circulares rectos, teniendo una relación largo diámetro de entre 2:1 a 2,5:1.
- Las superficies planas de los tapones no deberán poseer diferencias mayores a 0,02 mm y no deberán apartarse de su perpendicularidad con respecto al eje por más de 0,001 radianes o 0,05 mm en 50 mm de longitud.

- Los lados de los tapones deberán ser suaves y libres de irregularidades abruptas y dentro de 0,3 mm sobre el largo completo de ellos.
- Las muestras deberán ser almacenadas de tal forma de preservar el contenido natural de agua, tanto como sea posible, y ensayar en esa condición.

En la etapa de extracción de los tapones del núcleo fue necesaria nuevamente la colaboración del Laboratorio Geológico del Área Norte de Monagas, ya que el taladro presente en las instalaciones de Intevep producía vibraciones de tal magnitud que la roca cedía y se hacía imposible preservar la forma de los tapones. En el proceso de emparejamiento de las caras, llevada a cabo en la sede de Los Teques, se perdieron dos tapones debido a la fragilidad de la lutita.

### **3.6.2. Determinación de la Resistencia a la Compresión No Confinada (UCS)**

Durante esta prueba, la carga sobre el tapón se aplicó continuamente a una tasa de esfuerzo constante de modo tal que la falla ocurra dentro de los 5-10 min de carga, cuidando, como exige la bibliografía, que la tasa de esfuerzo estuviera dentro del rango de 0,5-1 MPa (*Guía de Laboratorio de Geotécnia, UC, 2007*).

Cada tapón se colocó en la máquina de ensayo de compresión no confinada y fue ensayado hasta la falla, donde se obtuvo el valor de la resistencia a la compresión uniaxial (UCS). Posteriormente, el espécimen fue recogido para analizar la forma de falla y almacenado.

El procedimiento general seguido en este experimento involucró básicamente las siguientes etapas:

- Instalación del sistema de carga y captura de datos
- Aplicación de carga hasta la rotura de las muestras.
- Determinación de los modos de falla y la información grabada

- Determinación de la deformabilidad de la roca (Módulo de elasticidad de Young (E) y Módulo de Poisson ( $\nu$ )).

Los tapones ensayados para la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de la roca también fueron usados para la determinación de las constantes elásticas de deformación. La forma de capturar los datos de carga respecto al desplazamiento es a través de la instalación de un sistema de almacenamiento de datos externo a la máquina de ensayo. De este modo, cada tapón que fue ensayado tuvo colocado sobre su superficie un par de “*strain gauges*”, que son resistencias eléctricas que modifican su resistividad a medida que se van deformando y, de este modo, permiten medir indirectamente la deformación del sólido. Para determinar las deformaciones axial y radial cada par de “*strain gauges*” se conectaron en serie a un amplificador de deformación. El amplificador de deformación fue conectado a un grabador de datos para obtener una grabación continua de la carga contra las deformaciones axial y radial.

### **3.7. CARACTERIZACIÓN FINAL DE LA MUESTRA**

Para completar la caracterización de la muestra se realizaron las pruebas descritas en la sección 3.3, evaluando la interacción de la muestra con agua destilada y cada solución de KCl. Los resultados obtenidos se compararon con las condiciones iniciales de la muestra de lutita y se determinarán los cambios que se llevaron a cabo en la roca.

## CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan de forma detallada todos los resultados obtenidos en el desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado junto con los análisis correspondientes.

### 4.1. CARACTERIZACIÓN PREVIA DE LA MUESTRA DE LUTITA

#### 4.1.1. Difracción de Rayos X (XRD).

En la Tabla 1 se presenta la interpretación del análisis de Difracción de Rayos X enviados desde el Laboratorio Geológico del Área Norte de Monagas en una estimación de los componentes cristalinos a tres profundidades distintas del núcleo SBC-140 que corresponden al tope, medio y base del mismo. Es necesario recalcar que este método es semicuantitativo y la apreciación no refleja la precisión del mismo. Este método no detecta material amorfo ni orgánico.

**Tabla 1.** Mineralogía total inicial a tres profundidades distintas del núcleo SBC-140.

Mineral	% Másico		
	14895' (4540m)	14904' (4543m)	14937' (4552m)
<b>Cuarzo</b>	12	11	18
<b>Plagioclasa</b>	4	2	3
<b>Calcita</b>	2	2	1
<b>Siderita</b>	19	18	-
<b>Pirita</b>	-	2	5
<b>Minerales de Arcilla</b>	63	65	73
<b>Total</b>	100	100	100

En la Tabla 1 se observa que, como es de esperarse, los principales componentes de la lutita del Núcleo SBC-140 son los minerales de arcilla, abarcando entre 63 y 73% del total de componentes cristalinos. También resalta presencia de un porcentaje de cuarzo entre 10 y 20 %, lo cual también es de esperarse ya que suele ser el mineral

accesorio más común entre las lutitas. Los feldespatos de plagioclasa contribuyen hasta en un 4%. La calcita, que se sitúa entre 1 y 2%, probablemente represente muestras de microfósiles en lugar de cemento autigénico debido a su bajo porcentaje, mientras que la pirita que alcanza un 5% se precipita sobre la lutita en forma de cemento luego de la deposición de los sedimentos (Eslinger *et al*, 1980). Existe una diferencia entre los porcentajes a medida que varía la profundidad, a pesar de que todo el núcleo pertenece a la formación Carapita. Esta diferencia puede deberse, en primer lugar, a la manera como fueron depositándose los minerales durante la formación debido a las condiciones ambientales características de cada uno de los estos momentos, así como a la incertidumbre del método. También es válido recordar la heterogeneidad de la matriz de la roca y de la muestra que se lleva al difractor, por lo que es común que se ausente un mineral en los resultados, como es el caso de la siderita, que a pesar de representar casi un 20 % en el tope y la parte media del núcleo, la difracción de RX no registra su presencia al aumentar la profundidad 30 pies. A continuación se presenta de manera gráfica en la Figura 20 el promedio estos resultados con fines comparativos.

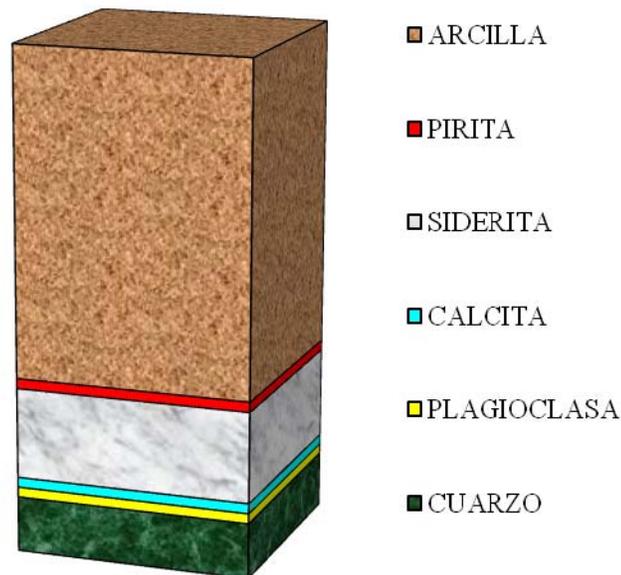


Figura 20. Mineralogía total inicial de la muestra del núcleo SBC-140.

Los minerales accesorios presentes en la roca no se ven afectados por los fluidos de perforación base agua ya que no son sensibles a éstos, al contrario de algunos minerales de arcilla. Hay una necesidad de identificar cuáles de estos minerales de arcilla están presentes en la muestra y así definir los minerales hidratables que puedan desarrollar mecanismos de desestabilización en la roca en presencia de fluidos de perforación base agua. En la Tabla 2 se presenta la interpretación del análisis de difracción de Rayos X hecho a la sección arcillosa de las tres muestras del núcleo SBC-140 a las profundidades mencionadas anteriormente.

**Tabla 2.** Mineralogía de Arcillas inicial a tres profundidades distintas del núcleo SBC-140

Mineral	% Másico		
	14895' (4540m)	14904' (4543m)	14937' (4552m)
<b>Caolinita y Clorita</b>	60	61	56
<b>Ilita</b>	8	5	6
<b>Ilita y Esmeclita</b>	32	34	38
Total	100	100	100

Puede observarse en la Tabla 2 que para los casos de caolinita y clorita se registra el porcentaje másico global. Esto es debido a la cercanía del valor del ángulo de difracción de estos minerales, y surge la necesidad de representarlos de manera conjunta, ya que los resultados por separado arrojarán un error significativo. Estos minerales llegan a constituir casi el 60% de la fracción arcillosa de la muestra, pero no se puede determinar su aporte por separado debido a que el ángulo de difracción medido está situado entre ambos minerales. Al no registrarse una cantidad de caolinita con un ángulo de difracción suficientemente alejado de la clorita, se presume que la caolinita presente ha sufrido alteración por cloritización, pero no se obtiene suficiente información del análisis por difracción de Rayos X para afirmarlo. Sin embargo, es posible que mediante microscopía electrónica de barrido pueda obtenerse suficiente información acerca de la morfología para verificar si hubo alguna alteración.

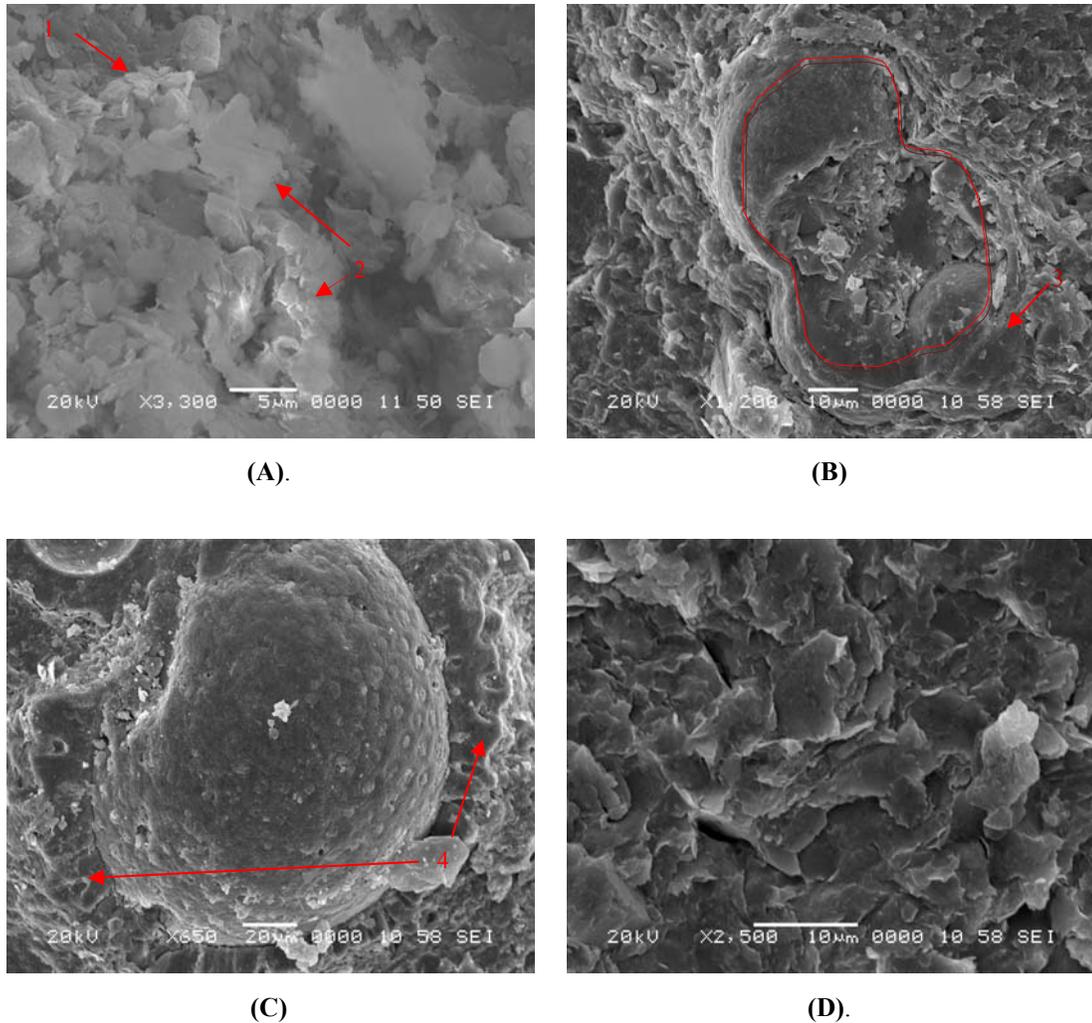
Algo similar se puede observar en el caso de la illita y la esmectita. En ambientes naturales, la transformación esmectita/illita es una reacción bien conocida, y representa probablemente la reacción volumétricamente más importante en las rocas sedimentarias. Esta consiste en un reordenamiento químico más que estructural, en donde el cambio principal es que tienen que entrar cationes de Aluminio tanto en la capa tetraédrica como en la octaédrica (*Linares et al, 1993*). Debido a que esta reacción es favorecida al aumentar la temperatura, es probable que esto haya ocurrido en esta formación a medida que variaban las condiciones geotérmicas.

Queda en evidencia que la composición arcillosa principal del núcleo SBC-140 corresponde a minerales de caolinita y esmectita que probablemente hayan sufrido procesos de alteración por cloritización e ilitización respectivamente. Es de recordar, que la esmectita es un mineral altamente sensible al agua y que podrá verse afectada al interactuar con fluidos base agua. Sin embargo, el catión Potasio, al ser monovalente y con baja energía de hidratación, será un inhibidor de este fenómeno, y es posible que puedan observarse cambios en el comportamiento del mineral al variar la concentración de KCl en la solución acuosa. Estos cambios en la concentración de la sal afectarán el comportamiento del mineral en menor o mayor grado dependiendo de la cantidad de esmectita que haya sufrido ilitización, si es el caso.

#### **4.1.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).**

Las imágenes resultantes de la sesión de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) pueden verse en la Figura 21. En la imagen (A), es fácil reconocer las gargantas de los poros más grandes, ya que son las zonas más oscuras de la imagen. Es posible también identificar algo de esmectita autigénica en la zona superior izquierda (punto 1). Esta esmectita fue formada a partir de los compuestos químicos reciclados del sedimento originalmente depositado, posiblemente a partir de feldespatos, y debido a que, aún mantiene su forma de hojuelas, se puede inferir que no ha sufrido alteraciones significativas después de su origen. Se tiene igualmente la presencia de illita y caolinita no autigénicas (punto 2). Esta última, debido a que posee los bordes

más claros que el resto de su estructura, evidencia un proceso de alteración por cloritización



**Figura 21.** Distintas imágenes del Núcleo SBC-140 obtenidas mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

La imagen (B) nuevamente muestra la importante presencia de caolinita cloritizada, la cual rodea a la estructura central, un microfósil (delineado en rojo). Estas caolinitas van variando su morfología levemente a medida que se aleja del microfósil, lo cual se debe a las diferentes composiciones de las cloritas que se van formando en su superficie, ya que ésta varía a diferentes distancias de los cuerpos de sulfuro (*Eslinger et al, 1980*). En la zona inferior derecha de la imagen, se observa una calcita con

estructura esférica (punto 3), demostrando su presencia en la lutita, ya que por los bajos porcentajes reflejados en la XRD no podía contabilizarse con seguridad.

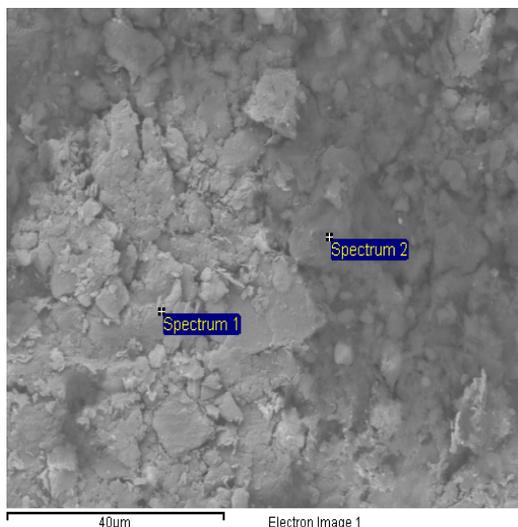
En la imagen (C) , puede observarse un elemento semiesférico que corresponde a un mineral de calcita rodeado de caolinita (punto 4) que ha sufrido diagénesis. Los puntos que se observan sobre la calcita son llamados puntos de dolomitización, y refieren a un proceso de formación de dolomías por reemplazamiento diagenético de calizas preexistentes (Alonso, 2003). La imagen demuestra que la sustitución mineral ocurre por fenómenos de difusión a escala local, lo cual explica por qué no se evidencia la presencia de dolomitas en el estudio de XRD. En la imagen (D), se puede ver claramente la abundancia de caolinita cloritizada.

Lo observado en las imágenes del microscopio electrónico confirma lo presumido al analizar los resultados obtenidos en la Difracción de Rayos X, en cuanto a los procesos de ilitización y cloritización de la esmectita y la caolinita respectivamente. Esto es un indicio de la carencia de cationes Potasio en la formación (Eslinger et al, 1980). Sin embargo, evidencia la presencia de calcita no sólo en la constitución de microfósiles, sino también en forma autigénica. Es por esto que al realizar una caracterización mineralógica, es ideal complementar la técnica cuantitativa de XRD con lo que pueda observarse en un estudio SEM.

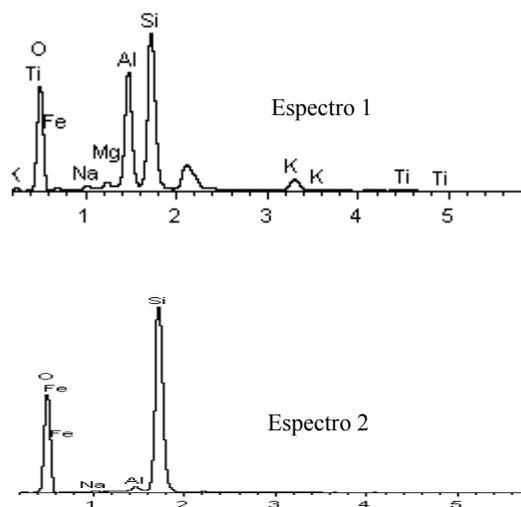
Para corroborar el análisis cualitativo de la Figura 21 es pertinente realizar un análisis de espectrometría de energía dispersiva de Rayos X, o EDX como es comúnmente conocida. Debido a que esta prueba permite determinar la proporción elemental de los componentes en la muestra, se puede usar para diferenciar los tipos minerales que se están observando. El EDX se basa en medir la longitud de onda de los Rayos X emitidos por los átomos de la muestra cuando ésta es bombardeada por un haz de electrones, determinando así los átomos presentes en la misma.

Este análisis se puede llevar a cabo en áreas muy selectas como se puede ver en la en la Figura 22. Ahí se observan dos puntos sobre los cuales se hizo el análisis

elemental, los cuales se eligieron por representar morfológicamente un mineral de arcilla y un mineral accesorio respectivamente.



**Figura 22.** Imagen de SEM (E) para EDX.



**Figura 23.** Análisis EDX sobre los puntos identificados en la imagen E.

En la Figura 23 se pueden observar los espectrogramas registrados en cada uno de los puntos mencionados arriba. El primero revela en sus picos la presencia de Oxígeno, Aluminio, Potasio, Hierro y Silicio principalmente, aunque también pueden notarse elementos como el Magnesio, y el Sodio presentes en este punto de la muestra. El segundo espectrograma muestra que el punto relativo está básicamente compuesto por Oxígeno y Silicio, con rastros de Aluminio, Sodio y Hierro.

Para determinar los porcentajes máxicos de los elementos que componen la roca, se calcula el área bajo la curva del componente específico. Esta área se estima a través de un programa especializado que realiza un ajuste gaussiano a los picos en los espectrogramas y realiza los cálculos pertinentes. De ahí, se obtienen los porcentajes atómicos y máxicos reportados en la Tabla 3.

En la Tabla 3 se reporta cuantitativamente el análisis elemental realizado a ambos puntos de la imagen mostrada en la Figura 20, y de ella se puede deducir que el primer punto consiste en un mineral de arcilla debido a su complejidad, y que el

segundo está compuesto principalmente por sílice. Esto confirma lo observado en las imágenes de la Figura 21.

**Tabla 3.** Resultado del Análisis Elemental durante el estudio SEM.

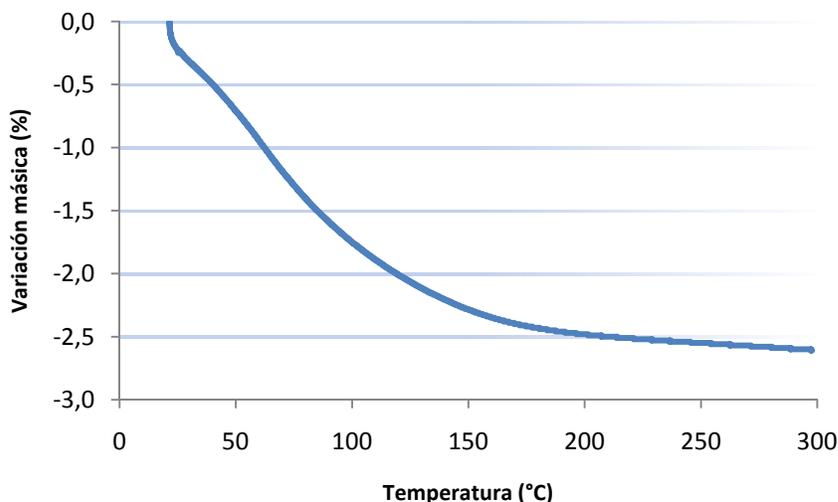
Elemento	Espectro 1		Espectro 2	
	% Másico	% Atómico	% Másico	% Atómico
<b>O</b>	46,28	60,93	57,47	70,39
<b>Na</b>	0,81	0,74	0,24	0,20
<b>Mg</b>	1,06	0,91	-	-
<b>Al</b>	17,96	14,02	0,87	0,63
<b>Si</b>	27,12	20,34	41,05	28,64
<b>K</b>	2,92	1,57	-	-
<b>Ti</b>	0,47	0,21	-	-
<b>Fe</b>	3,39	1,28	0,37	0,13
Total	100		100	

#### 4.1.3. Termogravimetría (TGA).

En la Figura 24 se muestra la variación de la masa de la muestra frente a la variación de la temperatura, en un intervalo de trabajo entre 20 y 300°C, una velocidad de calentamiento de 2,5 °C/min y una atmósfera inerte de Argón.

En el termograma se puede observar que la curva está dividida en dos etapas, marcadas por un cambio de pendiente en la temperatura cercana a los 30°C, cada una de las cuales corresponde a pérdidas de masa en la muestra. La primera corresponde a la evaporación de restos del aceite sintético en la cual estaba preservada la muestra, ya que éste es altamente volátil. A pesar de que se tomó el cuidado de tomar 3g de la muestra que no formaran parte de la superficie expuesta al aceite, se hace difícil evitar que algo de esta muestra no entre en contacto con el aceite mientras se extrae. Sin embargo, esta pérdida de masa no es representativa, ya que corresponde al 0,1% total de de la muestra y se puede despreciar. La segunda pérdida de masa se lleva a cabo en una sola etapa desde 27°C hasta los 300 °C. Esta corresponde al agua que se

encuentra presente en los poros comunicados de la muestra, ya que el agua presente en los poros aislados no puede cuantificarse mediante esta técnica.



**Figura 24.** Termograma inicial de la muestra de lutita.

Así pues, se determina que el porcentaje de agua presente en la muestra corresponde a 2,6% de la masa total. Éste es un valor aproximado, ya que es posible que la manipulación de la cual fue objeto el núcleo desde su extracción, al igual que su preservación hayan podido influir en la humedad de la muestra.

#### 4.1.4. Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC).

En la Figura 25 se presenta la gráfica obtenida durante la titulación conductimétrica llevada a cabo para determinar la Capacidad de Intercambio Catiónico de la muestra. En la misma, las dos etapas de la variación de la conductividad se ajustan a dos rectas de distinta pendiente y se identifica el punto de intersección el cual proporciona el punto final de la titulación.

El punto de intersección corresponde a un volumen de titulante de 1,35 ml, lo cual sustituido en la Ecuación 5, arroja un valor de CEC de 0,46 mEq/100g. Aunque la bibliografía presenta valores bajos de CEC para arcillas altas en caolinita, como es el caso, no muestra valores por debajo de 3 mEq/100g. Cabe destacar que esta prueba se

repetió tres veces, en las cuales se obtuvieron los mismos resultados. Este bajo valor evidencia que la preservación del núcleo SBC-140, al no haber sido llenados con aceite sintético cada uno de los tubos de aluminio de 3 pies de longitud donde estaban guardados las diferentes secciones de los 42 pies del núcleo, afectó las condiciones *in situ* de la muestra de arcilla.

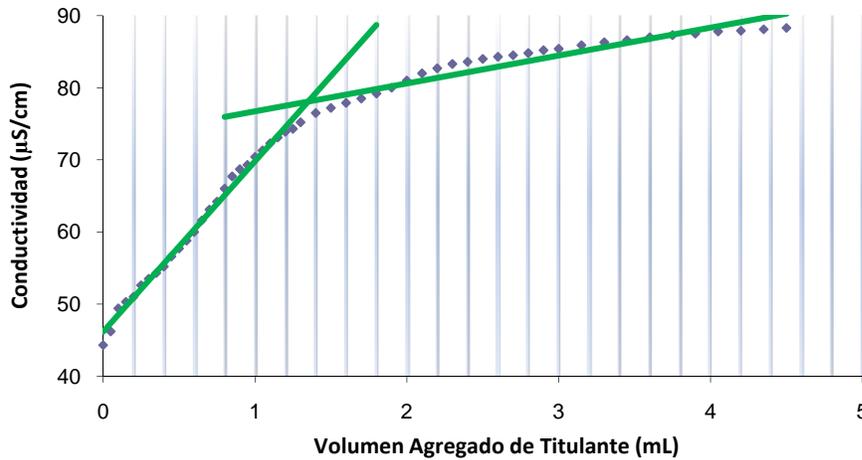


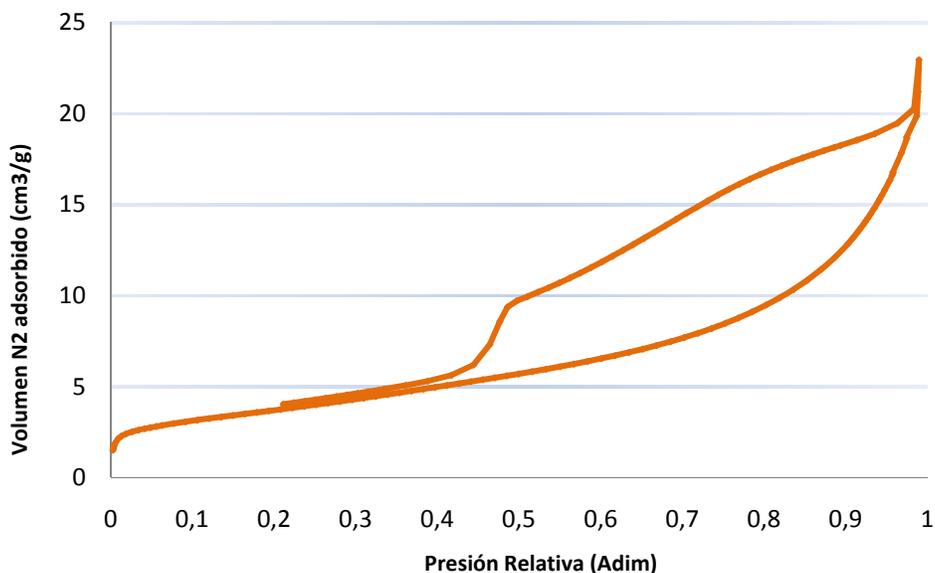
Figura 25. Gráfica de Capacidad de Intercambio Catiónico

Es posible que esto disminuya el efecto que tienen las distintas soluciones a las cuales son expuestas las muestras sobre el comportamiento mecánico de las mismas. También debe tomarse en cuenta para todos los resultados que las condiciones iniciales de preservación con las cuales se estarán comparando distintos parámetros, no corresponden con exactitud a las condiciones *in situ* de la roca lutítica. Sin embargo, esto no afectará el estudio, ya que lo que se pretende es evaluar cambios en estas características al ser expuesta la roca a los distintos fluidos.

#### 4.1.5. Área Superficial y Porosidad. Método BET.

Para la medición del área superficial específica se utiliza el método BET. Con este método, se obtiene la isoterma mostrada en la Figura 26, correspondiente al comportamiento de la adsorción física de Nitrógeno a temperaturas próximas a la de condensación del mismo en la muestra inicial de lutita. Este tipo de isotermas también resultan útiles para caracterizar la estructura porosa de la muestra al cubrir un

amplio rango de presiones relativas, permitiendo el llenado de diferentes tipos de porosidad en el material.



**Figura 26.** Isoterma de adsorción de N2 para la muestra inicial de lutita.

El software de la empresa Micromeritics, Tristar 3000 v3.01, estima un valor de área superficial BET ( $S_{BET}$ ) de  $13,38 \text{ m}^2/\text{g}$ . A partir de la Figura 26, se pueden identificar ciertas características de la estructura del sistema poroso. La forma de la isoterma permite apreciar el carácter mesoporoso de la muestra, deducido del incremento suave del volumen adsorbido a presiones relativas bajas, y el aumento de este volumen a medida que aumenta la presión relativa del Nitrógeno. También se puede observar una histéresis en la parte de la curva correspondiente a la desorción. Esto se debe a la estructura de los poros, los cuales presentan una garganta poral más pequeña que la cavidad del poro (*Lombardi et al, 1993*).

Dependiendo en la manera como se lleve a cabo la desorción es posible determinar, la distribución normal de tamaño de poro de la muestra, la cual se muestra en la Figura 27. Se puede observar un pico anormal al principio de la misma, el cual corresponde a la súbita evaporación del Nitrógeno que se encuentra sobre la superficie de la muestra una vez que la presión relativa empieza a disminuir (*Lombardi et al, 1993*). Al hacer los ajustes correspondientes, el software del equipo arrojó los resultados del diámetro

de poro promedio, el cual corresponde para esta muestra a 53,21 Å, área superficial correspondiente a los poros, que promedia 11,07 m<sup>2</sup>/g, y el volumen total ocupado por los poros que fue de 0,032 mL/g. Estos valores corroboran lo observado en la Figura 26, afirmando el carácter mesoporoso de la muestra.

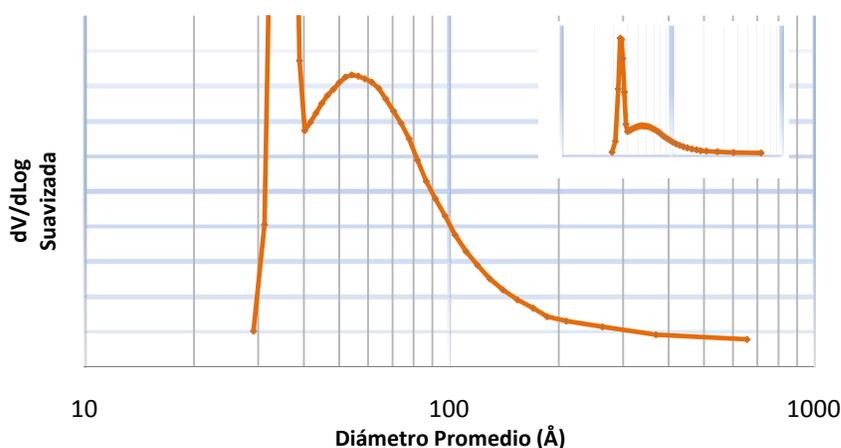


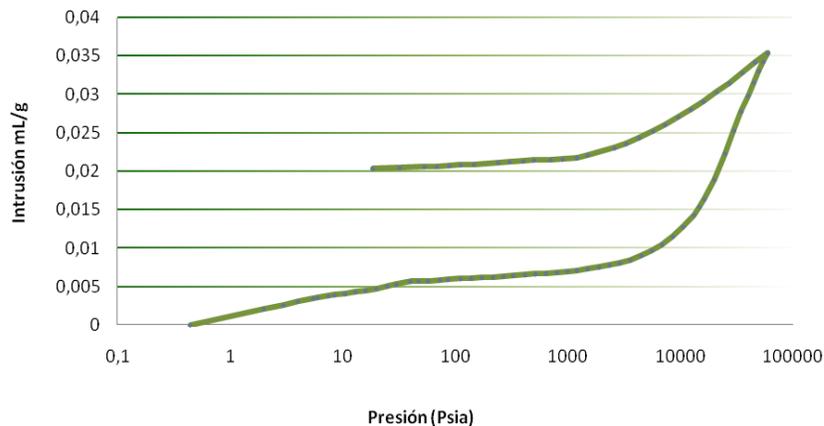
Figura 27. Distribución de tamaño de poro para la muestra inicial.

#### 4.1.6. Porosidad. Método de Intrusión de Mercurio.

La medición de las presiones aplicadas a la columna de Mercurio, así como los volúmenes de Mercurio intrusado en la muestra a cada una de estas presiones lleva a la construcción de la curva de intrusión que se puede apreciar como la curva inferior en la Figura 28. En ella también se observa el proceso de extrusión de Mercurio a medida que disminuye la presión, proceso definido por la curva superior. La curva de extrusión no necesariamente seguirá el mismo camino que la de intrusión; esto dependerá principalmente de la morfología de los poros.

A partir de esta curva se puede determinar el volumen total ocupado por los poros, el cual corresponde al volumen de Mercurio intrusado en la muestra. Sin embargo, hay que tomar en cuenta el vacío interparticular o el volumen de vacío intersticial en la superficie de la muestra, los cuales al ser más grandes, se llenan con Mercurio a una presión más baja que los poros. El punto en el cual estos vacíos intersticiales son

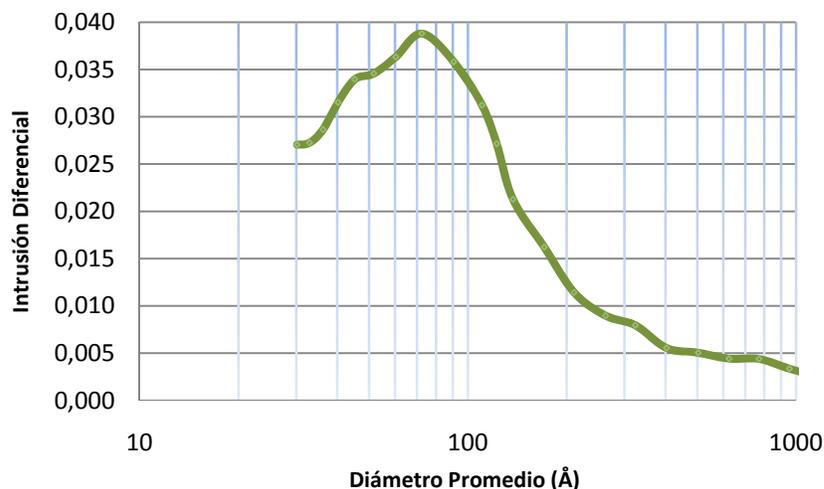
intrusados en su totalidad por el Mercurio corresponde al cambio abrupto observado en el comienzo de la curva, y corresponde en este caso a 0,006 mL/g. Este valor habrá que restárselo al volumen final de Mercurio intrusado para obtener el volumen ocupado por los poros. El volumen total ocupado por los poros obtenido mediante esta técnica es de 0,037 mL/g, algo mayor que el valor obtenido mediante la técnica de adsorción. Esta diferencia puede deberse a la compresión de la muestra al alcanzar los 60000 psi, al igual que la diferencia de modelaje matemático. Este valor corresponde a decir que la muestra inicial de lutita tiene una porosidad igual a 10,05%.



**Figura 28.** Curva de intrusión de Mercurio para la muestra sin alterar.

En la curva de extrusión también puede notarse una histéresis, la cual se atribuye a la forma que tienen los poros en la muestra. A pesar de que los poros de mayor tamaño se intrusan con Mercurio a presiones más bajas, si una cavidad grande está conectada a la superficie por una garganta de poro pequeña, ésta no será llenada con Mercurio hasta que la presión sea suficiente como para llenar la garganta de menor tamaño. Durante la descompresión, la garganta poral se vacía a la misma presión a la cual fue llenada, pero la gran cavidad detrás de la apertura permanece llena con Mercurio porque las fuerzas internas no superan las fuerzas externas a altas presiones. El poro se vaciará a una presión menor, asociada a su radio interno, pero no se vaciará del todo si la conexión hacia la superficie está compuesta de diámetros de magnitudes inapropiadas (Webb, 2001). Al ver la histéresis pronunciada en la curva de extrusión,

se puede deducir que las gargantas de los poros son de menor tamaño que los poros en sí.



**Figura 29.** Curva de distribución de tamaño de poro para la muestra inicial.

En la Figura 29 se tiene la curva de distribución de tamaño de poro obtenida de la porosimetría de Mercurio. En ella se puede observar que comienza bruscamente en 30Å, esto se debe a que es el diámetro de poro de menor tamaño donde puede intrusarse el Mercurio a la máxima presión que soporta el equipo, es decir, el límite del rango de esta técnica. A pesar de que la curva de distribución no está completa, el algoritmo del software utilizado por el equipo, AutoPore IV 9500 V1.05, reporta resultados de diámetro de poro que se pueden comparar con la primera técnica usada.

El diámetro de poro promedio determinado con la técnica de intrusión de Mercurio corresponde a 55Å, valor que tan sólo se desvía 3,3% los 53,21Å reportados por la técnica de adsorción. A pesar del bajo porcentaje de desviación, no se puede concluir que las dos técnicas arrojan resultados similares para esta roca, ya que la curva de distribución incompleta altera los resultados que se pueden obtener, y se puede tratar de una circunstancialidad.

La adsorción de gas y la porosimetría de Mercurio son técnicas complementarias. La técnica de adsorción puede describir la microestructura, ya que puede medir diámetros de poro tan pequeños como 0,1 Å, mientras que la porosimetría obtiene

información de los meso y macroporos a partir de 30 Å, rango al cual no alcanza la adsorción de Nitrógeno. Cuando se usan las dos técnicas no se debe esperar obtener necesariamente los mismos resultados en el rango en que se sobreponen. Una dificultad al comparar estos resultados puede resultar de la posibilidad de la compresión de la muestra a las altas presiones a la que es expuesta en la porosimetría, lo que causaría un error al determinar la cantidad de Mercurio que invadió la muestra. Sin embargo, para algunos materiales se han registrado resultados similares (Webb, 2001).

**Tabla 4.** Comparación de resultados de porosimetría.

Técnica	Tamaño de Poro (Å)	Volumen total de poro (mL/g)	Área S. de poros (m <sup>2</sup> /g)
<b>Adsorción</b>	53,21	0,032	11,07
<b>Intrusión</b>	55	0,037	15,76
<b>Desviación (%)</b>	3,3%	15,6%	42,4%

En la Tabla 4 se tiene una comparación de los resultados de tamaño de poro promedio, volumen total ocupado por los poros y el área superficial correspondiente a los poros, obtenidos mediante las dos técnicas. Puede observarse que los resultados de volumen total y área superficial de los poros presentan grandes diferencias entre los dos métodos, lo cual confirma que la similitud de los resultados de tamaño de poro no es concluyente. El uso de ambas técnicas es complementario, y dependerá de los resultados obtenidos para cada tipo de lutita determinar cuál de ellas reporta resultados confiables. En el caso particular de la lutita proveniente del Núcleo SBC-140, la técnica más apropiada para la caracterización del sistema poroso es la adsorción de Nitrógeno.

#### 4.2. HINCHAMIENTO LINEAL

A pesar de que el análisis hecho por Santarelli y Carminati (1995) determina que el hinchamiento de las arcillas no ocurre en la formación durante la perforación, debido a que este fenómeno es el resultado de la presencia tanto de agua como de aire en la estructura poral de la roca, es decir, se lleva a cabo gracias a efectos capilares, estos

ensayos ayudan a determinar a qué concentraciones de KCl es menos reactiva la muestra de lutita, para así llevar a cabo los ensayos mecánicos a estas condiciones. En la Figura 30 se presentan los resultados del hinchamiento lineal de pastillas hechas con muestras de lutita del núcleo SBC-140.

En la gráfica se puede observar cómo el agua interactúa con la roca, aumentando la altura de la pastilla de una manera gradual y sostenida hasta alcanzar un aumento correspondiente al 16% de la altura inicial en 1200 minutos de interacción. Al agregar 1% en peso de KCl a la solución se evidencia un cambio, no en el porcentaje de hinchamiento alcanzado al cabo del mismo tiempo, pero sí en la manera brusca como comienza este hinchamiento, alcanzando en tan sólo 180 minutos la barrera de 14% de hinchamiento, altura que alcanzó la pastilla que interactuó con agua en un lapso de 500 minutos.

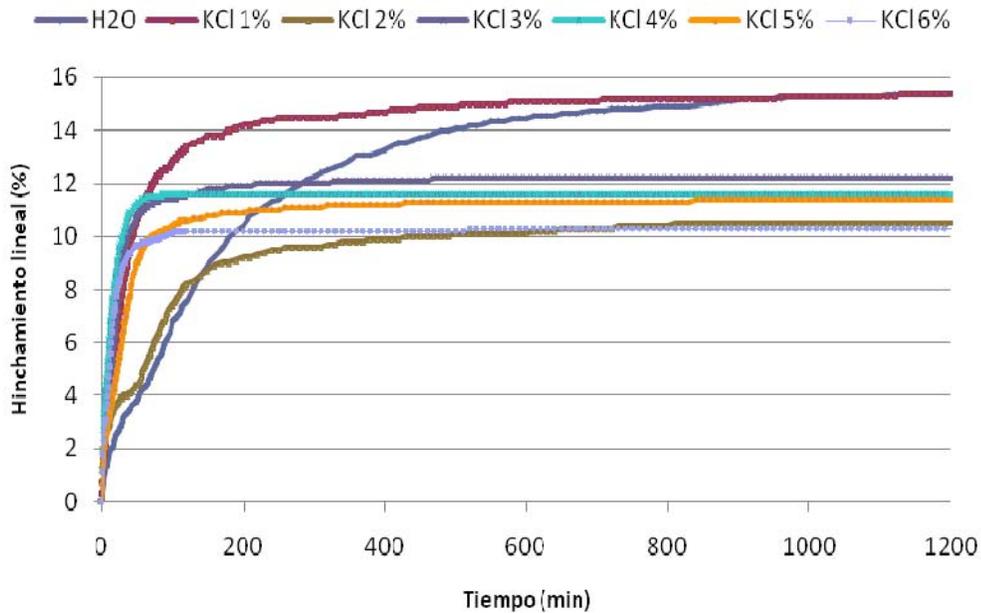


Figura 30. Resultados de la prueba de Hinchamiento Lineal.

A medida que se aumenta la concentración de KCl en las soluciones de interacción se observa que disminuye el hinchamiento hasta un 5%. Debido a que no se observó una diferencia significativa en los resultados para 2, 3, 4, 5 y 6% de KCl, se decidió no

seguir aumentando la concentración de las soluciones, ya que se presume que seguirá teniendo el mismo comportamiento.

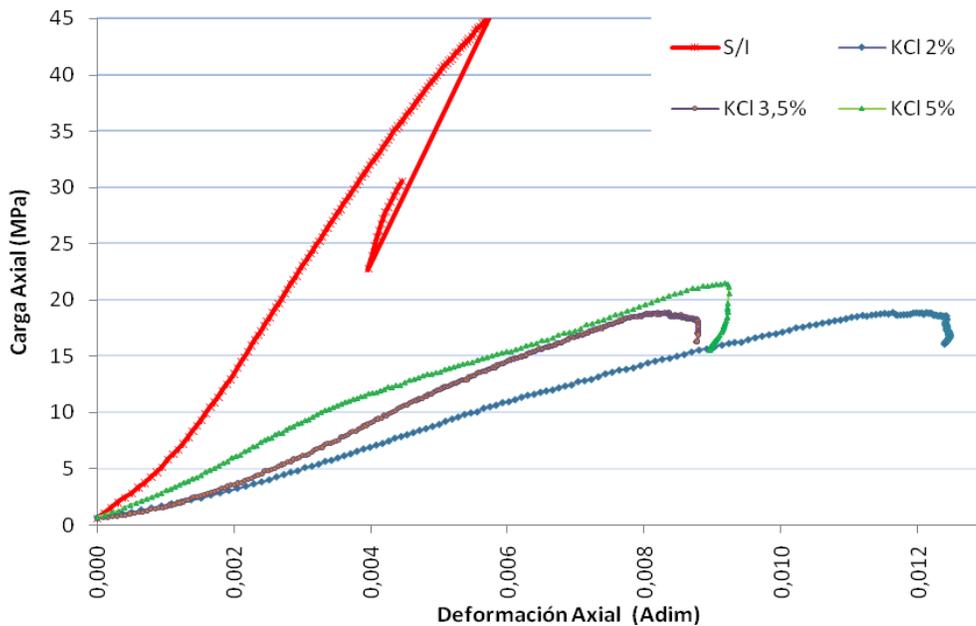
De ahí que se decida utilizar las concentraciones de 2; 3,5 y 5% de KCl para las soluciones con las cuales interactuarán los tapones cilíndricos de lutita antes de estudiar el efecto del KCl sobre su comportamiento mecánico en la celda uniaxial.

### **4.3. ENSAYOS MECÁNICOS**

A continuación se presentan los resultados y análisis de los ensayos mecánicos, los cuales se llevaron a cabo en una celda uniaxial tanto para la muestra en su estado inicial, como para muestras después de interactuar con los fluidos determinados en la sección anterior. Éstos se presentan en dos etapas, determinadas por la orientación de los tapones ensayados. En la Figura 31 se tiene la curva esfuerzo-deformación de los tapones verticales. Es importante recalcar que el tapón que interactuó con agua destilada no pudo ser ensayado en la celda debido a que no pudo preservar su forma inicial al final del periodo de interacción.

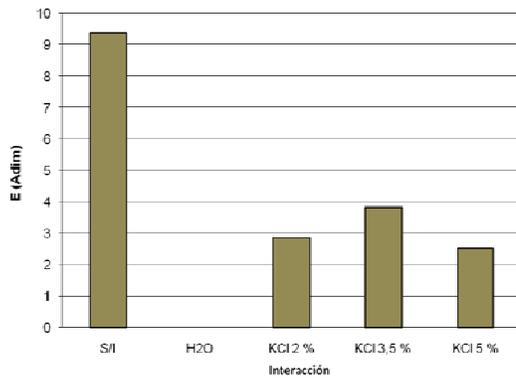
En las curvas esfuerzo-deformación se puede evidenciar una marcada diferencia entre el comportamiento mecánico de la roca en su estado inicial, y luego de interactuar con las distintas soluciones de KCl. En primer lugar, la resistencia máxima a la compresión se reduce a la mitad luego de la interacción con el fluido base agua. El valor de UCS determinado en la celda para la lutita en su estado inicial es 45,3 MPa, mientras que luego de la interacción, este valor corresponde a 18,72 MPa para 2% de KCl, 18,73 MPa para 3,5% y 21,48 MPa para una concentración de KCl de 5%. El valor de UCS luego de la interacción con agua destilada no se pudo determinar como se mencionó anteriormente; sin embargo, se puede suponer que el valor de resistencia a la compresión máxima para este caso es despreciable comparado con los demás valores obtenidos. Esto demuestra que existe una interacción entre los minerales de arcilla presentes en la lutita y las soluciones acuosas, y aunque no se pudo determinar cuál de los fenómenos de intercambio másico está ocurriendo, se puede concluir irrefutablemente que esta interacción debilita la cementación en la

matriz rocosa. También se puede mostrar el carácter inhibitorio del catión  $K^+$ , ya que éste permite que la roca mantenga cierto grado de cohesión y no se disgregue en la solución, como ocurrió con la muestra expuesta a agua destilada.

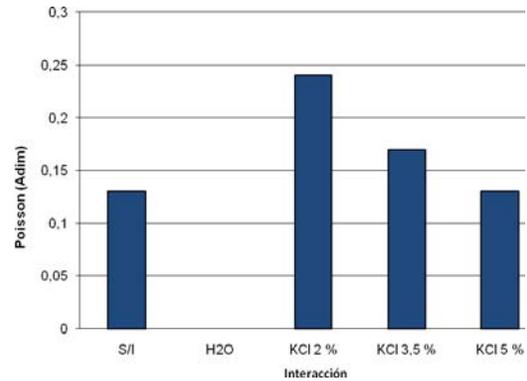


**Figura 31.** Curvas esfuerzo-deformación de los tapones con orientación vertical.

De la misma gráfica se puede apreciar el cambio significativo en el comportamiento elástico de la roca. El Módulo de Young disminuye por debajo de la mitad con respecto al valor obtenido de la roca en su estado inicial, lo cual quiere decir que la roca presenta una mayor deformación en la zona elástica para una carga axial dada; es decir, aumenta su elasticidad. En la Figura 32 se muestran con fines comparativos los valores de Módulo de Young obtenidos de cada tapón. A pesar de que las muestras expuestas a las soluciones de KCl tienen un comportamiento elástico similar entre sí, se puede diferenciar la que interactuó con KCl al 3,5%, ya que aunque su valor representa sólo el 40% del valor inicial, es la que menos se aleja de este valor, o lo que es lo mismo, la que adquiere menor elasticidad luego de la interacción.



**Figura 32.** Módulo de Young para cada tapón vertical.



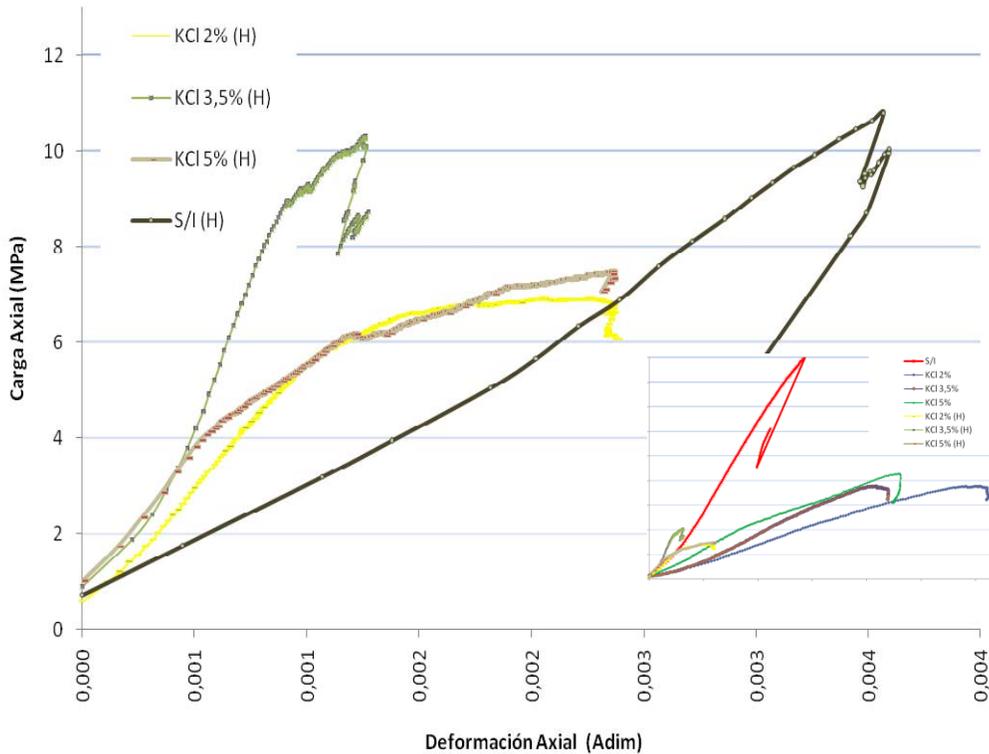
**Figura 33.** Relación de Poisson para cada tapón vertical.

En la Figura 33 se comparan los valores obtenidos para la Relación de Poisson, la relación entre la deformación axial y la radial en las mismas muestras. En ella, se aprecia que al interactuar con una solución de KCl al 5%, la muestra de lutita registra el mismo valor de Relación de Poisson que la muestra en su estado inicial de preservación. A medida que disminuye la cantidad de KCl en la solución de interacción, este valor va disminuyendo, lo cual significa que la deformación radial es cada vez mayor con respecto a la deformación axial. Esto da un indicio de la manera cómo es alterada la muestra de lutita por el agua destilada, y cómo el KCl inhibe esta alteración.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos uniaxiales, esta vez de los tapones con orientación horizontal. En la Figura 34 se observa la curva esfuerzo-deformación. Se aumentará la escala en ambos ejes con respecto a la gráfica mostrada en la Figura 31, esto con el fin de apreciar mejor las distintas curvas. En la esquina inferior derecha se puede ver mejor el cambio de escala.

En esta figura, se puede apreciar un cambio en la resistencia máxima a la compresión; sin embargo, esta no es tan marcada como en el caso de los ensayos con tapones verticales. El valor tan bajo registrado para el UCS, 12,65 MPa para el caso de la lutita sin interactuar, puede deberse a la orientación de las grietas presentes en la

muestra y debido a que no se encuentra confinada en el sentido correspondiente, hay un constante rearrreglo intergranular, así como la aparición de nuevas grietas en la estructura.



**Figura 34.** Curva esfuerzo-deformación de los tapones con orientación horizontal.

En las Figura 35 y 36 pueden observarse los valores de Módulo de Young y Relación de Poisson para los tapones horizontales expuestos a los distintos fluidos de perforación. En la Figura 35, se ve que la tendencia del Módulo de Young es distinta que para los tapones verticales, ya que se nota un aumento del mismo a medida que aumenta la concentración de KCl en las soluciones con las que interactúa, en lugar de una disminución como pudo verse en el primer caso. Sin embargo, puede observarse que al igual que para los tapones verticales, con la solución de KCl al 3,5% se obtiene la menor elasticidad.

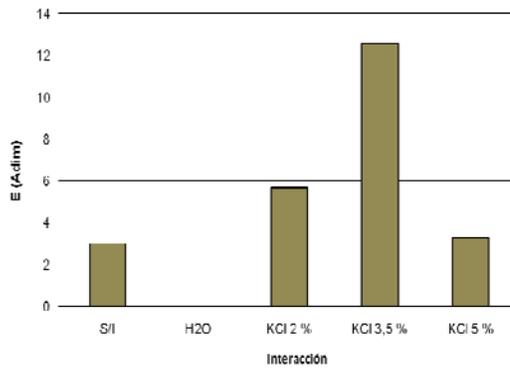


Figura 35. Módulo de Young para cada tapón horizontal.

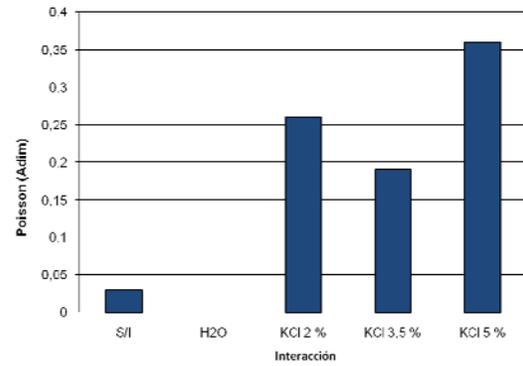


Figura 36. Relación de Poisson para cada tapón horizontal.

Al observar el aumento marcado en los valores de la Relación de Poisson para los tapones expuestos a la interacción, se puede deducir que la orientación de las grietas y la falta de confinamiento juegan otra vez un papel importante y demuestra que este parámetro para tapones de orientación horizontal no es factible medirlo mediante un ensayo uniaxial.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los parámetros mecánicos medidos mediante los ensayos uniaxiales para todos los tapones.

Tabla 5. Resumen de los valores obtenidos de las pruebas uniaxiales para todos los tapones ensayados.

	Interacción	UCS (MPa)	E (Adim)	Poisson (Adim)
<b>Horizontal</b>	<b>S/I</b>	12,65	3,03	0,03
	<b>KCl 2%</b>	6,93	5,7	0,26
	<b>KCl 3,5%</b>	10,3	12,61	0,19
	<b>KCl 5%</b>	7,49	3,28	0,36
<b>Vertical</b>	<b>S/I</b>	45,3	9,38	0,13
	<b>KCl 2%</b>	18,72	2,86	0,24
	<b>KCl 3,5%</b>	18,73	3,82	0,17
	<b>KCl 5%</b>	21,48	2,54	0,13

#### 4.4. CARACTERIZACIÓN FINAL DE LA MUESTRA DE LUTITA

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de la lutita luego de interactuar con las distintas soluciones de KCl. En algunos casos, por falta de muestras suficientes, no se hizo la caracterización para la roca con exposición a una solución de KCl al 2%. Esto no representará un problema, ya que se seguirá trabajando con los valores más críticos, como se demostró en los ensayos mecánicos.

Estos ensayos se llevaron a cabo con la misma metodología que la caracterización inicial, aunque no se llevó a cabo una sesión de Microscopía Electrónica de Barrido, por falta de disponibilidad del equipo. Sin embargo, en ninguno de los estudios que se han hecho anteriormente se registran cambios en la morfología de la muestra evidenciables a través de esta técnica, por lo que no resulta éste un problema para la investigación (Horsrud et al, 1998).

##### 4.4.1. Difracción de Rayos X (XRD).

La Figura 37 muestra los resultados de mineralogía de arcillas mediante difracción de Rayos X de las muestras de lutita expuestas a agua destilada y a las soluciones de KCl al 3,5 y 5%, y se compara con los resultados de la roca sin alterar.

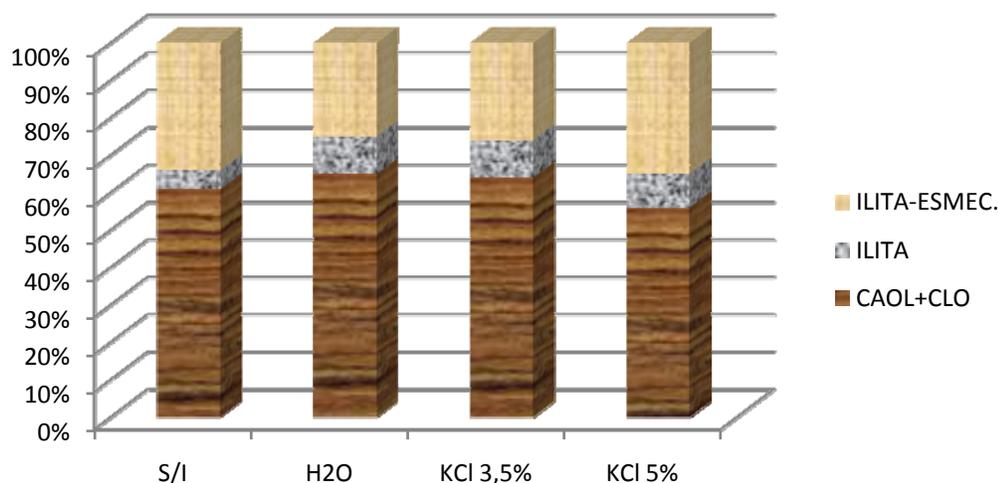


Figura 37. Comparación de los resultados del análisis por XRD.

En esta Figura puede observarse que aunque han habido pequeños cambios en algunos valores, no son lo suficientemente grandes para poder concluir que hay un cambio en la composición arcillosa de la lutita debido a su interacción con los fluidos. Estas diferencias se deben a la inexactitud de este método, así como a la heterogeneidad de la matriz de la roca.

En la Tabla 6 se presentan los resultados enviados desde el Laboratorio Geológico del Área Norte de Monagas, donde fue llevado a cabo este estudio semicuantitativo, y en ella se puede observar de nuevo que no hubo cambios que se puedan atribuir a una variación en la composición de las arcillas. Sin embargo, esto no excluye cambios en la cementación de la roca que puedan incidir en la alteración del comportamiento elástico y de la dureza de la misma evidenciada en los ensayos mecánicos.

**Tabla 6.** Composición de arcillas para las distintas muestras de lutita.

Mineral	% Másico			
	S/I	H2O	KCl 3,5%	KCl 5%
<b>Caolinita y Clorita</b>	60	70	69	51
<b>Ilita</b>	8	10	10	14
<b>Ilita y Esmectita</b>	32	20	21	35
Total	100	100	100	100

#### 4.4.2. Termogravimetría (TGA).

A continuación se presentan en la Figura 38 las curvas termogravimétricas reportadas por el estudio de variación másica. De nuevo, se trata de las muestras de lutita expuestas a agua destilada y a las soluciones de KCl al 3,5 y 5%, y se compara con los resultados de la roca sin alterar.

Dicha curva demuestra lo visto en la teoría, ya que la roca expuesta a agua destilada presenta un mayor contenido de agua fisisorbida en su matriz porosa que la expuesta a las soluciones de KCl. Esto se puede deber tanto al fenómeno de hidratación de los cationes intercapa, o hinchamiento, como también se conoce, como al flujo osmótico

del agua hacia adentro de la matriz debido a la diferencia en la actividad del fluido de poro y el fluido externo (Sánchez *et al*, 2001).

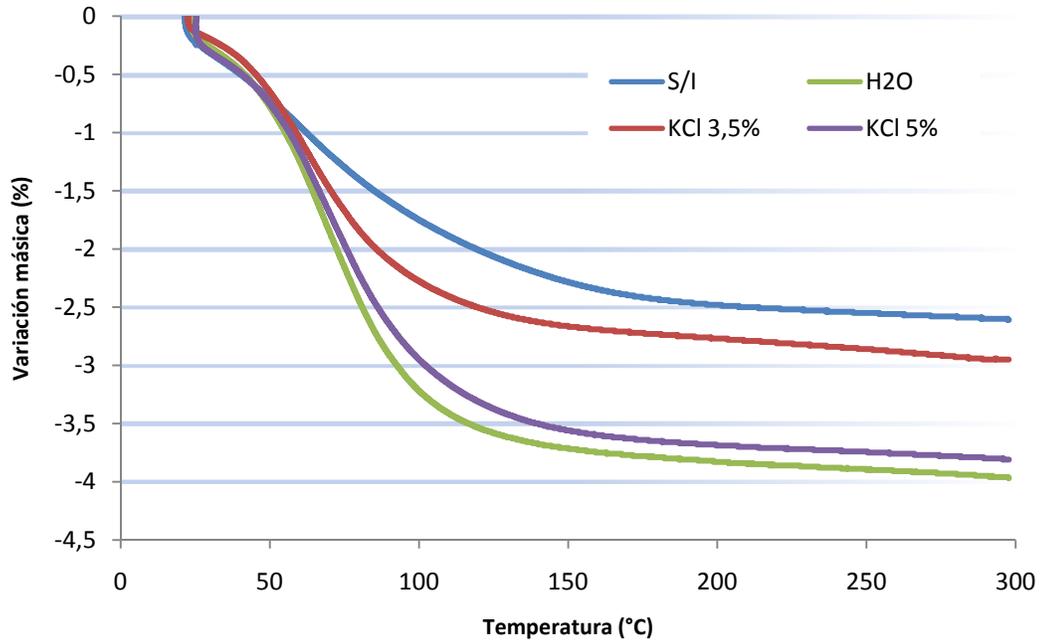
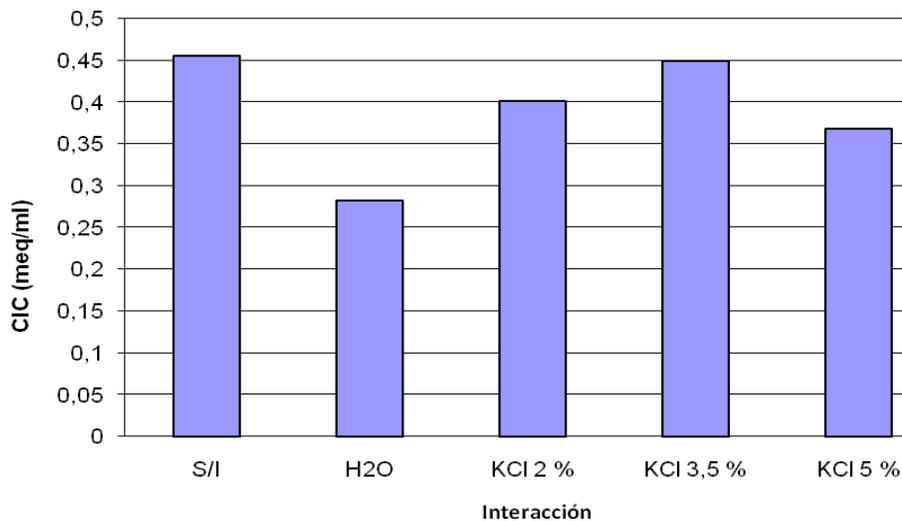


Figura 38. Curvas termogravimétricas de las distintas muestras de lutita.

También puede observarse que a pesar de que al agregar 3,5% en peso de KCl al agua el contenido de humedad en la roca disminuye al final de la interacción, ocurre el proceso inverso si se aumenta la cantidad de KCl hasta 5%. Esto ocurre debido a que el catión Potasio reduce el espacio entre las capas de arcilla debido a su atracción electrostática en un fenómeno conocido como *shrinking*, reduciendo a su vez la capacidad de quedarse las moléculas de agua en el espacio intercapa (Eslinger *et al*, 1980). Esto deja de ocurrir, como se muestra en el gráfico, al aumentar el contenido de KCl en la solución, lo que puede explicar el comportamiento mecánico que mostraban las probetas expuestas a la solución de KCl al 3,5%, estando menos alejado del comportamiento observado para la roca expuesta a las otras concentraciones.

#### 4.4.3. Capacidad de Intercambio Catiónico (CEC).

Los resultados de la determinación del Coeficiente de Intercambio Catiónico se presentan en la Figura 39 de manera comparativa. En ella se puede observar una coherente variación entre los valores, ya que la muestra que presenta un coeficiente más alejado de las condiciones iniciales es la expuesta a agua destilada, con la cual se esperaba que fuera más reactiva la lutita. Además, se repite la tendencia que se ha venido observando en la mayoría de las pruebas: la muestra que interactuó con la solución de KCl al 3,5% es la que presenta los resultados menos alejados de los resultados obtenidos con la muestra de lutita en su estado de preservación inicial. En este caso, los valores son muy parecidos, siendo 0,46 mEq/100gel valor registrado en la muestra inicial, y 0,45 mEq/100g para la muestra expuesta a la solución de KCl al 3,5%.



**Figura 39.** Coeficiente de Intercambio Catiónico para las distintas muestras de lutita.

Esto puede ser un indicio de que la concentración de KCl en fluido de poro es cercana a 3,5%, lo cual es esperado, ya que es una roca sedimentaria que fue formada en ambiente marino (*Fritz, 1986*). Al variar la concentración de KCl a 2 y 5% se rompe el equilibrio de las concentraciones y ocurre un desplazamiento de los cationes Potasio hacia adentro o afuera de la estructura rocosa. Esto es aún más evidente cuando el fluido al cual es expuesta la roca es agua destilada. Es posible que de haber contado

con una muestra de lutita bien preservada se hubiesen podido observar mayores cambios entre el CEC inicial y el medido luego de cada interacción.

#### 4.4.4. Área Superficial y Porosidad. Método BET.

Las muestras expuestas a los diferentes fluidos también fueron analizadas mediante el método BET para determinar si se presentaron cambios en el valor de área superficial específica,  $S_{BET}$ , y la configuración de la estructura porosa de la misma. En la Figura 40, se presentan las curvas de adsorción de Nitrógeno a su temperatura de evaporación sobre la superficie de las distintas muestras. Debido a la forma que tienen las curvas, se puede determinar que no hubo un cambio en la configuración de los poros, ni cambios en su forma, ya que todas las curvas mantienen la misma tendencia, incluyendo la histéresis en la misma posición. Los poros siguen teniendo una garganta o conexión a la superficie con área transversal más pequeña que el resto de la cavidad.

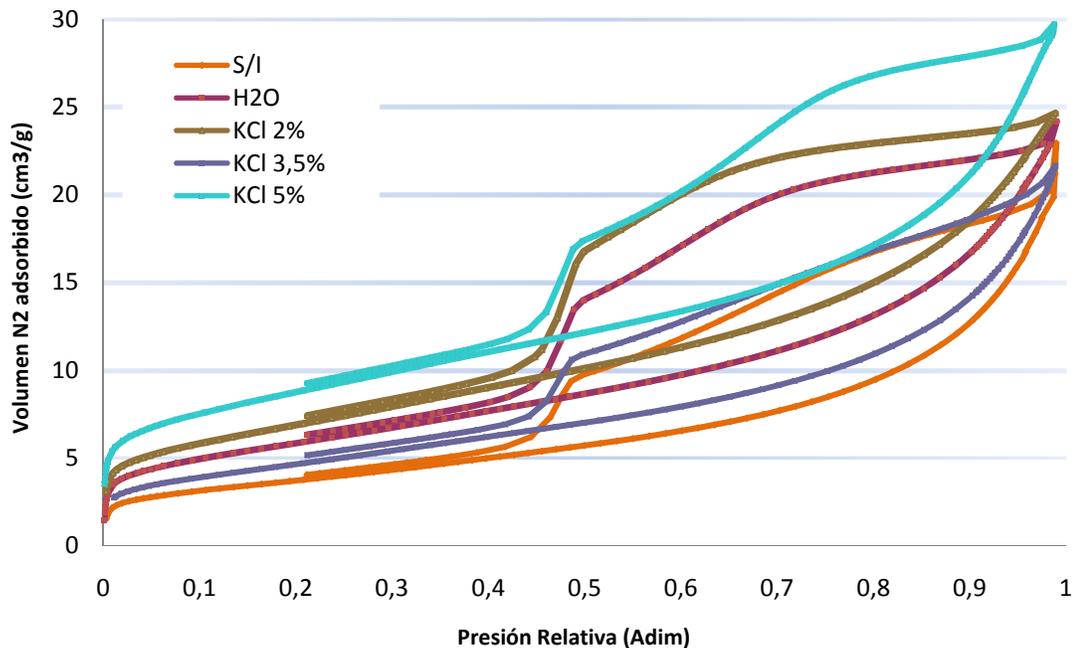
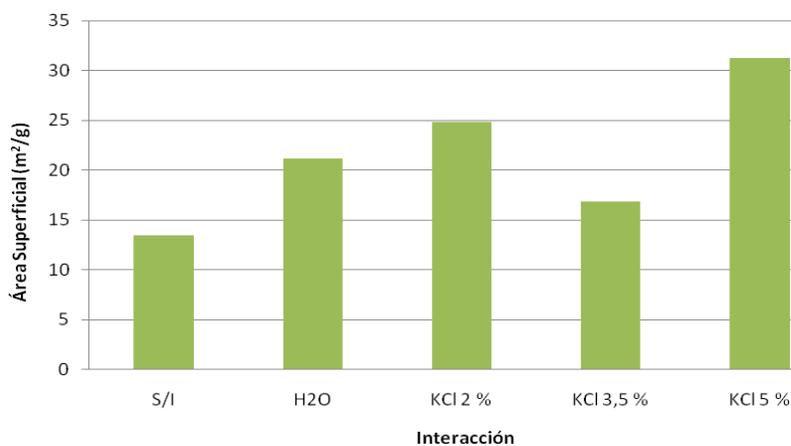


Figura 40. Curvas de Adsorción de N<sub>2</sub> sobre las distintas muestras de lutita.

En la Figura 40 se puede observar, sin embargo, que los valores de Nitrógeno adsorbido para cada presión relativa difiere un poco para cada muestra, y que la

muestra que presenta menos desviación del valor registrado con respecto a la muestra en estado de preservación inicial es la expuesta a la solución de KCl al 3,5%; mientras que la muestra que más se aleja de estos valores es la que interactuó con la solución de KCl al 5%.

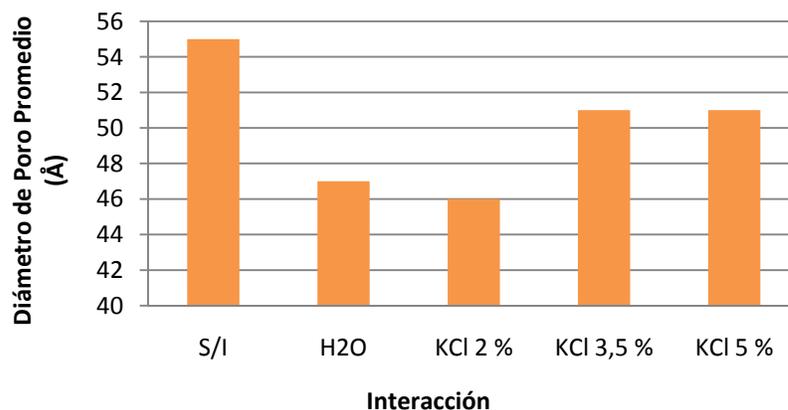
En la Figura 41 se presentan en forma comparativa los valores de área superficial para cada una de estas muestras, donde se evidencia lo expuesto. El comportamiento observado por las muestras expuestas a agua destilada y las soluciones de KCl al 2 y 5% obedece al aumento del espacio intercapa y a la penetración de moléculas de agua en estos espacios, fenómeno que evidencia su presencia en el comportamiento termogravimétricos de cada muestra. Al aumentar el espacio entre cada unidad arcillosa, ocurre consecuentemente el aumento del área sobre la cual el Nitrógeno puede ser adsorbido, aumentando por ende los valores de área superficial específica obtenidos mediante el método BET.



**Figura 41.** Valores de área superficial específica para las distintas muestras de lutita.

En la Figura 42 se tienen los valores promedio de diámetro de poro para las distintas muestras de lutita. Aquí se nota una variación entre los diámetros de poro registrados por el método BET en cada muestra, y aunque en la Figura 40 se observa que no hubo una variación significativa en la configuración de estos poros, esto no es una contradicción, ya que si bien no hubo una alteración de la relación garganta-cavidad,

los poros pudieron haber sufrido una disminución de su tamaño global debido al flujo de agua hacia adentro de los espacios intercapa en los minerales arcillosos, bien sea debido al fenómeno de hinchamiento o por ósmosis.



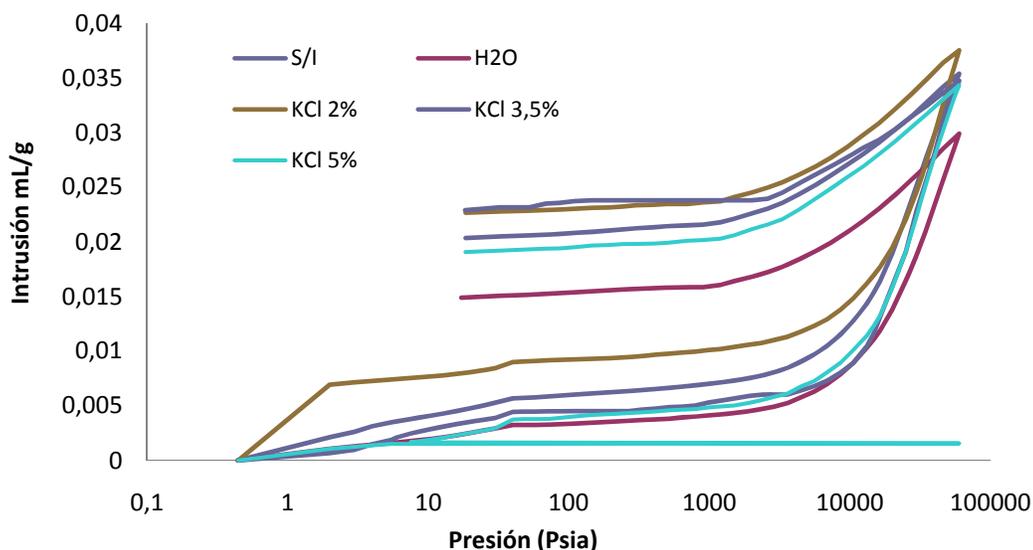
**Figura 42.** Valores de diámetro de poro promedio para las distintas muestras de lutita.

De nuevo se tiene el mismo comportamiento que ha venido observándose en los resultados presentados anteriormente, al encontrar que la muestra de lutita que tiene un diámetro de poro promedio más cercano al de la lutita en estado de preservación inicial es la que fue expuesta a la solución de KCl al 3,5%. Se puede observar que las gráficas mostradas en las Figura 421 y 42 tienen un comportamiento que podría esperarse ya que a medida que aumenta el diámetro de poro promedio disminuye el área superficial. Este es un parámetro que claramente altera el comportamiento mecánico de la lutita en la celda, ya que disminuye su resistencia al alterar su cementación y fuerzas intergranulares.

#### 4.4.5. Porosidad. Método de Intrusión de Mercurio.

Por último, se presentan los resultados de la porosimetría por el método de intrusión de Mercurio. En la Figura 43 se tienen las curvas de intrusión y extrusión del Mercurio con respecto a la presión para cada muestra de lutita. En ella se observa una configuración de los poros iguales a la observada por la muestra en estado inicial, con excepción de la expuesta a la solución de KCl al 2% que presenta un aumento brusco de Mercurio intrusado a muy bajas presiones, lo cual habla de un aumento del

volumen de vacío intersticial en la muestra. Esto indica una particularidad en la superficie de la muestra, aunque el resto de la curva no presenta cambios en la morfología poral de la muestra en cuestión, y se debe a un evento aislado, ya que ninguna otra muestra presentó variaciones en el vacío interparticular.



**Figura 43.** Curvas de intrusión de Mercurio para las distintas muestras de lutita.

La Figura 44 presenta en forma comparativa los resultados de porosidad obtenidos por este método, donde puede observarse que hay una variación menor en cuanto al volumen total ocupado por los poros (porosidad), que los cambios mostrados en el diámetro promedio de los poros o el área superficial de las muestras en las Figuras 41 y 42. Esto se debe a que los diámetros de los poros en estas muestras de lutita no entran completamente dentro del rango de medición del método de intrusión de Mercurio, ya que hay una cantidad representativa de los poros cuyos diámetros se encuentran por debajo de 30 Å como se muestra en la Figura 29.

Es por lo expuesto anteriormente que este método no puede representar los cambios reales que ocurren a nivel de la estructura porosa de esta muestra particular de lutita cuando es expuesta a las diferentes soluciones de KCl. Sin embargo, es posible que sirva perfectamente si se trabaja con una sección lutítica de menor profundidad.

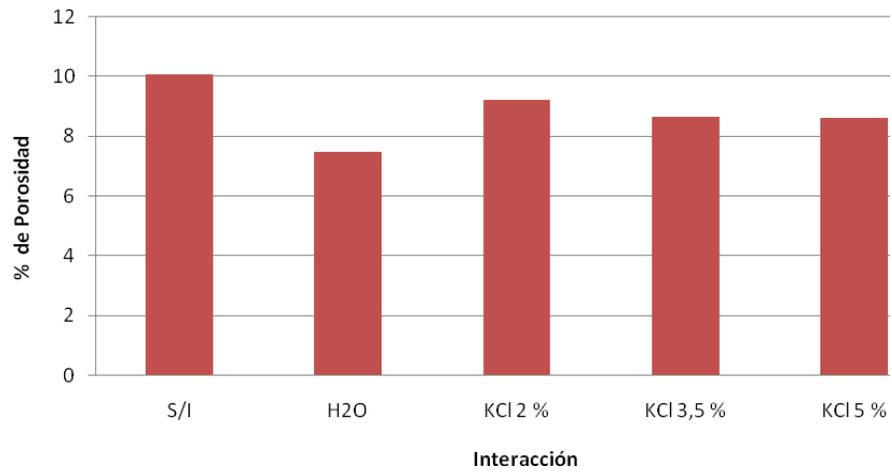


Figura 44. Porosidad para cada una de las muestras de lutita.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

Luego de la realización del presente Trabajo Especial de Grado y de analizar los resultados obtenidos en el mismo, se establecieron las siguientes conclusiones:

- El núcleo extraído del pozo SBC-140 en el año 2002 no fue preservado en aceite como es recomendado, habiendo tenido un indeseable contacto con el aire.
- La sección lutítica del núcleo SBC-140 posee en promedio un 67% de minerales de arcilla, y un 33% de minerales accesorio.
- El principal mineral accesorio presente en la sección lutítica del Núcleo SBC-140 es el cuarzo.
- La calcita observada en el núcleo SBC-140 presenta puntos de dolomitización.
- Los principales minerales de arcilla presentes en el núcleo SBC-140 son esmectita y caolinita, los cuales han sufrido procesos de ilitización y cloritización, respectivamente.
- El método de Difracción de Rayos X no puede diferenciar totalmente la esmectita y la ilita presentes en el núcleo SBC-140.
- El método de Difracción de Rayos X no puede diferenciar totalmente la caolinita y la clorita presentes en el núcleo SBC-140.
- Los métodos de Difracción de Rayos X (XRD) y Microscopía electrónica de Barrido (SEM) son complementarios para identificar los minerales de arcilla presentes en el núcleo SBC-140, al igual que las transformaciones que éstos han sufrido.
- La muestra del núcleo SBC-140 posee 2,6% de humedad, aunque no es posible determinar con exactitud la humedad presente *in situ* debido a la manipulación previa del núcleo.

- El bajo Coeficiente de Intercambio Catiónico del núcleo SBC-140 demuestra que el mismo fue objeto de interacciones con la atmósfera durante su almacenamiento.
- Para el rango en el cual están situados los diámetros de poro, el método BET permite describir la estructura micro y mesoporosa del Núcleo SBC-140.
- La intrusión de Mercurio no describe en su totalidad la distribución de tamaño de poro del núcleo SBC-140 debido al carácter microporoso del mismo.
- La prueba de hinchamiento lineal es una manera rápida, sencilla y económica para predecir el grado de interacción de una roca lutítica con un fluido.
- El tiempo promedio durante el cual un hoyo permanece desnudo a una profundidad cercana a los 14900' (4540m) en las adyacencias del pozo SBC-140 es de 13 días.
- Un tapón consistente de roca lutítica del Núcleo SBC-140 luego de interactuar con agua destilada durante 13 días no mantiene su forma, siendo imposible realizar ensayos uniaxiales en una celda.
- La resistencia a la compresión máxima de la sección lutítica del Núcleo SBC-140 es de aproximadamente 45 MPa; ésta se reduce a la mitad al interactuar con fluidos base agua.
- La sección lutítica del Núcleo SBC-140 aumenta su elasticidad al interactuar con las distintas soluciones, siendo la que menos se aleja del comportamiento inicial la expuesta a la solución de KCl al 3,5%.
- La Relación de Poisson de la sección lutítica del Núcleo SBC-140 aumenta al interactuar con las distintas soluciones, siendo la que menos se aleja del comportamiento inicial la expuesta a la solución de KCl al 5%.
- Los tapones horizontales no arrojan resultados coherentes en el ensayo uniaxial debido a la orientación de los planos de debilidad.

- El estudio mineralógico no refleja ningún cambio para el Núcleo SBC-140 luego de su interacción con los distintos fluidos.
- Del análisis termogravimétrico se observó que existe un flujo de agua hacia adentro de la lutita del Núcleo SBC-140 una vez que ésta es expuesta a fluidos base agua.
- La muestra del Núcleo SBC-140 que mantuvo un contenido de humedad más parecido con el medido inicialmente fue la expuesta a la solución de KCl al 3,5%.
- La muestra del Núcleo SBC-140 que mantuvo un coeficiente de intercambio catiónico más parecido con el determinado inicialmente fue la expuesta a la solución de KCl al 3,5%.
- La exposición de la lutita del Núcleo SBC-140 a los fluidos base agua no refleja un cambio en la morfología general de la estructura porosa, aunque sí en sus dimensiones.
- La muestra del Núcleo SBC-140 que mantuvo un valor de  $S_{BET}$  más parecido con el determinado inicialmente fue la expuesta a la solución de KCl al 3,5%.
- De los fluidos estudiados, la solución de KCl al 3,5% es la que posee una menor interacción fisicoquímica con la sección lutítica del Núcleo SBC-140.

## CÁPITULO VI

### RECOMENDACIONES

En esta sección se presenta una serie de recomendaciones, propuestas con la finalidad de mejorar los resultados obtenidos en este Trabajo Especial de Grado:

- Con el fin de mantener la mayor similitud con las condiciones *in situ* de la formación y obtener resultados que demuestren fielmente los procesos de interacción roca-fluido durante la perforación, se recomienda tomar las debidas precauciones a futuros procesos de extracción y preservación de núcleos de secciones lutíticas.
- Se recomienda el cotejo de los resultados obtenidos en esta investigación con los predichos por los distintos software actualmente en uso en la industria para determinar y subsanar errores en estos, producto de las aproximaciones y suposiciones hechas en los algoritmos de cálculo y las características geoquímicas de las formaciones geológicas de nuestro país.
- Con el objetivo de determinar un tiempo crítico durante el cual la sección lutítica del hoyo puede permanecer desnuda sin sufrir daños terminales, se recomienda el uso de la variable “Tiempo” en futuros estudios de interacción de rocas lutíticas con fluidos de perforación base agua.
- Se recomienda el uso de la metodología desarrollada en este Trabajo Especial de Grado en el estudio de la interacción de rocas lutíticas de nuestro país, con los aditivos más utilizados actualmente en fluidos de perforación base agua, para así conocer las interacciones fisicoquímicas que actualmente ocurren durante la perforación.
- Debido a la dificultad que se presenta en la extracción de tapones de los núcleos, se recomienda la detallada planificación de los ensayos mecánicos

con el fin de disminuir la cantidad necesaria de muestras durante futuros trabajos de investigación.

- Se recomienda el uso de ensayos triaxiales para evidenciar si ocurren alteraciones en la envolvente de falla de las lutitas expuestas a distintos fluidos de perforación base agua.
- Se recomienda la integración de conocimientos actuales de nanomateriales y polímeros en solución a los estudios de interacciones lutita-fluido y su efecto en las propiedades mecánicas, para contribuir al desarrollo de fluidos de perforación base agua de alto desempeño en nuestro país.
- Se recomienda realizar un estudio exhaustivo a nivel nacional de los costos involucrados en el uso de fluidos de perforación base aceite, tomando en cuenta los pasivos ambientales, y contrastarlo con los costos del desarrollo de fluidos de perforación base agua de alto desempeño y su posterior uso en el país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-BAZALI, T; ZHANG, J.; CHEVERNERT, M.; SHARMA, M. “*Factors controlling the Membrane Efficiency of Shales When Interacting With Water Based and Oil Based Muds*”. Internacional Oil & Gas Conference and Exhibition in China. Beijing, China. Diciembre, 2006.
- ALONSO, J. “Petrología Sedimentaria. Rocas Carbonatadas: Dolomías”. Universidad de Oviedo, 2003.
- BARBERII, E. “El Pozo Ilustrado”. FONCIED. Caracas, 1983.
- BERTOLINO, L.C.; DA FONTOURA, S.; GAGGIOTTI, K. “*Drilling Through Shales – Shale Characterization*” Joint Industry Project. Pontificia universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.
- CARMINATI, S.; DEL GAUDIO, L.; DEL PIERO, G.; BRIGNOLI, M. “*Water-Based Muds and Shale Interactions*”. SPE Internacional Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, E.E.U.U. Febrero 13-16. 2001.
- DARLEY, H.C.; GRAY, R. “Composition And Properties of Drilling and Completion Fluids”. Gulf Professional Publishing. Fifth Edition, 1988.
- DURAND, C.; FORSANS, T.; RUFFET, C.; ONAISI, A.; AUDIBERT, A. “*Influence of Clays on Borehole Stability: a Literature Survey*”. Revue de L’Institut Francais de Pétrole”. Parte uno, 50(2): 187-218. 1995. Parte dos, 50(3): 354-369. 1996.
- ESCUELA DE PERFORACIÓN. POZO ESCUELA. “*Curso de Ingeniería de Perforación. Módulo IV*”. Maraven. División de Operaciones de Producción. Lagunillas, 1990.
- ESLINGER, E.; PEVEAR, D. “*Clay Minerals for Petroleum Geologists and Engineers*”. SEPM Short Course Notes, No. 22. 1980.
- FAM, M.A. ; DUSSEAULT, M.B. ; SPE/IADC 47301: “*Borehole Stability in Shales: A Physico-Chemical Perspective*” SPE/ISRM Eurock’98. Trondheim, Noruega. Julio 8-10, 1998.
- FARÍAS, M. “Procedimiento Técnico: Determinación de la capacidad de Intercambio Iónico”. PDVSA, INTEVEP. 2002.
- FRITZ, S. “*Ideality of Clay Membranes in Osmotic Proceses: A Review. Clays and Clay Minerals.*” 1986.

- FRITZ, S.; MARINE, I. “*Experimental support for a predictive osmotic model of clay membranes*”. *Geochimica et Cosmochimica*. 1983.
- GARAVITO ROJAS, A. M. “*Chemical Osmosis in Clayey Minerals*”. Vrije Universiteit. Amsterdam, 2005.
- GONZÁLES, L.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. “Ingeniería Geológica”. Pearson Education, Madrid, 2002.
- HENSEN, E.; SMIT, B. “Why Clays Swell”. University of Amsterdam, Holanda, 2002.
- HORSRUD, P.; BOSTROM, B.; SONSTEBO, E. F.; HOLT, R. M. SPE 48986: “*Interaction Between Shale and Water Based Drilling Fluids: Laboratory Exposure Tests Give New Insight Into Mechanisms And Field Consequences of KCl Contents*” SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE (Ed.). New Orleans, E.E.U.U. 215-225. Septiembre 27-30, 1998.
- INGEOMIN. “Aplicaciones de la Microscopía Electrónica de Barrido”. IX Congreso Geológico Venezolano. 2007.
- KATTI, D.; SCHMIDT, S.; GHOSH, P; and Katti, K. “*Modeling Response of Pyrophyllite Clay Interlayer to Applied Stress Using Steered Molecular Dynamics*”. *Clays and Clay Minerals*, v52,n2, 171-178. 2005.
- LAL, M. Amoco Wellbore Stability Team. “Wellbore Stability. Drilling Handbook”. Amoco Production Company, 1996.
- LAL, M. SPE 54356: “*Shale Stability: Drilling Fluid Interaction and Shale Strength*”. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Caracas, Abril 21-23, 1999.
- LINARES, J.; HUERTAS, F.; CUADROS, F. “*Comportamiento geoquímico de Barreras Arcillosas: Transformaciones Hidrotermales en Esmectitas Alumínicas*”. 1993.
- LOMBARDI, B.; DAPINO, M.; MONTARDIT, P.; TORRES, R. “*Aproximación al Valor de Superficie Específica por un Método Manual y Simple*”. Jornadas SAM – CONAMET – AAS 2001, Septiembre, 2001.
- MI DRILLING FLUIDS, Manual de Fluidos de Perforación. Houston, Texas, 2001.
- MORTLAND, M.; MELLOR, J.L. “*Conductometric Titration of Soils for Cation Exchange Capacity*”. *Soils Science Society Proc.*, 18:363-364. 1954.

- NES, O-M. “*Chemical Aspects of Clay Swelling and Shale Stability. A Short Literature Review.*” Project Memo. SINTEF Petroleum Research. 2007.
- NES, O-M.; SØNSTEBØ, E.; FJÆR, E.; HOLT, R. “*Use of small Shale Samples in Borehole Stability Analysis*”. 6<sup>th</sup> North America Rock Mechanics Symposium (NARMS). Houston, E.E.U.U. 2004.
- RODRÍGUEZ, J.; MARTÍNEZ, M.; SÁNCHEZ, M.; “Determinación de los Parámetros Mecánicos Básicos en Lutitas, Formación Carapita, Oriente de Venezuela, Mediante el uso del Sistema TSI” IMME, UCV. 2004. Disponible: <[http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0376-723X2004000200002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2004000200002&lng=en&nrm=iso)>. ISSN 0376-723X. [Consulta: 4 de Junio, 2008]
- ROSA, R.C.R.S.; ROSA, A.L.S. ; FARIÁS, S.B. ; GARCÍA, M.H.; COELHO, A.S. SPE 94523: “*A New Inhibitive Water Based Fluid: A Completely Cationic System*”. SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Río de Janeiro, Brazil. Junio 20-23, 2005.
- ROSANA, F.T.; CHEVERNET, F.E.; SHARMA, M.M. “*The Role of Osmotic Effects in Fluid Flow Through Shales*”. Center for Petroleum and Geosystems Engineering, The University of Texas at Austin, CPE 2.502, Austin E.E.U.U. Agosto 11, 1999.
- SÁNCHEZ, E.; SÁNCHEZ M. “*Optimización de Parámetros de Perforación de Formaciones Lutíticas. Estado del Arte, Metodología y Aplicaciones de Campo.*” Informe Técnico INT-8445.2001. PDVSA INTEVEP, 2001.
- SANTARELLI, F.; CARMINATI, S. “Do Clays Swell? A Critical Review of Available Evidence” SPE/IADC 29421. Amsterdam, 1995.
- SANTOS, H.; DIECK, A.; DA FONTOURA, S.; ROEGIERS, J-C. “*Shale Reactivity Test: A Novel Approach to Evaluate Shale-Fluid Interaction*”. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34:3-4, Paper No. 268. 1997.
- SANTOS, H.; ROEGIERS, J-C. “*An Innovative Energy Approach to Analyze Wellbore Stability*”. SPE/ISRM Eurock '98. Trondheim, Noruega. Julio, 1998.
- SCHEI, G.; FJÆR, E.; DETOURNAY, E. ; KENTER, C.J. ; FUH, G.F.; ZAUSA, F. “*The Scratch test: An Attractive Technique for Determining Strength and Elastic Properties of Sedimentary Rocks*”. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, E.E.U.U. Octubre 1-4. 2000.
- SCHELEMMER, R.; FREIDHEIM, J.E.; GROWCOCK, F.B.; BLOYS, J.B., HEADLEY, J.A.; POLNASZEK, S.C. SPE 54557: “*Chemical Osmosis, Shale,*

- and Drilling Fluids*". SPE/IADC Drilling Conference, Dallas, E.E.U.U. Febrero 26-28. 2002.
- SMI ANALYTICAL. "Clay Analysis". Disponible: <http://www.smianalytical.co.za/clay-analysis.html> [Consulta: 4 de junio, 2008].
  - TAN, C. P.; CHEN, X.; WILLOUGHBY, D.R. ; CHOI, S.K. ; WU, B. SPE/IADC 52866: "A Keep-it- Simple Approach for Managing Shale Instability". SPE/IADC Drilling Conference, SPE (Ed.) Ámsterdam, Holanda. Marzo 9-11. 1999.
  - TVEIT, K-E. "A Model to Calculate the Effect of Diffusion into Small, Cylindrical Samples". NTNU. 2003.
  - UNIVERSIDAD DE CHILE. "Guía de Laboratorio de Geotecnia". Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas. 2007.
  - VAN OORT, E. "A novel technique for the investigation of drilling fluid induced borehole instability in shales".SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference. Delft, Holanda. Agosto 29-31. 1994.
  - VAN OORT, E. "On the Physical and Chemical Stability of Shales". Journal of Petroleum Science and Engineering. 38(2003) 213-235. 2003
  - VAN OORT, E.; HALE, A. H.; MODY, F. K.; ROY, S. "Transport in Shales and the Design of Improved Water-Based Shale Drilling Fluids". SPE Drilling & Completion, Septiembre 1996.
  - VAN OORT, E. A. SPE 37263: "Physico-Chemical Stabilization of Shales". SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, SPE (Ed.) Houston, E.E.U.U. 523-538. Febrero 18-21. 1997.
  - VIDGEL, L. "Determining Salinity Effects on Shale Using the Scratch Test". NTNU. 2002.
  - WEBB, P. "An Introduction to the Physical Characterization of Materials by Mercury Intrusion Porosimetry with Emphasis on Reduction and Presentation of Experimental Data". Micromeritics Instrument Corp. Norcross, Georgia. 2001.
  - YU, M. ; CHEN, G. ; CHENEVERT, M.E.; SHARMA, M.M.; SPE 71366: "Chemical and Thermal Effects on Wellbore Stability of Shale Formations". SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, E.E.U.U. Septiembre 30 – Octubre 3. 2001.

## APÉNDICE I

### GLOSARIO

**arcilla.-** [del lat. argilla, arcilla] - Término que designa un mineral o una roca compuesta esencialmente por estos minerales, pertenecientes al grupo de filosilicatos hidratados que se presentan en cristales muy pequeños. Su estructura es identificable por análisis de rayos X y se caracteriza por la superposición de hojas compuestas de capas tetraédricas y de capas octaédricas.

**arcillas detríticas.-** minerales arcillosos que proceden de la descomposición de la roca magmática o metamórfica y su posterior transporte. Pueden formarse en una cuenca de sedimentación en cuyo caso son minerales arcillosos autigénicos o neoformados. Las arcillas detríticas son corrientemente denominadas arcillas primarias o heredadas.

**bentonita.-** arcilla de grano muy fino (coloidal) y rica en montmorillonita ( $Al_2(OH)_2[Si_4O_{10}]$ ). El nombre deriva de un yacimiento que se encuentra en Fort Benton, Estados Unidos. El tamaño de las partículas es seguramente inferior a un 0,03% al del grano medio de la caolinita.

**campo.-** proyección en superficie del conjunto de yacimientos de hidrocarburos con características similares y asociados al mismo rasgo geológico.

**caolinita.-** Silicato de aluminio, principal componente del Caolín de fórmula  $Al_4[(OH)_8Si_4O_{10}]$ . Debe su origen a la meteorización de silicatos de arcilla; abunda en los yacimientos de de caolín.

**capacidad de intercambio catiónico.-** capacidad que tiene una roca para retener y liberar iones positivos. Las arcillas están cargadas negativamente, por lo que los suelos con mayores concentraciones de arcillas exhiben capacidades de intercambio catiónico mayores.

**clorita.-** Grupo de minerales hojosos, generalmente de coloración verdosa; son silicatos compuestos fundamentalmente de los grupos Mg(Fe), Al y OH.

**cuarzo.-** mineral compuesto de dióxido de silicio o sílice ( $SiO_2$ ). Cristaliza en el sistema trigonal (romboédrico). Incoloro en estado puro, puede adoptar numerosas tonalidades si lleva impurezas. Su dureza es tal que puede rayar los aceros comunes.

**diagénesis.-** [del gr. *dia*, a través, y *gênesis*, formación] - Conjunto de procesos que afectan a un depósito sedimentario y lo transforman progresivamente en una roca compacta. La diagénesis comienza con el depósito sedimentario y es poco preciso su límite con el metamorfismo.

**embolamiento.-** ocurre cuando los recortes arcillosos se adhieren a la mecha. Esto dependerá de las características de resistencia y de plasticidad de los recortes: en la zona plástica es donde la arcilla presenta el problema de adhesión a la mecha, mientras que esto no ocurre en la zona seca ni en la zona líquida.

**ensayo de transmisión de presión de poro.-** hasta ahora el método más apto para la medición de la baja permeabilidad en lutitas, ha sido usado para caracterizar las propiedades hidráulicas de las mismas. El tapón de lutita es colocado en un portamuestras de alta presión y alta temperatura. La presión de confinamiento es aplicada a través de una manga de goma y dos cabezales porosos de acero inoxidable, los cuales son conectados a dos reservorios externos e independientes, equipados con transductores de presión piezoeléctricos, bombas de alta presión, válvulas y sistemas de presión de respaldo para mantener la presión constante durante el flujo. A través de estos reservorios y sobre las caras de la muestra de lutita se hace circular fluidos de perforación o fluidos de poro simulados.

**esmectita.-** familia de arcillas con estructura 2:1 o consistente de dos láminas tetraédricas y una octaédrica. En esta fórmula estructural, la hoja tetraédrica está compuesta sólo de silicio y aluminio mientras que la hoja octaédrica contiene aluminio y una variedad de cationes. Debido a esto se pueden conseguir gran variedad de arcillas tipo esmectita simplemente cambiando el catión de la hoja octaédrica y manteniendo ocupada la hoja Tetraédrica con Si y Al.

**esquistos.-** Roca metamórfica cristalina de estructura secundaria hojosa o laminar, lo que permite pueda separarse en hojas. Se puede generalizar como una roca que ha adquirido una esquistosidad bajo la influencia de esfuerzos tectónicos.

**esquistosidad.-** Disposición en hojas oblicuas a los planos de estratificación y determinada por movimientos tectónicos. El frente de esquistosidad es la zona límite a partir de la cual aparece esta disposición en hojas.

**feldespatos.-** grupos de minerales constituyentes fundamentalmente de las rocas ígneas, aunque pueden encontrarse en cualquier otro tipo de roca. Los feldespatos corresponden a silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio, o mezclas de estas bases. Su estructura consiste en una base de silicio ( $\text{Si}^{4+}$ ) en la que una parte ha sido sustituida isomórficamente por aluminio. Al desequilibrarse las cargas se compensan con cationes metálicos ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ).

**filtrado.-** líquido forzado a través de un medio poroso durante el proceso de filtración.

**formación.-** estratos rocosos homogéneos de cualquier tipo, usados particularmente para describir zonas de roca penetrada durante la perforación

**granulometría.-** tamaño de los granos de los componentes minerales del suelo

**ilita.-** mineral que aparece en masas escamosas blancas y grasosas; está unido frecuentemente a la caolinita.

**invasión.-** Movimiento de un líquido fuera de su área asignada, dentro de otra área, posiblemente resultando en un cambio físico o químico del área invadida. Se refiere generalmente al movimiento de salmuera, lodo o filtrado de lodo dentro de una formación geológica.

**Ley de Bragg.-** permite predecir los ángulos en los que los rayos X son difractados por un material con estructura atómica periódica (materiales cristalinos). Viene expresada de la siguiente forma,

$$n\lambda = 2d\sin(\theta)$$

donde,

$n$  es un número entero,

$\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X,

$d$  es la distancia entre los planos de la red cristalina y,

$\theta$  es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

**mica.-** ortosilicato de aluminio con cantidades variables de potasa, magnesio, sodio o hierro: entra en la composición de muchas rocas. Es acuífera, elástica, fácilmente exfoliable (con superficies de exfoliación brillantes) y cristaliza en laminas planas. Forma parte de casi todas las rocas magmáticas.

**minerales autigénicos.-** [del gr. *authigenês*, indígena] se aplica a todo mineral originado en la roca donde se encuentra. Este término se emplea sobre todo para los minerales que han cristalizado en el seno de una roca sedimentaria a lo largo de la diagénesis.

**mojabilidad.-** capacidad de la superficie de un sólido para ser recubierta por un líquido.

**montmorillonita.-** silicato de arcilla de color gris blanquecino a amarillo; fórmula química  $(Al_2O_3[(4SiO_2)H_2O] + nH_2O)$ , con añadidos, entre otros, de MgO y CaO; es el componente principal de la bentonita. Aparece arcillas diluviales.

**ósmosis química.-** es el flujo de solución a través de una membrana semipermeable debido a una diferencia en la composición química del fluido a ambos lados de la membrana. El flujo ocurre desde una solución diluida a una más concentrada. La fuerza impulsora de este movimiento es el gradiente químico a través de la membrana.

**poro.-** volumen de espacio vacío en una sustancia sólida. En un yacimiento esto se refiere al espacio vacío dentro de una roca o matriz.

**porosidad.-** cantidad de espacio vacío en una roca de formación, generalmente expresada como porcentaje de vacío por volumen total. La porosidad absoluta se refiere a la cantidad total de espacio poral en una roca, independientemente de que este espacio pueda o no ser sujeto a la penetración del fluido.

**prueba de reactividad de lutita.-** se realiza intentando aislar los efectos hidráulicos y cuantificar cómo afecta el potencial químico a la lutita cuando es expuesta a diferentes

soluciones químicas. Se lleva a cabo en una celda triaxial asegurándose que la presión de confinamiento se acerque a la presión de poro.

**permeabilidad.-** capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. La velocidad con que un fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos: la porosidad del material, la densidad del fluido considerado (a su vez afectado por la temperatura), y la presión a la que está sometido el fluido. Habitualmente se usa el Darcy como unidad de medida, donde  $1\text{Darcy} = 9,86923 \cdot 10^{-13}\text{m}^2$ .

**pirofilita.-** silicato de alúmina hidratado, cuya fórmula es  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . Normalmente se presenta en forma de láminas o en agregados foliáceos o radiados, es suave y untuosa al tacto.

**revoque.-** sólidos suspendidos que se depositan sobre un medio poroso durante el proceso de filtración.

**termograma.-** gráfico que reporta la masa de una muestra con respecto a la temperatura a la que es sometida en un analizador termogravimétrico.

**velocidad de penetración.-** rapidez con la cual la mecha puede romper la roca y aumentar la profundidad del hoyo. Esta velocidad generalmente es reportada en pies por hora o metros por hora.

## APÉNDICE II FOTOGRAFÍAS



**Figura 45.** Lavado de las muestras previo a los ensayos petrográficos.



**Figura 46.** Lavado de las muestras previo a los ensayos petrográficos.



**Figura 47.** Proceso de corte de los tapones a las dimensiones requeridas



**Figura 48.** Proceso de refrentado de las caras de los tapones



**Figura 49.** Interacción roca-fluido



**Figura 50.** Interacción roca-fluido



**Figura 51.** Tapón horizontal luego de la interacción con KCl 3,5%



**Figura 52.** Tapón horizontal luego de la interacción con KCl 2%



**Figura 53.** Tapón vertical antes de ser ensayado en la celda uniaxial



**Figura 54.** Proceso de enchaquetamiento de los tapones.



**Figura 55.** Preparación de los ensayos uniaxiales



**Figura 56.** Tapón en celda uniaxial



**Figura 57.** Tapón vertical luego del ensayo uniaxial.



**Figura 58.** Tapón vertical luego del ensayo uniaxial.



**Figura 59.** Tapón horizontal luego del ensayo uniaxial.



**Figura 60.** Tapón horizontal luego del ensayo uniaxial.