

**ANALISIS DE LA INTERACCIÓN QUÍMICA ENTRE LOS  
FLUIDOS DE FORMACIÓN, FLUIDOS DE PERFORACION Y  
COMPOSICIÓN MINERAL DE ROCAS ARCILLOSAS EN LA  
ESTABILIDAD DEL POZO**

**RICARDO AMOROCHO PARRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2004**

**ANALISIS DE LA INTERACCIÓN QUÍMICA ENTRE LOS  
FLUIDOS DE FORMACIÓN, FLUIDOS DE PERFORACION Y  
COMPOSICIÓN MINERAL DE ROCAS ARCILLOSAS EN LA  
ESTABILIDAD DEL POZO**

**RICARDO AMOROCHO PARRA**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Geólogo**

**Director**

**MARCO ALVAREZ BASTOS**

**Geólogo PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO – QUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2004**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo tuvo la inspiración de mi maestro, mis padres y hermanos, y también de la mujer que en la actualidad es mi mayor motor para seguir luchando, Mariana Amorocho Uribe.

Muchas gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi mejor amigo, que me ha apoyado en mis triunfos y derrotas.

A Marco Álvarez Bastos por su colaboración y aportes en este trabajo.

Al ICP por su gran colaboración, de la mano del Ing. Néstor Saavedra, así como al señor Néstor Quevedo director de la Litoteca, Carmen Benavides directora del laboratorio de DRX y demás colaboradores.

Al profesor Antonio Henao, director del laboratorio de DRX de la UIS y personal encargado.

Al personal del Laboratorio de Lodos de la escuela de Ing. de Petróleos de la UIS, de la mano de la profesora Zuly Calderón.

A la planta de profesores y personal administrativo de la Escuela de Geología de la UIS.

**Ricardo Amorocho Parra**

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                                       | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|
| INTRODUCCIÓN                                                                          | 1    |
| 1. OBJETIVOS                                                                          | 3    |
| 1.1 GENERAL                                                                           | 3    |
| 1.2 ESPECÍFICOS                                                                       | 3    |
| 2. GENERALIDADES                                                                      | 4    |
| 2.1 LOCALIZACION                                                                      | 4    |
| 2.2 GEOLOGIA                                                                          | 5    |
| 2.2.1 Marco Geológico General                                                         | 5    |
| 2.2.2 Geología del Área de Estudio                                                    | 6    |
| 3. ANTECEDENTES                                                                       | 9    |
| 3.1 EFECTOS QUIMICOS Y MECANICOS DURANTE LA<br>PERFORACION DE UNA FORMACION ARCILLOSA | 10   |
| 3.1.1 Difusión de Presión de Poro, Plasticidad y Anisotropía                          | 10   |
| 3.1.2 Efectos Capilares, Osmosis y Alteración Físico-química                          | 11   |
| 3.1.3 Efecto de la baja permeabilidad del shale sobre la<br>estabilidad del hueco     | 13   |
| 3.1.4 Efecto del peso del lodo de perforación en la estabilidad<br>del shale          | 13   |
| 3.1.5 Hinchamiento y Reducción del Hueco                                              | 13   |
| 3.1.6 Derrumbes, Pegas y “Entrapamiento” de la Broca                                  | 15   |
| 3.1.7 Deshidratación y Modificación de las Propiedades<br>Reológicas del lodo         | 16   |
| 4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS                                                               | 17   |
| 4.1 ARCILLAS, CONCEPTOS Y PROPIEDADES                                                 | 17   |
| 4.1.1 Mineralogía                                                                     | 17   |

|         |                                                                 |    |
|---------|-----------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.1.1 | <i>Grupo Mineral de la Caolinita</i>                            | 17 |
| 4.1.1.2 | <i>Grupo Mineral de la Montmorillonita</i>                      | 18 |
| 4.1.1.3 | <i>Grupo Mineral de la Illita</i>                               | 20 |
| 4.1.1.4 | <i>Minerales Arcillosos Interestratificados</i>                 | 21 |
| 4.1.2   | Química                                                         | 22 |
| 4.1.2.1 | <i>Intercambio Iónico</i>                                       | 22 |
| 4.1.2.2 | <i>Comportamiento Frente Al Agua</i>                            | 25 |
| 4.2     | ENSAYOS DE LABORTARIO PARA CARACTERIZAR<br>MINERALES DE ARCILLA | 28 |
| 4.2.1   | Ensayos MBT                                                     | 29 |
| 4.2.2   | Pruebas DRX                                                     | 30 |
| 4.2.2.1 | <i>Análisis Cualitativo</i>                                     | 32 |
| 4.2.2.2 | <i>Análisis Cuantitativo</i>                                    | 35 |
| 4.3     | PERFORACION DE ROCAS ARCILLOSAS                                 | 37 |
| 4.3.1   | Lodos de Perforación                                            | 38 |
| 4.3.1.1 | <i>Propiedades de los Lodos de Perforación</i>                  | 38 |
| 4.3.1.2 | <i>Composición de los Lodos de Perforación</i>                  | 39 |
| 4.3.1.3 | <i>Función de los Lodos de Perforación</i>                      | 40 |
| 4.3.1.4 | <i>Clasificación de los Lodos de Perforación</i>                | 41 |
| 5.      | RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO                            | 44 |
| 5.1     | METODOLOGIA                                                     | 44 |
| 5.2     | RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS MBT                            | 50 |
| 5.3     | RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS DRX                            | 54 |
| 6.      | DISCUSIÓN (RESULTADOS Vs ANTECEDENTES) Y<br>SÍNTESIS            | 58 |
|         | CONCLUSIONES                                                    | 63 |
|         | RECOMENDACIONES                                                 | 65 |
|         | BIBLIOGRAFÍA                                                    | 66 |
|         | ANEXOS                                                          | 69 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                             | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 1. Ubicación del área de estudio                                                     | 4    |
| Figura 2. Cuencas Sedimentarias en Colombia                                                 | 6    |
| Figura 3. Dibujo esquemático de la estructura de la caolinita                               | 18   |
| Figura 4. Estructura de la montmorillonita                                                  | 19   |
| Figura 5. Estructura de la illita                                                           | 21   |
| Figura 6. Representación de una molécula de agua unida a capas adyacentes<br>de una arcilla | 25   |
| Figura 7. Prueba de gotículas para el punto final de la titulación con azul de<br>metileno  | 30   |
| Figura 8. Difracción de los rayos X por un cristal                                          | 31   |
| Figura 9. Diagrama de tratamientos químicos para arcillas                                   | 49   |
| Figura 10. Resultados generales de MBT de las 43 muestras                                   | 52   |
| Figura 11. Resultados de MBT para la Formación Guayabo                                      | 52   |
| Figura 12. Resultado de MBT para la Formación León                                          | 53   |
| Figura 13. Resultados de MBT para la Formación Carbonera                                    | 53   |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                                                        | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1. Capacidad de Intercambio Catiónico de algunos minerales arcillosos                                                                            | 23   |
| Tabla 2. Variación de la C.I.C. según el tamaño de las partículas                                                                                      | 24   |
| Tabla 3. Identificación de los minerales arcillosos (menor de dos micras), por difracción de rayos X                                                   | 32   |
| Tabla 4. Valores utilizados en la práctica (Å), para la caracterización de arcillas mediante rayos X y sometiendo la muestra a diferentes tratamientos | 34   |
| Tabla 5. Resultados de los ensayos MBT                                                                                                                 | 51   |



## LISTA DE ANEXOS

|                                                                                 | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| ANEXO A. Ley de Stokes                                                          | 69   |
| ANEXO B. Mapa de localización de los pozos utilizados en el<br>presente trabajo | 70   |
| ANEXO C. Listado de pozos, profundidades, intervalos y<br>formaciones           | 71   |
| ANEXO D. Difractogramas                                                         | 72   |

## RESUMEN

### TÍTULO:

**“ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN QUÍMICA ENTRE LOS FLUIDOS DE FORMACIÓN, FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y COMPOSICIÓN MINERAL DE ROCAS ARCILLOSAS EN LA ESTABILIDAD DEL POZO”**

### AUTOR:

Ricardo Amorcho Parra\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Estabilidad, SPE, piedemonte llanero, formación arcillosa, interacción química, ensayos de rayos X, pruebas de MBT.

### DESCRIPCIÓN:

En la industria petrolera, al perforar formaciones arcillosas se produce la inestabilidad del pozo lo cual representa un incremento entre el 10 y el 15% en el presupuesto de la perforación. Para disminuir este problema la industria ha invertido mucho dinero en investigación, que busca desarrollar mecanismos que brinden mayor control y estabilidad de estos tipos de formaciones durante su perforación. Estudios realizados y publicados por la *Society Petroleum Engineer (SPE)*, muestran que los principales efectos químicos que se ven involucrados en la interacción fluido de perforación/formación arcillosa son: 1) la ósmosis química y, 2) los esfuerzos de hidratación; pero existen otros, como: efectos capilares, deshidratación, desbalance de presiones e intercambio catiónico; los cuales generalmente no se presentan de forma independiente. En el piedemonte llanero el problema de inestabilidad de pozos representa un gran gasto para las compañías petroleras, ya que en este sector del país no sólo intervienen los factores químicos generados de la interacción fluido/roca, también los mecánicos como resultado del régimen de esfuerzos en el área ocasionan inestabilidad durante la perforación de pozos petroleros. Se realizaron pruebas de MBT y rayos X, en muestras de ripios extraídos de pozos del área, y se encontró que tienen un moderado contenido de minerales reactivos y bajo contenido de minerales propensos a sufrir hinchamiento; su componente principal es caolinita, lo cual hace que la roca sea poco hidratable, pero este tipo de mineral genera dispersión y por lo tanto derrumbes dentro del pozo. Sin embargo, se deben realizar más pruebas de laboratorio para cuantificar los daños y evaluar su influencia dentro de los posibles cambios dentro del régimen de esfuerzos durante la perforación.

*\*Proyecto de Grado*

*\*\*Facultad de ciencias Físico-Químicas. Escuela de Geología. Geólogo PhD. Marco Alvarez Bastos*

## ABSTRACT

### TITLE:

**“ANALYSIS OF THE CHEMICAL INTERACTION AMONG THE FORMATION FLUIDS, PERFORATION FLUIDS AND MINERAL COMPOSITION OF CLAYSTONES IN THE WELLBORE STABILITY”\***

### AUTHORS:

**RICARDO AMOROCHO PARRA\*\***

### KEY WORDS:

Stability, SPE, piedemonte llanero, clay formation, chemical interaction, analysis of X-ray, analysis of MBT.

### DESCRIPTION:

In the oil industry, the drilling of clay formations produce the wellbore unstability, this fact represents an increment between 10 and 15% in the budget of the drilling. For reducing this problem the all industry has invented too much money. In the searching of mechanisms that will provide better control and stability of the clay formations during the drilling. The *Society Petroleum Engineer* (SPE) has realized an published studies in wich they show that the pricipal chemical effects that are involved in the fluid interaction between the fluid perforation and the clay formation are:1) chemical osmosis, and 2) the hidratation stresses; however there exist others: capilar effects, deidratation, differences in pressure and cationic exchange; this mechanisms are not presented generally in a independent form. In the “Piedemonte Llanero” in Colombia the problem of the wellbore stability represents a high spending of money for oil companies, so in this sector of the country not only mediate the chemical factors origining of the fluid/rock interaction, in addition the mechanical factors how result of the stress status in the area, this origin inestability during the perforation of oil holes. It's realice probes of MBT and X-ray, in samples of bits extracting of holes of the area, and it's finded that have a moderate content of reactive minerals and low content of minerals swell; the main component is the kaolinite, it's do that the rock have not swell, but this mineral cause cavings in the hole. However, is have the realice more probes of laboratory for cuantify the damages and study your influence in the possible changes in the regime of the stress during the perforation of oil holes.

---

\*Degree Work.

\*\*Facultad de ciencias Físico-Químicas. Escuela de Geología. Geólogo PhD. Marco Álvarez

## INTRODUCCIÓN

Por mucho tiempo la perforación de rocas arcillosas ha sido uno de los principales problemas en la perforación de pozos petroleros, debido a que incrementa considerablemente el costo de las operaciones involucradas en este proceso (**Wong**, 1993). A pesar de los grandes progresos registrados en el área de la estabilidad de pozos, con mucha frecuencia, aun se siguen reportando problemas en shales; estos problemas comienzan con la fragmentación de las paredes del hueco, la transferencia de fragmentos de roca al anular y culminan en situaciones críticas como la reducción del hueco, pega de tuberías, derrumbes y en el peor de los casos la pérdida total del hueco. Para minimizar los daños en las rocas arcillosas durante la perforación las empresas perforadoras utilizan ciertos tipos de lodos de perforación. El lodo de perforación es una mezcla de diferentes componentes. Cada componente es agregado con el fin de mejorar ciertos aspectos del desempeño del lodo (soporte del hueco, capacidad de arrastre, invasión de filtrado y daño a la formación, control de presión, suspensión de ripios, etc.). En la industria petrolera comúnmente son utilizados dos tipos de lodos de perforación: lodos base agua (WBM) y lodos base aceite (OBM) (**Rodríguez**, 1976).

Los shales son rocas sedimentarias de grano fino compuestas de arcilla, sílice y algunas trazas de arena (**Potter**, 1980). En la industria petrolera el término shale es utilizado en un sentido más amplio para incluir todas las rocas sedimentarias de grano fino con alguna cantidad de mineral arcilloso presente, al igual que el nombre de lutita (**Moreno**, 1989). La composición mineralógica de la fase arcillosa varía ampliamente con el tipo de shale; illita, esmectita, caolinita y clorita son los minerales más comunes en los shales. La actividad química de los shales depende principalmente del porcentaje de minerales arcillosos hidratables (esmectita o vermiculita), el grado de saturación, el coeficiente de actividad, los procesos de intercambio catiónico entre el lodo y la roca y de la separación de las partículas de arcilla en el shale. La alteración de estos factores genera inestabilidad del hueco (**Bol**, 1974; **Rodríguez**, 1976; **Cress**, 1983; **Moreno**, 1989; **Roy**, 1993; **Fam**, 1999 y **Simpson**, 2000, entre otros).

Este trabajo pretende mediante pruebas de *Metil Blue Testing* (MBT) y difracción de rayos X (DRX), caracterizar mineralógicamente muestras de rocas arcillosas provenientes de ripios de algunas formaciones, como Necesidad, Guayabo, León y Carbonera (miembro superior) del piedemonte de los Llanos para determinar su posible comportamiento durante la perforación. Con éste fin este trabajo se ha estructurado de la siguiente forma: Un primer capítulo relacionado con los rasgos geológicos más importantes del área; un segundo capítulo que recopila la información obtenida sobre publicaciones de estudios relacionados con la estabilidad de shales y su comportamiento durante la perforación; el tercer capítulo trata los aspectos teóricos mas importantes en la mineralogía de arcillas; un cuarto capítulo que describe teóricamente las pruebas de MBT y DRX, el quinto capítulo recopila toda la información obtenida de las pruebas de laboratorio y el sexto capítulo es una breve discusión y comparación de los resultados de laboratorio con la información recopilada en el tercer capítulo.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar muestras de arcillas provenientes de las formaciones Necesidad, Guayabo, León y Carbonera (miembro superior) de la cuenca de los llanos, con el fin de determinar su comportamiento durante la perforación de pozos petroleros.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar los minerales arcillosos que generan mayor inestabilidad del pozo en la perforación.
- Establecer el marco teórico sobre los efectos químicos involucrados en la perforación de rocas arcillosas.
- Realizar pruebas de laboratorio como difracción de rayos X y MBT (*Metil Blue Testing*), que permitan caracterizar los minerales arcillosos presentes en las formaciones Necesidad, Guayabo, León y Carbonera (miembro superior) de la Cuenca de los Llanos.
- Discutir el comportamiento de las rocas arcillosas pertenecientes a las formaciones Necesidad, Guayabo, León y Carbonera (miembro superior) durante la perforación en la cuenca de los llanos, teniendo en cuenta los resultados de laboratorio.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1 LOCALIZACION

La cuenca de los llanos es una Cuenca Subandina yacente al Este de las Cordillera de los Andes. Está situada al extremo norte de un tren de Cuencas Subandinas de tipo Foreland que van desde Argentina en el Sur hasta Venezuela al Norte. La mayor parte de la cuenca de los Llanos Orientales está ubicada en Colombia y solo una pequeña parte en Venezuela. La cuenca tiene una extensión de 220.000 Km<sup>2</sup> (Villegas et al, 1994 en Torrado, 2000), aunque otros autores consideran que no sobrepasa los 190.000 Km<sup>2</sup> como por ejemplo Govea y Aguilera (1985), en Torrado, 2000.

Está limitada al Occidente por el Piedemonte de la Cordillera oriental. Al Norte se extiende hasta Venezuela desde el Río Arauca y está limitada por los Andes de Mérida. Al Este limita con el Escudo Precámbrico de la Guyana y al Sur por la Cuenca del Amazonas, de la cual esta separada por la Serranía de La Macarena y el Arco de Basamento de Vaupés (Saliente del Vaupés) (Figura 1).



Figura 1. Ubicación del área de estudio. Tomado de Rubio et al (1988) en Torrado, 2000.

## **2.2 GEOLOGÍA**

### **2.2.1 Marco Geológico Regional**

Las Cuencas Subandinas en Colombia tienen una extensión aproximada de 600.000 Km<sup>2</sup> y más de la mitad se encuentra en la parte oriental del país; la Cuenca de los Llanos se caracteriza por estar limitando con la Cordillera de los Andes y por tener un cinturón plegado y fallado hacia el frente de montaña y por hacerse más profundas hacia el Oeste y más someras hacia el Escudo granítico de Guyana al Oriente de la Cuenca (McCollough & Cavier, 1989; en Torrado, 2000). Fisiográficamente incluye las provincias planas del oriente y las zonas selváticas del Amazonas y Putumayo. La región Oriental de Colombia incluye las cuencas sedimentarias de los Llanos Orientales hacia el Norte y Putumayo y Amazonas en el Sur. Estas dos últimas se extienden hacia el Ecuador, Perú y Brasil.

En Colombia se han clasificado 18 cuencas según su tipo de basamento, el tipo de movimiento de placas que originó la cuenca (Convergente y Divergente) y posición del área de depositación con respecto a la placa. Se reconocen las cuencas del Magdalena Superior, Magdalena Inferior, Magdalena Medio, Cauca-Patía, Guajira, Uraba, Sinú, Chocó, Pacífico, Túmaco, Cesar-Ranchería, Catatumbo y Cayos, también se encuentran las cuencas de la Cordillera Oriental, Llanos Orientales, Putumayo, Caguán Vaupes y Amazonas (Figura 2).

Según su origen las cuencas se pueden clasificar en continentales (Llanos, Putumayo, Valle Medio del Magdalena, Valle Superior del Magdalena, Catatumbo, Cesar-Ranchería, Cordillera Oriental, Amazonas y los Cayos), de borde continental (Valle Inferior del Magdalena y Guajira) y oceánicas (Chocó, Túmaco, Pacífico y Cauca-Patía) (Torrado, 2000).





Figura 2. Cuenas Sedimentarias en Colombia. Tomado de [www.ecopetrol.com.co](http://www.ecopetrol.com.co).

## 2.2.2 Geología del Área de Estudio

El asentamiento tectónico de Colombia es el resultado de la interacción de la Placa de Nazca con la Placa Suramericana y el desplazamiento lateral de la Placa del Caribe al Norte. Estas condiciones tectónicas influenciaron la evolución de la Cuenca de los Llanos, la cual se remonta al Paleozoico, cuando se desarrollaron grabens como el de Arauca, de tendencia NE. Estos constituyen sitios de depositación intensa lo que han

resultado en más de 8 Km. de estratos Cambro-Ordovícicos (McCollough, 1987; en Torrado, 2000). Las secuencias equivalentes en tiempo son bastante más delgadas que en el resto de la cuenca. Durante el levantamiento de la Cordillera Oriental en la Orogenia Andina, la cuenca fue bisectada, y la región oriental que tiene una mayor área es la Cuenca de los Llanos y la porción occidental, que forma una faja alargada es conocida como la Cuenca del Magdalena, separadas entre sí por la Cordillera Oriental (Villegas et al, 1994; en Torrado, 2000). Se ha considerado un espesor promedio de 22.000 pies, pero se han encontrado profundidades de hasta 30.000 pies, en las zonas más occidentales. La cuenca es una depresión topográfica orientada SSW-NNE que se desarrolla en el flanco Occidental del Escudo de la Guyana, por tal razón los menores espesores se observan hacia la parte mas Oriental de la cuenca. Estos registros de rocas están representando secuencias con ciclos de sedimentación de relleno marginal (Paleozoico Inferior) y un interior fracturado (Paleozoico Superior-Terciario). Los ambientes predominantes iniciales corresponden a barras fluviales, rellenos de canal y canales deltáicos (Govea & Aguilera, 1985; en Torrado, 2000) durante el Cretácico, seguidos por ambientes continentales en el Terciario y Reciente (Pérez, 1985; en Torrado, 2000).

La Cuenca de los Llanos se clasifica según el tipo de basamento como Continental, según el movimiento de las placas como Divergente (Govea & Aguilera, 1985; en Torrado, 2000) y de tipo pericratónica según la posición del área de depositación con respecto a la placa. (Pérez, 1985; en Torrado, 2000). La cuenca también ha sido definida como de tipo "Foreland", donde la roca reservorio está constituida por areniscas de edades Cretácicas y Terciarias, de ambientes de depositación deltáico a marino, que originan rocas capaces de acumular aceite principalmente, en zonas con plegamientos y fallas antitéticas.

Actualmente en la industria petrolera se utiliza la nomenclatura usada por Notestein (1944) en la antigua concesión Barco (Torrado, 2000). Dicha nomenclatura fue introducida en la cuenca de los Llanos por correlación litoestratigráfica y sin control bioestratigráfico por lo que su significado cronoestratigráfico crea contradicción si se le compara con la definición original. Provisionalmente se utiliza esta nomenclatura debido

a su uso habitual entre las compañías petroleras aunque sus límites cronoestratigráficos no coinciden en los Llanos (Torrado, 2000).

A continuación se realiza una breve descripción de las formaciones de interés para el presente trabajo:

### **Mioceno-Plioceno**

En la columna estratigráfica encontramos el tope de la Formación Carbonera en el Mioceno Temprano, la cual consta principalmente de arcillositas grises moteadas alternando con areniscas grises y verdosas, y limolitas grises, abundantes niveles de carbón con restos vegetales, su espesor supera los 1000 m y se considera de ambiente marino y fluvio-marino; suprayacida por un shale gris y pardo, moteado, con niveles de areniscas arcillosas, correspondientes a la Formación León, con un espesor aproximado de 1000 m y de ambiente transicional a marino; posteriormente y suprayaciendo esta formación se encuentran unas arcillositas abigarradas y lutitas pardas y grises con intercalaciones de arenisca arcillosa en parte conglomerática, las cuales hacen conforman la Formación Guayabo, con espesor aproximado de 1200 m., seguida de esta y en el tope del Terciario se encuentran arcillositas varicoloreadas y areniscas arcillosas finas, pertenecientes a la Formación Necesidad, con espesor aproximado de 200 m; para éstas formaciones se ha propuesto un ambiente fluvial con alto aporte de sedimentos provenientes de la Cordillera Oriental (Torrado, 2000).

### **Depósitos Cuaternarios.**

Los cuerpos cuaternarios son aluviones y terrazas aluviales, que forman una cobertera de meteorización sobre la zona (Torrado, 2000).

### 3. ANTECEDENTES

Los shales son rocas sedimentarias de grano fino con altos contenidos de arcilla que pueden estar sujetas a hidratación y al hinchamiento cuando se exponen al contacto con agua. En general, los shales son rocas de buena porosidad, con espacios muy pequeños y de muy baja permeabilidad.

Muchos autores han escrito sobre el comportamiento de las arcillas durante la perforación de pozos petroleros; las publicaciones más específicas son las de: **Moreno et al**, (1989); quien afirma que las arcillas más sensibles al agua –montmorillonitas, illitas y variedades intercaladas – pueden constituir hasta el 80% del peso de la lutita y son responsables de la mayoría de los problemas graves encontrados en el pozo. Cuando estas lutitas están en contacto con lodos base agua, se hidratan. Según **Kubacki** (1981), la caolinita en contacto con el agua se dispersa. Para **Fam et al.**, (1999) la alta superficie específica de shales esmectíticos ( $S_a$  aprox.  $100 \text{ m}^2/\text{g}$ ) son el principal factor en el hinchamiento y por el contrario los shales cuarzo-illíticos son considerados generalmente como no hinchables.

Los principales inconvenientes para mantener la estabilidad de los shales durante su perforación se presentan al tratar de mantener las propiedades químicas y físicas in situ de la roca, ya que si esto no se satisface los efectos químicos y mecánicos producto de las reacciones con los fluidos de perforación provoca la inestabilidad del pozo. A continuación se trata de dar un breve recuento de los efectos químicos y mecánicos que se tienen en cuenta durante la perforación de un shale, además de los posibles daños que se pueden ocasionar cuando no se realiza una buena práctica de perforación.

### 3.1 EFECTOS QUIMICOS Y MECANICOS DURANTE LA PERFORACION DE UNA FORMACION ARCILLOSA

El comportamiento de los shales durante su perforación es variado, y depende en gran parte del tipo de fluido de perforación y las técnicas que se utilicen; éstos no se presentan en un orden específico, pero sí algunos son el resultado de otros; por ello a continuación no proponemos un orden específico de ocurrencia, ni de prioridad a la hora de tener en cuenta, pero si tratamos de describir de una forma general cuales son los factores químicos y mecánicos que intervienen en la inestabilidad durante la perforación de rocas arcillosas.

#### 3.1.1 Difusión de Presión de Poro, Plasticidad y Anisotropía.

La difusión de presión de poro es el efecto de las diferencias de presiones entre la presión de poro de la formación y la presión ejercida por la columna del fluido de perforación. La densidad óptima del lodo de perforación es un parámetro de diseño fundamental en la ingeniería de perforación, ya que de ésta depende la presión ejercida por el fluido. Lo más importante es impedir que haya un paso de fluidos del lodo a la formación y viceversa, ya que esto generaría contaminación del lodo e inestabilidad de la formación (**Santarelli**, 1995). Además agrega que la plasticidad es un comportamiento que sufren las rocas cuando se someten a altos niveles de esfuerzos, lo cual se manifiesta en una deformación irreversible antes del fallamiento. Este comportamiento es generalmente modelado con leyes consecutivas elastoplásticas. Los shales se pueden dividir en plásticos y suaves, los primeros son más frágiles y antiguos, y están más propensos a sufrir fracturamiento por diferenciales de presión altos.

Los derrumbes según **Fam et al.**, (1999), son provocados por varios motivos. El más importante está relacionado con la densidad del lodo de perforación, la cual usualmente se selecciona para satisfacer dos criterios: La presión del lodo no debe exceder la presión de fracturamiento hidráulico ( $P_{max}$ ) y la presión ejercida por el lodo ( $P_{mud}$ ) debe ser más alta que la presión de colapso del pozo ( $P_{col}$ ). Usualmente  $P_{col}$  es tomada igual o un poco más grande que la presión de poro del fluido de formación ( $P_{for}$ ). Lodos de baja densidad pueden llevar a cedencias excesivas de la

formación y al colapso del hueco, mientras que lodos de alta densidad provocan fracturas hidráulicas en las rocas. Cualquier peso del lodo que cumpla  $P_{\text{mud}} > P_{\text{for}}$ , conlleva a un gradiente de presión que obliga la entrada de filtrado hacia la formación, y si este filtrado es corrosivo provoca el deterioro de la cohesión de la roca. Es decir, un lodo de alto peso puede dar mas soporte, pero puede también acelerar el desmoronamiento de la roca debido al deterioro de la cohesión de sus partículas.

Debido al alto contenido de arcillas en los shales y al hecho de que las arcillas estén compuestas por láminas además de su modo de sedimentación, los shales son considerados muy a menudo como rocas anisotrópicas. El termino anisotropía comprende tanto la anisotropía de los esfuerzos in-situ, como la anisotropía de la roca. Un ejemplo es que en los shales la permeabilidad varía de acuerdo al ángulo en que el fluido entra en contacto con la roca y también el comportamiento ante los esfuerzos dependerá del ángulo de aplicación, aunque una cosa no se relaciona con la otra, esto simplemente ilustra el carácter anisotrópico del shale (**Rodríguez, 1976**).

### *3.1.2 Efectos Capilares, Osmosis y Alteración Físico-química.*

El efecto capilar es ocasionado por el bajo radio del poro en los shales y el contenido de agua y materia orgánica o agua y gas en los poros. La presión capilar depende del radio del poro y de la mojabilidad de la roca, esto generalmente se genera cuando el shale es invadido por los fluidos de perforación lo cual promueve un diferencial de presión (**Fam et al., 1999**).

La osmosis es el intercambio de iones entre la formación y los fluidos de perforación. La osmosis puede definirse como el flujo de un solvente de una solución de baja concentración hacia una solución de concentración más alta, a través de una membrana que es permeable al solvente pero no lo es al soluto (**Chenevert, 1970**). Esto causa una presión sobre la membrana permeable que se conoce como presión osmótica (**Simpson et al., 2000**).

Adicionalmente **Simpson et al.**, (2000), ha mostrado que las interacciones de fluidos de completamiento y perforación con formaciones arcillosas han sido reconocidas por largo tiempo como un factor principal en el costo del hallazgo y producción de petróleo y gas. En la mayoría de los casos los problemas pueden evitarse mediante el uso de lodos base aceite. La excelente estabilidad de los shales provista por los fluidos de base aceite ha sido atribuida en parte al establecimiento de una membrana semipermeable ideal en la interfase lodo/shale. La membrana tiene orificios lo suficientemente amplias para permitir el paso de las moléculas de agua, pero lo suficientemente pequeñas para prevenir el paso de iones disueltos y moléculas. Esto tiene como resultado el desarrollo de un diferencial de presión osmótica que depende de la relación de la actividad del agua (tendencia a la fuga) del lodo ( $a_{df}$ ) con la del fluido de poro de los shales ( $a_s$ ). La transferencia de agua se presenta de mayor actividad (menor concentración de iones disueltos ó moléculas) a menor actividad. Solutos, como el cloruro de calcio, pueden por lo tanto añadirse a la fase acuosa de la emulsión base aceite para reducir la actividad del agua y desarrollar la suficiente fuerza osmótica para prevenir la hidratación de los shales ó extraer agua de los shales. En años recientes se ha postulado que los lodos base agua forman una membrana semipermeable no ideal (filtrable) en la interfase de los shales. Además de la transferencia de agua, también se presenta transferencia limitada de solutos.

Para **Fam et al.**, (1999), los cambios en la concentración iónica del fluido de poro pueden influenciar en algunas de las propiedades del shale por medio de cambios en la doble laminación (Efecto osmótico). En la industria petrolera, se considera preferible minimizar el flujo de líquidos hacia dentro de los shales y tratar de promover en mínima proporción el flujo de fluido desde el shale hacia dentro del fluido de perforación. Esto significa que el lodo debe tener una actividad del agua menor que la del fluido de poro del shale, lo cual puede lograrse adicionando sales (por ejemplo NaCl, KCl y  $CaCl_2$ ) a el lodo de perforación para disminuir su actividad. El mejor desempeño de los lodos base aceite comparado con los lodos base agua a menudo ha sido atribuido a la diferencia de potencial químico entre el agua saturada con sal del lodo base aceite y el agua del shale. Sin embargo este mejor desempeño es mayormente atribuido a los efectos capilares.

Las alteraciones fisicoquímicas están sujetas al desequilibrio iónico de la formación, el cual puede ser ocasionado por la difusión de presión de poro y por el fenómeno de la osmosis; gracias a esto se pueden originar reacciones químicas y la disolución de la matriz y/o el cemento de la roca; esto puede ocasionar inestabilidad de la roca (**Elf**, 1962).

### *3.1.3 Efecto de la baja permeabilidad del shale sobre la estabilidad del hueco.*

Las rocas arcillosas se caracterizan por tener alta porosidad pero baja permeabilidad, lo cual es función de su empaquetamiento o estructura preferentemente laminar, esta última se relaciona con la composición mineral y la diagénesis que ha sufrido la roca y su posterior litificación, lo cual influye en el momento de perforar arcillas, ya que el lodo de perforación al ponerse en contacto con la arcilla genera una interacción entre la superficie del mineral de arcilla en los poros de la roca y las moléculas de agua, que reacciona directamente con la estructura atómica generando cambios físico-químicos que generan los problemáticos hinchamientos y derrumbes. Los valores de porosidad y permeabilidad varían al pasar de una capa arcillosa a otra en formaciones interestratificadas (**Bol**, 1974).

### *3.1.4 Efecto del peso del lodo de perforación en la estabilidad del shale.*

Los problemas ocasionados por el aumento repentino del peso del lodo al ser contaminado por fragmentos de roca de las formaciones perforadas o por malos cálculos del perforador, son los mismos explicados por la difusión de presiones. Un aumento en el peso del lodo implica un aumento en la presión del fluido de perforación sobre las paredes del pozo, lo cual ocasionaría invasión de los fluidos en la roca o en casos más críticos fracturamiento de la formación (**Rodríguez**, 1976).

### *3.1.5 Hinchamiento y Reducción del Hueco.*

El hinchamiento es la respuesta de la roca arcillosa al ser hidratada, lo cual genera un aumento en su volumen y un cambio en los esfuerzos en las paredes del pozo. El fenómeno de hinchamiento es el resultado de la interacción fluido de perforación-roca, el cual se genera por fenómenos osmóticos, como resultado de diferenciales



de presión, o por una mala impermeabilización de las paredes del pozo. Cuando las lutitas están en contacto con lodos base agua, se hidratan debido a dos mecanismos: el primero representa una captación del agua libre. El agua libre es liberada de las arcillas durante el proceso de compactación. Cuando su superficie entra en contacto con la humedad, existe un potencial para la adsorción de agua. Si bien el grado de adsorción es pequeño y el hinchamiento es poco o ninguno o no hay pérdidas visibles de resistencia, las energías de hidratación son muy altas; en el segundo el proceso de hidratación representa cambios mucho más grandes en las dimensiones de las partículas de arcilla. Esta hidratación es el resultado de desbalances entre la concentración de iones mantenida en la superficie de la arcillas y el contenido de soluto del líquido en contacto. Por lo tanto, el grado de hidratación depende del contenido electrolítico del fluido de perforación. Sin embargo, esto no significa que el hinchamiento se pueda eliminar solamente incrementando el nivel iónico hasta la saturación (**Moreno**, 1989).

Estudios realizados por **Bol et al.**, (1974), muestran clara evidencia teórica y experimental de la existencia de una fuerza repulsiva (presiones de hinchamiento y desintegración) entre láminas de arcilla debido a moléculas de agua fuertemente adsorbidas. El índice de hinchamiento medido caracteriza el esfuerzo de hidratación de una combinación particular shale/fluido. Como tal, es sumamente conveniente usarla para una medida de la naturaleza inhibitoria de los fluidos de perforación y la sensibilidad de varios shales para la inhibición.

Además **Fam et al.**, (1999), basado en experiencias de laboratorio, muestra que usualmente, el hinchamiento esta acompañado por una reducción en la resistencia, en gran parte debido a que el hinchamiento causa micro-deformaciones diferenciales que rompen los enlaces minerales cohesivos entre las láminas de arcillas. Además agrega que el cálculo de la densidad óptima del lodo de perforación es un parámetro de diseño fundamental en la ingeniería de perforación para evitar estas microdeformaciones.

### 3.1.6 Derrumbes, Pegas y “Entrampamiento” de la Broca.

Los derrumbes y pegas son generalmente ocasionados por la hidratación o fracturamiento de los shales, los cuales caen de las paredes del pozo al anular, generando serios problemas como alteración de las propiedades reológicas del lodo y/o grandes acumulaciones en el anular, lo cual disminuye las ratas de perforación y aumentan la presión de fondo de pozo (**Moreno**, 1989, **Roy**, 1993 y **Simpson**, 2000). También el flujo del fluido de perforación a través de la tubería hasta la superficie algunas veces se detiene, bien sea debido a un problema o con el fin de extraer la tubería del hoyo para poder cambiar una barrena. Cuando se detiene la perforación, los recortes suspendidos en el fluido pueden caer al fondo del pozo, atascando la barrena (**Brandon**, 1992).

Sobre esta discusión **Cress et al.**, (1983), afirma que los ripios producidos de la perforación de formaciones hidratables se adhieren a la broca y la hacen temporalmente inútil. Esto se caracteriza generalmente por una disminución en el torque de la rotaria, reducción de la rata de penetración y a menudo un incremento en la presión de la tubería.

Entre los problemas que causan los ripios acumulados en el fondo del pozo **Roy et al.**, (1993), establece que el bit-balling (entrampamiento) ocurre cuando se perforan formaciones suaves con lodos base agua. Algunas formaciones incluyendo los shales reaccionan con el agua del fluido de perforación, hinchándolos considerablemente y posteriormente causando pegas. El contenido de montmorillonita en los shales es el factor más importante con respecto a hidratación y al bit-balling. El orden de tendencias de derrumbes, o sensibilidad al intercambio en su base de menor a mayor es el siguiente: Caolinita < Illita < Mezcla de arcillas < Montmorillonita.

Una solución al problema del bit-balling propuesto por **Brandon et al.**, (1992), es que la eficiencia de perforación puede ser mejorada gracias a la expulsión del lodo de perforación a alta velocidad a través de las boquillas de la broca, moviendo los conos de la broca, librando de cortes la broca, evitando el desgaste de la misma y la disminución que se presentaría en la rata de penetración debido al “re-molido” de los cortes, también, tal fuerza hidráulica es usada para accionar motores de fondo que

hacen rotar la broca sin tener que rotar toda la sarta, práctica esencial en perforaciones direccionales.

### *3.1.7 Deshidratación y Modificación de las Propiedades Reológicas del lodo.*

Los shales al igual que pueden sufrir hidratación también se pueden deshidratar, esto se genera al haber un paso de fluidos de la formación hacia el pozo, y es consecuencia del diferencial de presión o por fenómenos osmóticos. Como consecuencia los fluidos de perforación son afectados, cambiando sus propiedades reológicas como resistencia de gel o tixotropía, además la deshidratación provoca el debilitamiento de la roca ocasionando derrumbes (**Rodríguez, 1976**).

## 4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 4.1 ARCILLAS, CONCEPTOS Y PROPIEDADES

Generalmente se identifica como arcilla a cualquier material terroso, natural, de grano fino y que presente propiedades plásticas. Un concepto más apropiado y de común aceptación es el mineralógico, el cual identifica a las arcillas según su composición mineral, y en especial a un grupo de minerales siempre presentes en ellas (**Paulin**, 1930).

En este capítulo se presenta el así llamado Concepto Mineralógico de las Arcillas, los factores que determinan sus propiedades y las estructuras atómicas características de las mismas (**Grim**, 1962). Además se incluye una parte correspondiente al intercambio iónico, que es una de las principales propiedades de las arcillas, ideal para preparar Lodos de Perforación (**Forero**, 1978).

#### 4.1.1 Mineralogía

En este capítulo se estudiara solamente la mineralogía de las arcillas de interés para el presente trabajo.

##### 4.1.1.1 Grupo Mineral de la Caolinita

La estructura de la Caolinita está formada por una hoja tetraédrica de Silicio y una hoja octaédrica de Aluminio combinadas en una sola unidad de forma que los picos de los tetraedros y una de las capas de la hoja octaédrica constituyen una capa común (Forero, 1978). (Figura 3).

Todos los picos de los tetraedros apuntan en la misma dirección y hacia el centro de la unidad. Las dimensiones de las hojas son bastante similares en lo que respecta a los ejes a y b; y en consecuencia realmente se forman capas octaédricas-tetraédricas compuestas. En la capa común a los grupos octaédricos y tetraédricos, se observa que

están compartidos por el Silicio y el Aluminio, los dos tercios de los átomos presentes. Las cargas en el interior de la estructura están balanceadas.

La fórmula estructural está dada por  $(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$  y la composición teórica expresada en Óxidos es:

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| $\text{SiO}_2$          | 46.54 por ciento |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 39.50 por ciento |
| $\text{H}_2\text{O}$    | 13.96 por ciento |

Los minerales del grupo de la Caolinita están formados por unidades del tipo descrito anteriormente, continuas en las direcciones de los ejes a y b; y amontonadas unas sobre otras en la dirección del eje c. El espesor de ésta unidad es de aproximadamente 7.00 Å (Grim, 1962).

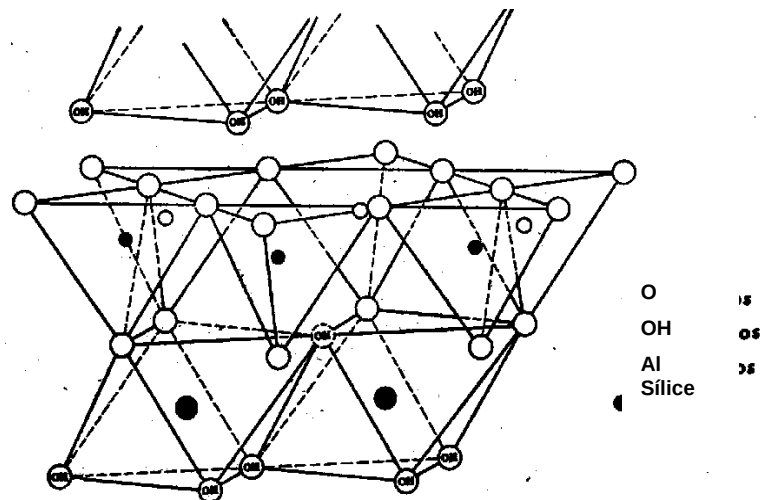


Figura 3. Dibujo esquemático de la estructura de la caolinita. (Tomado de Grim, 1962)

#### 4.1.1.2 Grupo Mineral de la Montmorillonita

La Figura 4 muestra la estructura generalmente aceptada para la Montmorillonita la cual está compuesta por unidades formadas por dos hojas tetraédricas de Silicio, separadas por una hoja octaédrica de Aluminio. Todos los picos de los tetraedros apuntan en la misma dirección y hacia el centro de la unidad. Las hojas tetraédricas y octaédricas se

combinan de manera que los picos de los tetraedros de cada hoja de Silicio y una de las capas de Oxhidrilos de la hoja octaédrica forman una capa común (Rodríguez, 1976).

En la superposición de unidades Silicio-Aluminio-Silicio, las capas de Oxígenos de cada una están junto a Oxígenos de unidades vecinas, con la consecuencia de que habrá una unión muy débil entre ellas y por supuesto una amplia separación (Forero, 1978). Esto se convierte en una propiedad sobresaliente de la Montmorillonita, ya que el agua y otras moléculas polares, como ciertas sales orgánicas, pueden colocarse entre estas capas causando la expansión o hinchamiento de la arcilla en la dirección c (Rodríguez, 1976).

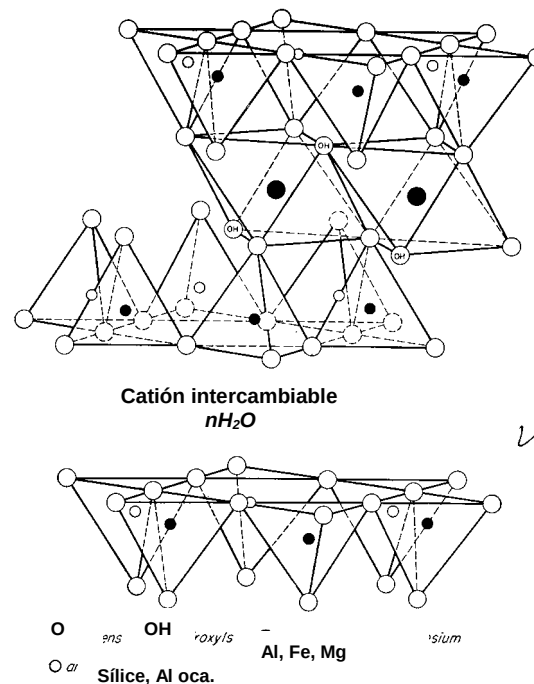


Figura 4. Estructura de la montmorillonita. (Tomado de Grim, 1962).

Normalmente, es decir, cuando no hay moléculas polares entre las capas, el valor de la separación es de aproximadamente 9.60 Å (Grim, 1962); mientras que en el caso contrario puede llegar hasta la separación completa. Los cationes reemplazables se encuentran entre las capas de Silicio, y la separación de estas depende del tamaño de los cationes, así por ejemplo, bajo condiciones ordinarias una Montmorillonita cuyo ión reemplazable sea el Sodio, tiene una capa de agua y un espaciamiento en la dirección

c de aproximadamente 12.50 Å; mientras que si el ión reemplazable es el Calcio, tal dimensión será 15.50 Å. (**Grim**, 1962).

La fórmula teórica para la estructura dada es:  $(\text{NaCa})(\text{MgAl}_2)(\text{OH})_2 / \text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot 11\text{H}_2\text{O}$  y la composición sin el material entre capas es:

|                         |                  |
|-------------------------|------------------|
| $\text{SiO}_2$          | 66.70 por ciento |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 28.30 por ciento |
| $\text{H}_2\text{O}$    | 5.00 por ciento  |

La Montmorillonita se dispersa en forma relativamente fácil en el agua. Esto es particularmente cierto cuando el catión reemplazado es el Sodio, ya que en tal caso las partículas pueden separarse en unidades mínimas.

#### **4.1.1.3 Grupo Mineral de la Illita**

Los minerales del grupo de la Illita son similares en sus características estructurales a las micas. La unidad estructural básica es una capa compuesta por hojas tetraédricas de Silicio separadas por una hoja octaédrica. Los picos de todos los tetraedros apuntan hacia el centro de la unidad y están combinados con la hoja octaédrica en una sola capa. Además las capas adyacentes están ubicadas en tal forma que los iones potasio equidistan de doce oxígenos, seis de cada capa. Ver Figura 5.

La unidad es la misma de la Montmorillonita excepto que algunos de los Silicios están reemplazados por Aluminio, y la deficiencia de carga resultante está balanceada por iones de potasio. Las capas de la unidad se extienden indefinidamente en las direcciones a y b, y se encuentran amontonadas unas sobre otras en la dirección c, el espesor de la unidad es aproximadamente 10.00 Å (**Grim**, 1962).

Los minerales de este grupo frecuentemente están presentes en partículas extremadamente pequeñas de manera que es difícil determinar su forma. Cuando se colocan partículas de Illita en agua estas tienden a disgregarse considerablemente en las variedades pobremente cristalizadas, mientras que las bien cristalizadas se

dispersan poco. Esta disgregación se debe a la separación entre las unidades de Silicio.

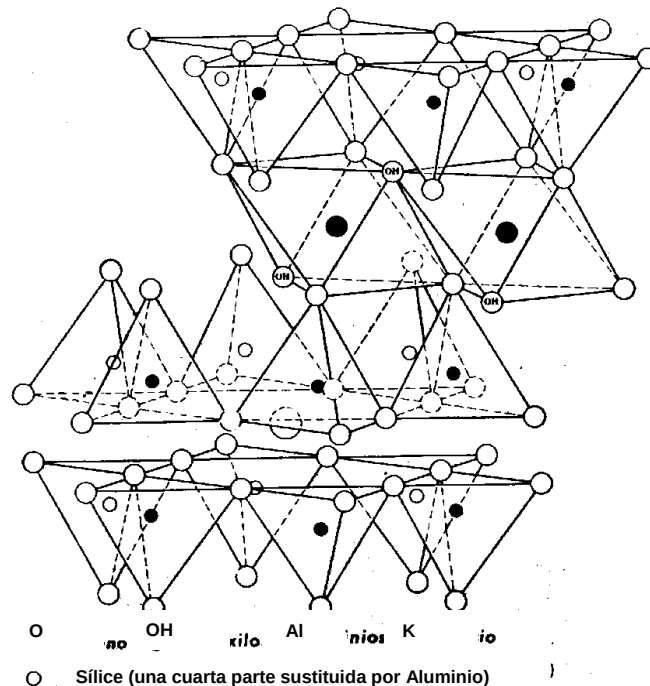


Figura 5. Estructura de la illita. (Tomado de Grim, 1962).

#### 4.1.1.4 Minerales Arcillosos Interestratificados

Son minerales que al mezclarse o el interestratificarse lo hacen en apilamiento vertical regular o al azar, segregado (Maceran y Ruiz-Amil, 1975, Wilson, 1987 en USGS, 2001). Las arcillas comúnmente descritas como interestratificadas incluyen: illita-illita-vermiculita, illita-esmectita, clorita-clorita-vermiculita (corrensite), clorita-esmectita y caolinita-esmectita. Las arcillas interestratificadas pueden formarse por el desgaste, que implica el retiro o la captación de cationes (Ej. K), la alteración hidrotérmica, o el retiro de las capas intermedias de hidróxido, y en algunos casos, pueden representar una etapa intermedia en la formación de los minerales de la expansión y de la no expansión o viceversa (Maceran y Ruiz-Amil, 1975; Sawhney, 1989 en USGS, 2001).

Las estructuras regularmente interestratificadas son identificadas fácilmente por su reflexión básica  $001$ , que corresponde a la suma de los espaciamientos de los componentes individuales, y las reflexiones subsecuentes de órdenes integrales más altos (Sawhney, 1989 en USGS, 2001). Por ejemplo, la illita-esmectita regularmente



interestratificada, cuando esta saturada con Magnesio y glicolada, se caracteriza por su plano de reflexión en  $001$ , cerca de los  $27 \text{ \AA}$ , que corresponde a la suma de los espaciamentos de la illita ( $10 \text{ \AA}$ ) y de la esmectita ( $17 \text{ \AA}$ ). Inversamente, las estructuras aleatoriamente interestratificadas tienen reflexiones no íntegras en las posiciones intermedias entre las reflexiones de las capas minerales individuales. Por ejemplo, la illita-clorita aleatoriamente interestratificada sería caracterizada por un plano de reflexión en  $001$  entre  $10$  y  $14 \text{ \AA}$ .

#### **4.1.2 Química**

Las variaciones en las propiedades de los grupos minerales arcillosos dependen fundamentalmente de su estructura y composición; por consiguiente cada grupo tiene una serie específica de propiedades. Las propiedades de los minerales arcillosos que se consideran en esta sección, son las de mayor importancia para el estudio del comportamiento de dichos minerales en los yacimientos petrolíferos. Estas propiedades, íntimamente relacionadas, son el intercambio iónico y el comportamiento de la arcilla frente al agua.

##### **4.1.2.1 Intercambio iónico**

Los minerales arcillosos tienen la propiedad de adsorber ciertos aniones y cationes y retenerlos en un estado intercambiable, es decir, que los pueden intercambiar con otros iones que estén en solución acuosa. La reacción del intercambio es estequiométrica y por consiguiente diferente de la adsorción simple. Los iones intercambiables son retenidos externamente a la unidad estructural del mineral arcilloso, sin afectar la estructura de la unidad sílica-alúminica. La capacidad de intercambio iónico se expresa en términos de miliequivalentes por gramo o por 100 gramos. En los minerales arcillosos los cationes intercambiables más frecuentes son calcio, magnesio, hidrógeno, potasio, amonio y sodio en este orden de abundancia relativa. Los aniones más frecuentes son sulfatos, cloruros, fosfatos y nitratos. Los valores de la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) para algunos minerales arcillosos aparecen en la tabla 1.

TABLA 1. Capacidad de Intercambio Catiónico de algunos minerales arcillosos.  
*Tomado de Grim, 1962.*

| Mineral Arcilloso | Capacidad de Intercambio Catiónico |
|-------------------|------------------------------------|
|                   | miliequivalentes/100 g.            |
| Caolinita         | 3 – 15                             |
| Illita            | 10 – 40                            |
| Clorita           | 10 – 40                            |
| Esmectita         | 80 – 150                           |
| Vermiculita       | 100 - 150                          |

La C.I.C. para los minerales arcillosos se debe a tres factores: en primer lugar, a los enlaces rotos en las unidades de sílice-alúmina, los cuales dan lugar a cargas sin satisfacer, que son balanceadas por los cationes adsorbidos. La C.I.C. aumenta a medida que decrece tanto el tamaño de las partículas, como la cristalinidad, puesto de que estas características aumentan el número de enlaces rotos. Lo anterior se puede ver en la tabla 2.

En los minerales del grupo de la caolinita, los enlaces rotos son probablemente la mayor causa del intercambio catiónico; en el grupo de la illita y clorita son causa importante y en el grupo de las esmectitas los enlaces rotos son responsables en pequeña proporción del intercambio catiónico. Cuando el intercambio se debe a enlaces rotos, los cationes se disponen alrededor de los ejes de las unidades laminares. El segundo factor que determina el intercambio catiónico es la sustitución dentro de la estructura. Dichas sustituciones son de aluminio por silicio en la lámina tetraédrica, o de magnesio y otros iones de menor valencia por el aluminio en la lámina octaédrica, dando como resultado el desbalance de cargas eléctricas en la unidad estructural de los minerales arcillosos. Frecuentemente tales sustituciones son balanceadas por cationes adsorbidos. Cuando el intercambio se debe a sustituciones, los cationes se colocan principalmente sobre la superficie de los planos (**Grim, 1962**).

TABLA 2. Variación de la C.I.C. según el tamaño de las partículas.  
*Tomado de Grim, 1962.*

| Mineral Arcilloso | Tamaño de Partículas<br>( $\mu$ ) | C.I.C. meq/100 g. |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Caolinita         | 5 – 10                            | 2,6               |
|                   | 2 - 4                             | 3,6               |
|                   | 1 – 0,5                           | 3,8               |
|                   | 0,5 – 0,25                        | 3,9               |
|                   | 0,25 – 0,1                        | 5,4               |
|                   | 0,1 – 0,05                        | 9,5               |
| Illita            | 1,0 – 0,1                         | 20,0              |
|                   | 0,1 – 0,06                        | 30,0              |
|                   | Menor 0,06                        | 41,7              |

En tercer lugar, el intercambio catiónico se presenta cuando el átomo de hidrogeno de los grupos hidroxilo es reemplazado por un catión intercambiable.

Según **Castro** (1975), las arcillas obviamente presentarán una capacidad de intercambio iónico diferencial, según presente o no la sustitución isómotfica y el tamaño del mineral. La capacidad de intercambio ayuda en la caracterización del tipo de arcilla presente y si no se puede utilizar como *criterio único* de identificación, pero sí adiciona información útil a otros métodos.

**Grim** (1962), ha demostrado que la velocidad de las reacciones de intercambio varía con el mineral arcilloso, la naturaleza y la concentración de cationes y/o aniones. Respecto a la naturaleza del mineral arcilloso, la reacción para la caolinita es rápida, casi instantánea, es mas lenta para las esmectitas y para las illitas se requieren mayores períodos de tiempo: horas y muchas veces hasta días.

Respecto a la naturaleza del catión, el poder relativo de sustitución de un catión por otro en orden ascendente, se muestra en la siguiente serie: litio, sodio, potasio magnesio, calcio, aluminio. En general, los cationes polivalentes son adsorbidos más firmemente que los monovalentes. Debido a esta propiedad, en la industria del petróleo, se usan cationes polivalentes como estabilizadores, para prevenir los daños en las arcillas

sensibles al agua. Las reacciones de intercambio catiónico usualmente tienen lugar en medio acuoso y los iones son considerablemente solubles. En el caso de los minerales arcillosos presentes en las formaciones de interés para la industria del petróleo, el intercambio se realiza con los cationes presentes en el agua de formación, estableciéndose así un equilibrio entre la arcilla y los iones presentes en los fluidos que saturan la roca (**Carrillo**, 1985).

#### 4.1.2.2 *Comportamiento Frente al Agua*

Los minerales arcillosos pueden adsorber agua a temperaturas relativamente bajas y la eliminan por calentamiento a temperaturas entre 100 °C y 150 °C. Esta propiedad determina la plasticidad, la compactación, la suspensión y otras características de los mismos, es decir determina la utilización de los mismos (**Grim**, 1962).

La capacidad de adición de agua a los minerales arcillosos, da como resultado la formación de una película de agua sobre la superficie externa y entre las láminas estructurales, lo cual es producto de la distribución de cargas negativas sobre la superficie de la arcilla y de la distribución de los cationes intercambiables. **Moore** (1997), de acuerdo con otros investigadores, considera que esta película de agua está orientada y se une a la partícula arcillosa por puentes de hidrógeno, como se muestra en la figura 7.

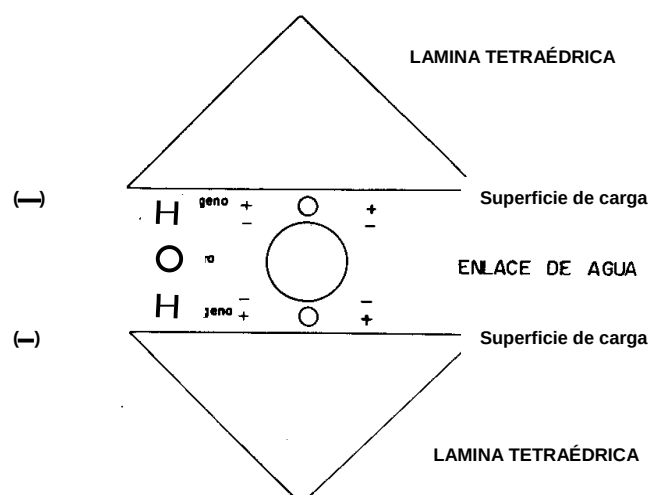


Figura 6. Representación de una molécula de agua unida a capas adyacentes de una arcilla. Tomado de Carrillo, 1985.

Se considera que las moléculas de agua orientadas tienen un carácter más denso y viscoso que el agua líquida ordinaria, por consiguiente, el agua ligada directamente a la superficie del mineral arcilloso está en un estado físico diferente del agua líquida. Las características específicas de esta agua que la diferencian del agua ordinaria son quizás, las distancias relativamente cortas de estas moléculas, que están sobre la superficie de los minerales arcillosos. El espesor de esta película de moléculas de agua orientadas, varía de acuerdo al tipo de mineral arcilloso y del catión intercambiable. El espesor es relativamente pequeño cuando el agua está sobre superficies irregulares, como alrededor de los ejes de las partículas, y alcanza su máximo espesor cuando está sobre el plano basal de la superficie del grupo expandible de la montmorillonita (**Carrillo, 1985**).

Como se sabe la molécula de agua tiene una disposición en forma de V, con una distancia internuclear para el enlace oxígeno-hidrógeno de 0.96 Å y con un ángulo entre 103°-106°, muy cercano a 109° que es el ángulo del tetraedro. Por otra parte, la superficie del mineral arcilloso está constituida por átomos de oxígeno o grupos hidroxilo dispuestos hexagonalmente, lo cual hace que coincidan con la disposición de la molécula de agua. Por consiguiente, las moléculas de agua se orientan entre las capas de los tetraedros del mineral y se forman puentes de hidrógeno. La adsorción del etilenglicol y el glicerol por minerales del grupo de las esmectitas puede explicarse de una forma similar (**Grim, 1962**). El fenómeno de hinchamiento en las arcillas es el resultado de la influencia ejercida por la ubicación de la película de agua sobre el plano basal de los minerales arcillosos. Esta película de agua separa los planos individuales y actúa como un lubricante entre las capas (**Carrillo, 1985**).

Estudios sobre las propiedades plásticas de las arcillas han demostrado que tanto el espesor como la orientación de la película de agua, son controlados por los cationes intercambiables adsorbidos. Cationes como el calcio, magnesio e hidrógeno, incrementan la fuerza atractiva entre las partículas, disminuyendo el grosor de la capa de agua; mientras que el sodio y el litio disminuyen la fuerza de atracción entre las capas, lo cual hace que mayor cantidad de agua penetre entre las capas de arcilla, por esto, los minerales de arcilla saturados con sodio o litio como catión intercambiable,

tendrán mayor expansión o hinchamiento. Aprovechando esta característica, se usan sales de calcio, magnesio y potasio como estabilizadores de arcillas, cuando se quieren evitar problemas de hinchamiento o dispersión; así por ejemplo, bajo condiciones ordinarias la montmorillonita, con sodio como catión intercambiable, tiene una capa molecular de agua y un valor para el eje c de 12.5 Å. En contacto con agua, tiene un incremento paulatino a lo largo del eje c, y por encima de 40 Å hay una disociación completa de las capas individuales. Mientras que con calcio como catión intercambiable, tiene en condiciones ordinarias dos capas de agua y un valor para el eje c entre 14.5 Å y 15.5 Å. En contacto con agua, tienen un rango considerable de estabilidad con dos capas moleculares de agua y no tiene una expansión por encima de 18 Å. Para montmorillonitas saturadas con potasio y magnesio hay una expansión muy limitada (**Carrillo**, 1985).

La relación entre la expansión de las arcillas y su composición se explica satisfactoriamente por el concepto de la disociación catiónica. De acuerdo a esta teoría, los cationes adsorbidos, tienden a disociarse desde la superficie arcillosa cuando el mineral está en contacto con agua, dejando algunas de las unidades estructurales negativamente cargadas. Las fuerzas repulsivas hacen que las láminas se alejen permitiendo la entrada de agua entre ellas. La diferencia entre las propiedades de expansión de las arcillas, con calcio ó sodio como catión intercambiable, se puede interpretar como una indicación de una menor disociación del calcio que del sodio (**Roy**, 1993). La expansión de las arcillas varía como consecuencia de las diferencias en la estructura y grado de degradación (**Carrillo**, 1985).

Según **Moore** (1960), el orden de sensibilidad frente al agua, de los grupos de minerales arcillosos de mayor a menor es: montmorillonita, minerales de capa mixta, illita y caolinita. La montmorillonita presenta el mayor grado de hinchamiento frente al agua y la caolinita el menor.

## 4.2 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA CARACTERIZAR MINERALES DE ARCILLA

Para la caracterización de minerales existen varios métodos, como los son pruebas de MBT (*Metil Blue Testing*), difracción de Rayos X y Análisis Térmico Diferencial; otros simplemente sirven para clasificar las arcillas adversas o problemáticas como las pruebas de Hinchamiento, Dispersión o Adsorción Isotérmica. En éste trabajo se realizaron pruebas de MBT y Difracción de Rayos X, ya que son los más utilizados para realizar una caracterización mas precisa de los minerales de arcilla.

### 4.2.1 Ensayos MBT

Se realiza para determinar la cantidad y capacidad de intercambio catiónico de las arcillas; es decir la prueba mide la habilidad de la arcilla para adsorber cationes de la solución (atraer iones positivos) y mantenerlos sobre la superficie de las partículas. La prueba MBT debe ser realizada usando químicos frescos; especialmente el peróxido de hidrógeno cuyo objeto es eliminar el efecto de materiales orgánicos, tales como CMC, poliacrilatos, lignosulfonatos y lignitos los cuales también tienen la capacidad de adsorber el azul de metileno, lo que daría una prueba incorrecta. Cada gota removida de líquido colocada en el papel filtro para indicar la aparición de la aureola azul verdosa sobre los sólidos se debe enumerar y colocar en ella los (cc) de azul de metileno gastados.

El procedimiento para realizar la prueba de azul de metileno fue tomada de las normas de la API (*American Petroleum Institute*), norma *API RP 13I de 1997*, sección 11.1, 11.2, 11.3 y 11.4; *API RP 13B de 1974*, sección 9.32 y del Manual de Laboratorio de Lodos de Rafael Enoc (Esc. Ing. Petróleos, UIS).

#### *Equipo Utilizado:*

- a. Solución de azul de metileno: 3.20 g de agente de azul de metileno.
  - Peso de la muestra a ser utilizada,  $g = 3.20 / \text{peso de la muestra secada}$ , (Para la prueba se utilizo un peso de 0.57 g de muestra).
- b. Peróxido de Hidrogeno: solución al 3%.

- c. Ácido sulfúrico: solución 5 N.
- d. Pipeta graduada de 1 cm<sup>3</sup>
- e. Cilindro graduado: 50 cm<sup>3</sup>
- f. Plato de calentamiento
- g. Papel filtro
- h. Mortero y macerador
- i. Maya de 75 micrómetros
- j. Balanza

*Procedimiento:*

- Tomar muestras de arcillas de ripios o corazones de las formaciones de interés.
- Triturar hasta alcanzar un polvo fino usando el mortero y macerador, posteriormente pasarlo a través de una malla 200.
- Pesar 0.57 g de material menor a 75 micrómetros y colocarlo en un elermeyer.
- Adicionar 15 cm<sup>3</sup> de peróxido de hidrogeno y 0.5 cm<sup>3</sup> de ácido sulfurico. Calentar lentamente por cerca de 10 minutos sin permitir que la muestra se evapore. Enfriar a temperatura ambiente y diluir agregando 25 cm<sup>3</sup> de agua destilada.
- Agregar la solución de azul de metileno, realizando incrementos de 0.5 cm<sup>3</sup>. Si se conoce la cantidad aproximada de azul de metileno de muestra previas se pueden realizar incrementos mayores hasta alcanzar el punto final. Después de cada adición, agite el contenido del frasco por 30 segundos y remueva una gota de la suspensión y colóquela en el papel filtro. El punto final es alcanzado cuando aparezca una aureola azul alrededor de los sólidos como muestra la figura 8.
- Cuando el punto final es alcanzado, se dejan 2 minutos y luego se vuelve a colocar otra gota en el papel filtro. Si la aureola azul persiste, luego de los dos minutos se ha alcanzado el punto final. Si la aureola no aparece, continúe agregando azul de metileno como se había sugerido anteriormente hasta que pasados los 2 minutos aparezca el tinte azul.



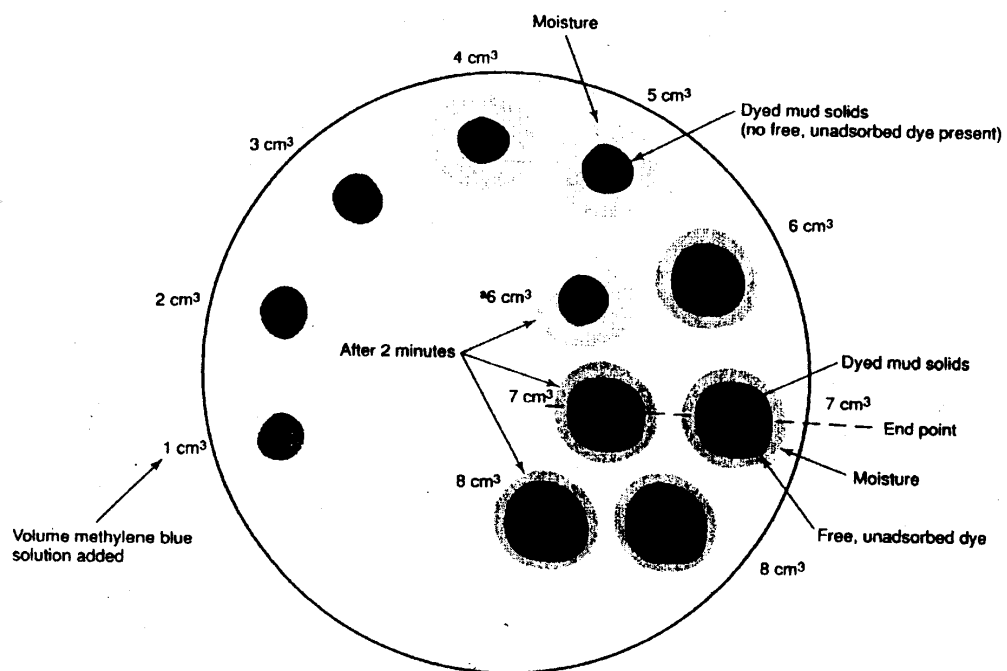
*Cálculos:*

La capacidad de azul de metileno del material se obtiene como sigue:

$$\text{MBT del material, meq/100 g} = \frac{\text{solución de azul de metileno, cm}^3}{\text{peso de la muestra, g}}$$

Para usos prácticos se utiliza el factor de 2.85, sugerido por la norma *API RP 13B*, entonces:

$$\text{Meq/100g} = \text{azul de metileno (ml)} \times 2.85$$



**Nota:** <sup>a</sup>En el gráfico se muestra una aureola detectada después de haber adicionado 6 cm<sup>3</sup>, pero luego de dos minutos esta desaparece, lo cual señala que no se ha alcanzado el punto final.

Figura 7. Prueba de gotículas para el punto final de la titulación con azul de metileno. Tomado de la norma *API RP 13I*, 1997.

#### 4.2.2 Pruebas DRX

La difracción de rayos x es una técnica empleada en el estudio de sustancias cristalinas y su origen se remota al año 1912 (**Grim**, 1962).

Las características del estado cristalino residen en la disposición de los átomos que constituyen la molécula. Los rayos X han permitido verificar que los átomos, en el seno del cristal, están dispuestos en forma periódica en las tres dimensiones del espacio y constituyen estructuras de formas geométricas bien definidas, por tanto, con elementos de simetría (Carrillo, 1985).

La figura 8. Muestra una sección de un cristal, cuyos átomos están dispuestos en una serie de planos paralelos A, B, C, D, etc., separados por una distancia  $d$ .

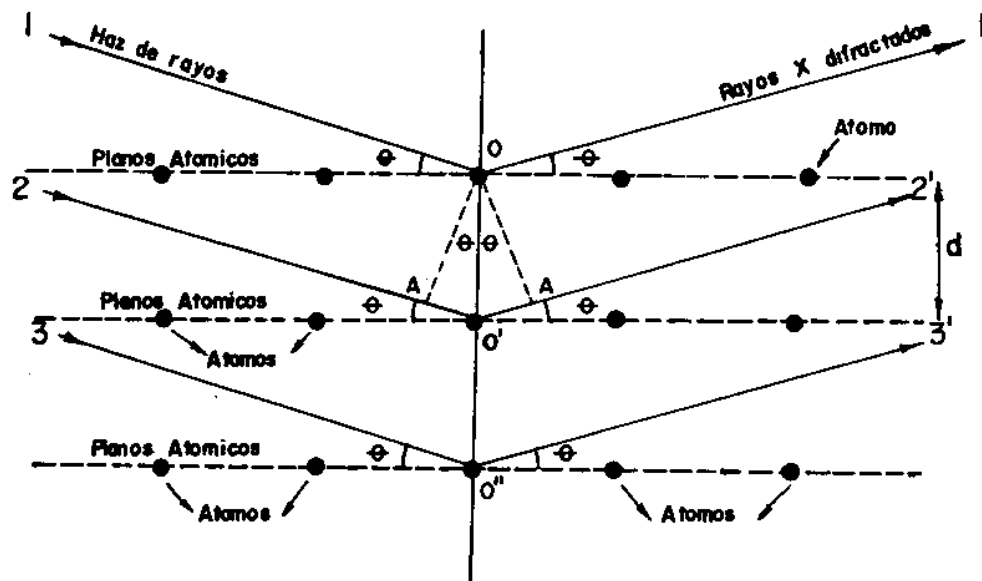


Figura 8. Difracción de los rayos X por un cristal. Tomado de Reynolds, 1997.

**W. L. Bragg** (en Reynolds, 1997 y Carrillo, 1985) demostró que los rayos dispersados  $1'$  y  $2'$  están en fase si la diferencia de camino entre los dos rayos es igual a un número entero  $n$ , de longitudes de onda  $\lambda$ , o si se cumple la siguiente relación, que se conoce como la ley de Bragg:

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

El ángulo entre el rayo difractado y el rayo transmitido es igual a  $2\theta$ ; éste ángulo es conocido como el ángulo de difracción y es el que se mide experimentalmente. Su valor depende de la forma y tamaño de la celda unitaria.

#### 4.2.2.1 *Análisis Cualitativo*

El empleo de la difracción de los rayos X en el análisis de minerales arcillosos se remota a 1930 y precisamente el empleo de ésta técnica permitió a **S. B. Hendricks** y **W. H. Fry**, demostrar el carácter cristalino de las arcillas (**Carrillo**, 1985).

Normalmente las arcillas están formando agregados y unidas a partículas más grandes como limos y arenas. La preparación de muestras orientadas incluye una dispersión de las arcillas y una separación de las partículas cuyo tamaño sea menor de dos micrones; para dicha separación se emplea la ley de Stokes (ver anexo A). Las muestras orientadas son deseables pues refuerzan las difracciones (001) y facilitan la identificación del mineral. Además la estructura cristalina de los minerales arcillosos es tal que las difracciones más importantes ocurren de 2 a 37° 2 $\theta$ .

Los valores d, para minerales arcillosos han sido recopilados por The American Society for Testing Materials (A.S.T.M.). Algunos de dichos valores aparecen en la tabla 3.

Tabla 3. Identificación de los minerales arcillosos (menor de dos micras), por difracción de rayos X. Tomado de Carrillo, 1985.

| MINERAL         | REFELXIONES (001) |    |     |      |    |     |      |   |     |
|-----------------|-------------------|----|-----|------|----|-----|------|---|-----|
|                 | d(Å)              | I  | hkl | d(Å) | I  | hkl | d(Å) | I | hkl |
| Caolinita       | 7,16              | 10 | 001 | 3,57 | 10 | 002 | 2,38 | 6 | 003 |
| Montmorillonita | 14-15             | 10 | 001 |      |    |     |      |   |     |
| Illita – micas  | 10                | 10 | 001 | 4,94 | 2  | 002 | 3,32 | 9 | 003 |
| Clorita         | 14,1              | 7  | 001 | 7,07 | 9  | 002 | 4,72 | 8 | 003 |
| Vermiculita     | 14 - 15           | 10 |     | 12,2 |    |     | 10,7 |   |     |

Cuando varios minerales arcillosos se encuentran en una mezcla, se dificulta su identificación, como se puede ver en la tabla 3, tal es el caso de la montmorillonita, clorita y vermiculita que presentan un pico de primer orden a un mismo valor de 14 Å. Por esta razón, de acuerdo con **Jackson** (1964), se utilizan criterios adicionales para la interpretación de los difractogramas, teniendo en cuenta que los resultados de la difracción varían no solo con el tipo de mineral, sino también con la clase de catión utilizado en la saturación y con los materiales de solvatación. Respecto a la clase de

cación utilizado, generalmente se utilizan dos: el magnesio y el potasio (ver tabla 4). La vermiculita, por ejemplo, saturada con magnesio presenta un pico a 14 Å; cuando está saturada con potasio, dicho pico aparece a 10 Å. Algunos compuestos orgánicos, como el etilenglicol y el glicerol, se utilizan también para ayudar en la interpretación de los difractogramas. Ellos actúan sobre los minerales expandibles, de manera similar al agua: se orientan en la superficie laminar de la arcilla y producen una expansión en la dirección c. La montmorillonita, por ejemplo, al solvatarse con glicerol, presenta un corrimiento de su pico desde 14 Å hasta 18 Å.

Un tercer criterio a tener en cuenta en el análisis cualitativo de los minerales arcillosos es su comportamiento frente a la temperatura. Algunas arcillas como la caolinita se colapsa, es decir, se transforman en material amorfo cuando se calientan por encima de 500 °C (ver tabla 4).

La montmorillonita presenta un pico diagnóstico a 17.7 – 18 Å, cuando esta saturada con magnesio y solvatada con glicerol. El pico de segundo orden se encuentra entre 8.9 – 9.1 Å. Al calentar la muestra a 300 °C el pico cambia a 10 Å y se hace más agudo (ver tabla 4). Un pico ancho a 10 Å después del calentamiento implica que el mineral tiene hidróxidos o sesquióxidos de aluminio balanceando las cargas entre las láminas y se oponen al colapso térmico del mineral.

Las vermiculitas presentan un pico a 14.4 Å saturadas con magnesio y solvatadas con glicerol. En 7.0 – 7.1 Å se produce un pico de segundo orden de baja intensidad. Saturadas con potasio y por calentamiento a 300 °C, las láminas tienden a colapsarse dando un pico a 10 Å (ver tabla 4).

Las cloritas originan una difracción entre 14 a 14.3 Å; el pico de segundo orden aparece de 7.0 – 7.1 Å y es generalmente intenso, de acuerdo a la naturaleza del catión interlaminar coordinado con los grupos hidroxilos, por ejemplo, el hierro. Las cloritas se caracterizan por su estabilidad frente a la temperatura: saturadas con potasio y por calentamiento a 300 °C persiste el pico a 7 Å; de esta manera se diferencian de las vermiculitas. De otro lado al calentarlas a 550 °C el pico de 14 Å se hace más agudo y más intenso, mientras que el pico de 7 Å se hace más débil.

La caolinita presenta un pico a 7 Å que coincide con el pico de segundo orden de la clorita; sin embargo, la caolinita pierde cristalinidad a 550 °C, de esta manera puede diferenciarse de la clorita (ver tabla 4).

Las micas o illitas dan un pico de difracción a 10 Å, que persiste al saturar con magnesio y solvatar con glicerol, distinguiéndose así de la montmorillonita y vermiculita (ver tabla 4). Este pico es ancho a menos que el contenido de micas sea alto.

TABLA 4. Valores utilizados en la práctica (Å), para la caracterización de arcillas mediante rayos X y sometiendo la muestra a diferentes tratamientos. Tomado de Malagón, 1975.

| ARCILLA         | T° AMBIENTE | TRAT. CON<br>Mg Y<br>GLICEROL | SAT. CON K A<br>T° AMBIENTE | SAT. CON K<br>300 °C | SAT. CON K<br>500 °C |
|-----------------|-------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| Montmorillonita | 14          | 18                            | 11-12-13                    | 10-11                | 10                   |
| Vermiculita     | 14          | 14                            | 10                          | 10                   | 10                   |
| Clorita         | 14          | 14                            | 14                          | 14                   | 14                   |
| Micas           | 10          | 10                            | 10                          | 10                   | 10                   |
| Caolinitas      | 7           | 7                             | 7                           | 7                    | ---                  |

Entre los minerales no bien definidos e interestratificados se tienen los llamados integrados 2:1 – 2:2 o integrados montmorillonita – vermiculita – clorita. La precipitación de hidróxidos de aluminio, hidroxí-sesquióxidos y posiblemente hidróxidos de magnesio en los espacios interlaminares de montmorillonitas o versiculitas, origina estas estructuras cuyas propiedades son intermedias entre las de los minerales expandibles y las de cloritas. Así por ejemplo, dan un pico a 14 Å saturados con magnesio y solvatados con glicerol, pero no colapsan completamente cuando están saturados con potasio y calentados a 300 °C.

El cuarzo presenta dos picos bien definidos a 3.34 y 4.26 Å, este ultimo tiene la mitad de intensidad del primero, y aparece bien definido cuando el contenido del mineral es mayor del 10%.

De acuerdo con estos criterios se deduce que para identificar los minerales presentes en una mezcla, se deben tomar difractogramas a la muestra sometida a los siguientes cinco tratamientos:

1. Saturada con magnesio
2. Saturada con magnesio y solvatada con glicerol
3. Saturada con potasio
4. Saturada con potasio y calentada a 300 °C
5. Saturada con potasio y calentada a 550 °C

#### 4.2.2.2 *Análisis Cuantitativo*

El análisis cuantitativo por difracción de rayos X se basa en el hecho de que la intensidad de los picos de difracción, de una fase particular en una mezcla de fases, depende de la concentración de esta fase en la mezcla. Según **Cullity** (en **Carrillo**, 1985), si se quiere analizar una mezcla de dos fases a y b, se usa la siguiente relación:

$$\frac{I_a}{I_{ap}} = \frac{W_a (U_a / d_a)}{W_a (U_a / d_a - U_b / d_b) + U_b / d_b}$$

$I_a$  Intensidad integrada por unidad de longitud de la línea de difracción correspondiente al mineral a en la mezcla.

$I_{ap}$  Intensidad integrada por unidad de longitud de la línea de difracción correspondiente al mineral puro.

$W_a$  Fracción en peso del mineral a en la mezcla.

$d$  Densidad

$U$  Coeficiente másico de absorción

Esta ecuación permite el análisis cuantitativo de una mezcla con dos componentes y se conoce como el método de la línea particular. Si no se conocen los coeficientes de absorción debe prepararse una curva de calibración usando mezclas de composición conocida.

Debe utilizarse un patrón puro de a, como material de referencia y las medidas de  $I_a$ ,  $I_b$  deben hacerse bajo condiciones idénticas. En general la relación de intensidad  $I_a/I_b$  no varía linealmente con  $W_a$ .

Por diferentes razones el procedimiento analítico anterior no puede aplicarse a todas las mezclas de interés industrial. Sin embargo, se han desarrollado otros métodos para resolver problemas particulares entre los cuales se destacan, de acuerdo con **Cullity** (en **Carrillo**, 1985), el método de comparación directa y el método de estándar interno.

Es importante notar que todos estos métodos de análisis tienen un comportamiento en común: La concentración de una fase particular depende de la relación entre la intensidad de una línea de difracción de esa fase y la intensidad de una línea de referencia estándar. En el método de la línea particular, descrito atrás, la línea de referencia corresponde a la fase pura.

En el método de comparación directa, la línea de referencia corresponde a una línea de otra fase en la mezcla. En este método se aplica la siguiente ecuación:

$$\frac{I_a}{I_b} = \frac{R_a C_a}{R_b C_b}$$

El valor de  $C_a/C_b$  se puede obtener al medir experimentalmente  $I_a/I_b$  y calcular  $R_a/R_b$ . Cuando en la mezcla hay tres fases a, b y c se sigue un procedimiento análogo. Se mide  $I_c$ , se calcula  $R_c$  y se obtiene el valor de la fracción en volumen c.

En el método del estándar interno, se escoge una línea de difracción de la fase que va a ser determinada y se compara con una línea de una sustancia estándar mezclada con la muestra en proporciones conocidas.

Si se quiere determinar la cantidad de la fase a en una mezcla de fases a, b y c, en la cual las cantidades relativas de las fases presentes pueden variar de muestra a muestra, a una cantidad conocida de muestra original, se mezcla una cantidad conocida de una sustancia estándar, s, para formar una muestra de nueva composición.

Sean  $C_a$  y  $C_a'$  las fracciones en volumen de la fase a, en la muestra original y en la de nueva composición respectivamente, y  $C_s$  la fracción en volumen de s en la nueva mezcla. La ecuación que se aplica es la siguiente:

$$\frac{I_a}{I_s} = K' W_a$$

La relación de intensidades de una línea de la fase a y de una línea del estándar s, es una función lineal de  $W_a$ , que es la fracción en peso de a en la muestra original.

Debe prepararse una curva de calibración con una serie de muestras sintéticas, que tengan concentraciones conocidas de a y concentración constante de estándar. Una vez establecida la curva de calibración, se obtiene la concentración de a en una muestra desconocida hallando el valor de la relación  $I_a/I_s$ . La muestra debe contener la misma proporción del estándar usado en la calibración.

Un estándar interno para análisis de minerales arcillosos debe poseer algunas características. En primer lugar, debe poseer una morfología plana –en forma de placas- lo cual hace que se oriente en el mismo grado que los minerales arcillosos. Igualmente debe tener una fuerte reflexión (001) cercana a la de los minerales arcillosos mas comunes, pero no se debe superponer. La gravedad específica y el tamaño de las partículas debe ser similar a la de los minerales arcillosos, para que no haya un asentamiento diferencial de la suspensión. Debe tener buena estabilidad frente a los tratamientos físicos y químicos utilizados para diferenciar las variedades de minerales arcillosos. Finalmente, debe ser de poca ocurrencia en depósitos de minerales arcillosos.

#### **4.3 PERFORACION DE ROCAS ARCILLOSAS**

En éste capítulo se pretende dar una breve introducción sobre los fluidos de perforación; para que sirven?; que son?; que papel tienen durante la perforación?; que



tipos de fluidos hay? Esto con el fin de dilucidar las alternativas que existen en la industria durante las etapas de perforación de pozos petroleros.

#### **4.3.1 Lodos de Perforación**

Dado que los lodos de perforación son elemento primordial en la actividad de perforación, y la composición básica de la mayoría de los lodos es agua y arcilla; un buen conocimiento de las propiedades de las arcillas y de los sistemas agua-arcilla, es indispensable para entender claramente el comportamiento de los lodos, sus características, propiedades y tratamiento.

En el presente capítulo se presentan algunos principios generales respecto de los lodos de perforación, como su composición, clasificación, funciones y propiedades, dando así una idea global de el uso al cual se destinan las arcillas y su importancia en la composición de un lodo y por ende en la industria petrolera.

##### **4.3.1.1 Propiedades de los Lodos de Perforación**

Las funciones que deben ejercer los fluidos de perforación sugieren ciertas propiedades (Moreno, 1989), como:

- Densidad o Peso: El control adecuado de la presión de la formación depende de la densidad o peso del lodo.
- La Viscosidad: Es la propiedad que afecta el arrastre de los ripios desde el fondo hasta la superficie. Si el lodo tiene una viscosidad demasiado baja, es decir, si está muy diluido en agua, puede ser que no acarree los ripios.
- Gel o Tiroxotropía: Un buen lodo de perforación debe tener propiedades que permitan que las partículas sólidas, cortes y arena, que se estén transportando a superficie se mantengan en suspensión una vez que se interrumpe o suspende la circulación.
- Filtración: Una cualidad deseable en el lodo es la suspensión de arcilla en el líquido. Al no tenerla, el lodo tiende a separarse por filtración. Este es un proceso que

permite al agua separarse de la suspensión y filtrarse dentro de una formación porosa, dejando que las partículas de arcilla formen una costra sobre esa formación.

- *El Contenido de Arena:* Para medir el contenido de arena en el lodo se usan el tubo de arena y la malla. La comparación entre el contenido de arena de las muestras tomadas en la línea de flujo y las tomadas en la línea de succión permite determinar si la arena se esta retirando en superficie o sí por el contrario se esta recirculando a través del sistema. El contenido de arena no debe ser superior al dos por ciento.
- *La Concentración de Sal:* Puesto que la sal tiene efectos adversos en las suspensiones de agua y arcilla, siempre es deseable saber el grado de salinidad del lodo. Esta se presenta debido a que las formaciones petrolíferas se originaron en agua salada y por esto siempre que se perfora se encuentra sal o corrientes de agua salobres.
- *El Grado de Acidez (pH):* El pH del lodo tiene un papel importante en la hidratación de las lutitas. Un lodo con alto pH ataca las formaciones lutíticas mas rápidamente, por lo tanto un lodo usado para controlar lutitas no debe tener un pH demasiado alto.

#### **4.3.1.2 Composición de los Lodos de Perforación**

La composición de un lodo de perforación depende de los requerimientos particulares de la operación de perforación, ya que los huecos deben perforarse a través de diferentes tipos de formaciones. Algunos de los factores a tener en cuenta en la escogencia del fluido de perforación son la presión y la temperatura de la formación, la disponibilidad de agua, la contaminación y la economía (Rodríguez, 1976).

En general, los lodos de perforación se consideran compuestos de cuatro fases (Forero, 1978):

- Fase Continúa o Fase Líquida. Puede ser agua o aceite. El agua puede ser dulce o salada. Se considera que más de un 75% de los lodos de perforación son de agua dulce. El término base aceite se usa en fluidos de un 95% o mas de aceite.
- Fase Dispersa o Sólidos Reactivos. Pueden ser sólidos que reaccionan con la fase continua o líquidos en emulsión. Como las arcillas por ejemplo.
- Sólidos Inertes. Pueden ser deseables o no. Los sólidos inertes deseables son materiales pesantes como la Barita y los no deseables son materiales que entran en

suspensión durante la perforación. Pueden ser: arena, chert, arcillas o lutitas no hidratables. En lo posible deben ser removidos del lodo.

- Fase Química. La fase química de un sistema de lodo de base agua se agrega para dispersar las arcillas. Los dispersantes o adelgazantes principales que pueden agregarse a los lodos pueden ser:
  - a. Polifosfatos
  - b. Tanatos: Combinación de soda cáustica y taninos.
  - c. Lignosulfatos: Pulpa de madera de varios tipos.
  - d. Lignitos
  - e. Surfactantes

#### **4.3.1.3 Función de los Lodos de Perforación**

En los comienzos de la perforación rotatoria, la función principal y única de los fluidos de perforación era transportar los cortes hechos por la broca, desde el fondo del hueco hasta la superficie. Actualmente se reconoce que los fluidos de perforación tienen por lo menos diez importantes funciones a saber (Forero, 1978):

- Remover los cortes del hueco desde el fondo hasta la superficie.
- Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación.
- Cubrir las paredes del hueco con una torta impermeable.
- Controlar las presiones encontradas bajo superficie.
- Mantener los cortes y materiales pesados en suspensión cuando se interrumpe la circulación.
- Soltar la arena y los cortes en la superficie.
- Soportar parte del peso de la tubería de perforación y de revestimiento.
- Reducir a un mínimo cualquier efecto adverso sobre la formación adyacente al hueco.
- Suministrar información sobre las formaciones perforadas.
- Transmitir potencia hidráulica a la broca.

#### 4.3.1.4 Clasificación de los Lodos de Perforación

Los lodos de perforación se eligen dependiendo de varios factores, como la etapa de perforación o la roca a la cual se va a perforar, entre otras. A continuación se nombran los más conocidos en la industria:

- Fluidos Gas-Aire: Usando como fluido de perforación aire, gas natural, gases inertes o mezclas con agua, se han obtenido grandes ventajas económicas en secciones de rocas consolidadas donde difícilmente se encontrarían grandes cantidades de agua. En general el uso de este tipo de fluidos resulta en una rata de perforación más rápida, mayor footage para la broca, mayor posibilidad para tomar pruebas de las formaciones, limpieza de los corazones, mejores trabajos de cementación y mejores completamientos. En cuanto a los lodos aireados en una base gel, tienen el propósito de reducir la cabeza hidrostática y prevenir pérdidas de circulación en zonas de baja presión, además de incrementar la rata de penetración.
- Lodos Espumosos: Fabricados mediante la inyección de agua y agentes espumantes dentro de una corriente de aire o gas creando una espuma estable y viscosa o mediante la inyección de una base gel conteniendo un agente espumante, su capacidad de acarreo es dependiente más de la viscosidad que de la velocidad en el anular.
- Lodos Base Agua: La bentonita es usada para tratar lodos de agua fresca para satisfacer las necesidades reológicas del lodo, así como para controlar las pérdidas de fluido.
- Lodos No Dispersos: Utilizados para perforar pozos poco profundos o los primeros metros de pozos profundos (lodos primarios), en la mayoría de casos compuesto de agua dulce, bentonita y cal apagada (hidróxido de calcio), donde primero se hidrata la bentonita y luego se agrega cal para aumentar el valor real de punto de cedencia, que le da la capacidad de transportar recortes, a bajas ratas de corte (shear rate).
- Lodos de Calcio: Altamente tratados con compuestos de calcio, catión divalente que inhibe el hinchamiento de las arcillas de las formaciones perforadas, muy utilizados para controlar shales fácilmente desmoronables.
- Lodos Dispersos: Muy útiles cuando se perfora a grandes profundidades o en formaciones altamente problemáticas, pues presentan como característica principal la dispersión de arcillas constitutivas, adelgazando el lodo. Compuestos por

bentonita, sólidos perforados y bajas concentraciones de agentes dispersantes, tales como los lignosulfonatos y lignitos; el PH de este lodo está entre 8.5 y 10.5 para mantener estable el NaOH que es requerido para activar el agente dispersante usado.

- Lodos Bajos en Sólidos: Son aquellos lodos en los cuales la cantidad y tipos de sólidos son estrictamente controlados. Estos no deben presentar porcentajes en volumen de sólidos totales por encima de 10% y la relación de sólidos perforados a bentonita, debe ser menor que 2:1. En años recientes han aparecido productos nuevos que hacen práctico el uso de lodos con cloruro de potasio, cuya concentración de cloruro de potasio usada depende del tipo de formación a perforar. La composición básica de estos lodos es: agua dulce o agua de mar, cloruro de potasio, un polímero para inhibición ( poliacrilamida generalmente), un polímero generador de viscosidad (tipo XC con frecuencia), bentonita prehidratada, almidón estabilizado o CMC, potasa cáustica o soda cáustica, y otros aditivos como lubricantes.
- Lodos Saturados con Sal: Nombre común para un lodo de perforación en el que la fase agua está saturada (mínimo 189,000 ppm) de cloruro de sodio (inclusive 315,000 ppm a 68°F). El contenido salino puede provenir propiamente del agua, mediante adición en la superficie o aporte de las formaciones perforadas; varias sales pueden ser usadas según el propósito específico, como las de sodio, calcio, magnesio y potasio. La base convencional de estos lodos es la atapulgita o bentonita prehidratada y los compuestos de starsh o almidón y carboximetilcelulosa (CMC) que son usados para el control de perdidas de fluido.
- Lodos con Materiales Poliméricos: Son aquellos de base agua dulce o salada, que tienen incorporados compuestos químicos de cadena larga y peso molecular alto. Entre los materiales poliméricos más usados están: el almidón, la gomas de “Guar”, “Xanthan” y de algarrobo, CMC, el lignito, la celulosa polianiónica, los poliacrilatos, el copolímero de vinil amida/vinil sulfonato, la poliacrilamida parcialmente hidrolizada, los ácidos poliaminados y la metilglucosa, entre otros.
- Últimos Lodos Propuestos como Alternativa a los Fluidos Neumáticos: En momentos en los cuales las técnicas de perforación, de bajo balance de presión (underbalance) tienen gran aplicación en los Estados Unidos de América (más del 12% de los pozos

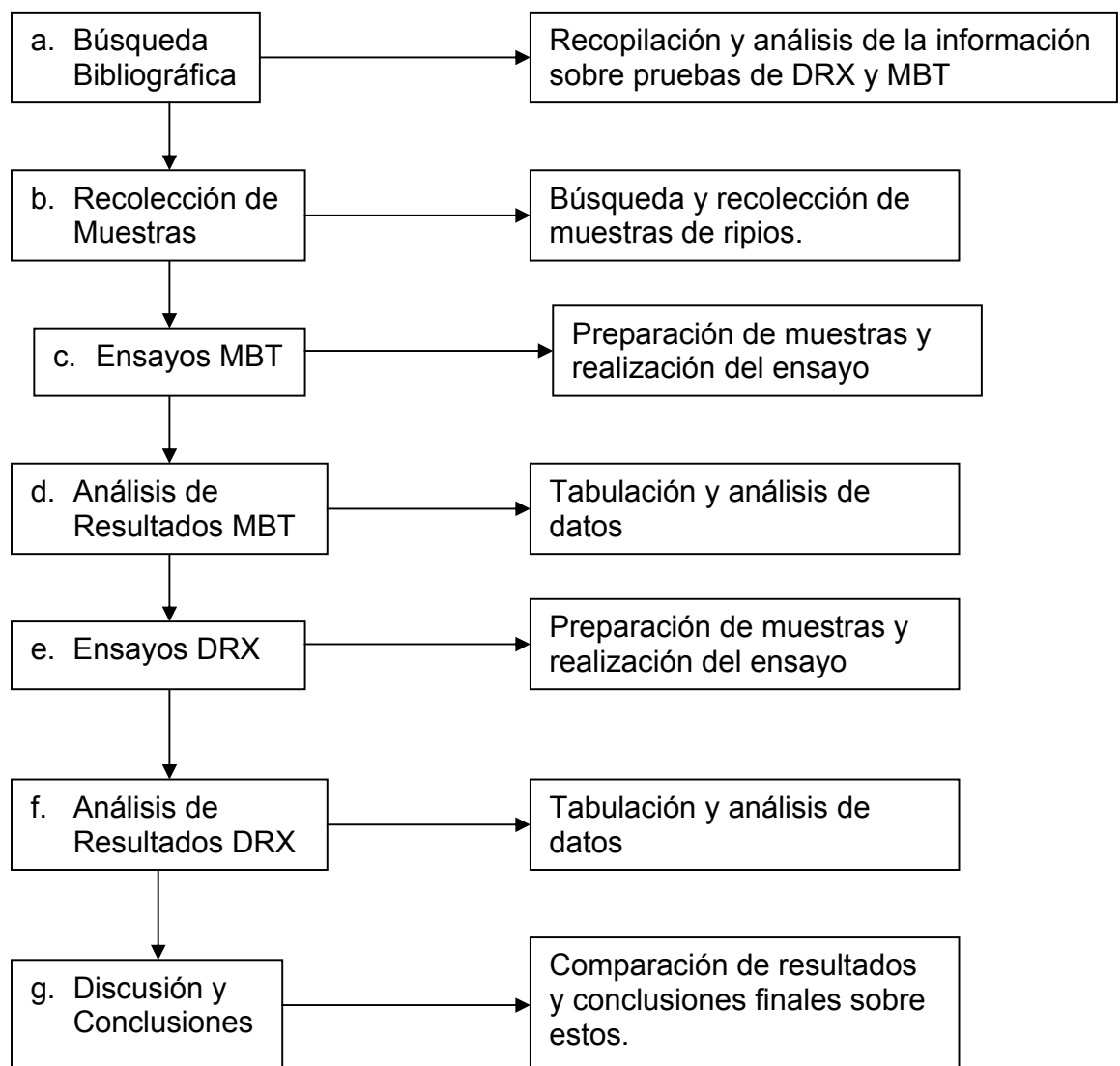
allí perforados durante 1997 se planearon con este método), es así que se ha propuesto un nuevo sistema de lodos que han sido probados en campo con éxito y que se constituyen en una buena alternativa al uso de fluidos neumáticos. La reducción de densidad en lodos convencionales incluso puede lograrse agregando (en concentraciones de mas del 20%, en volumen) esferas de vidrio huecas (gravedad especifica de 0.37, diámetro promedio de 50 micrómetros y 3,000 psi de resistencia al colapso) desarrolladas con el auspicio del Departamento de Energía de los Estados Unidos. De fácil remoción y reciclables.

- Lodos Base Aceite: Existen dos tipos principales de sistemas: primero, lodos de aceite; que contienen menos del 5% en agua y contiene mezclas de álcalis, ácidos orgánicos, agentes estabilizantes, asfaltos oxidados y diesel de alto punto de llama o aceites minerales no tóxicos. Uno de sus principales usos es eliminar el riesgo de contaminación de las zonas productoras; segundo, lodos de emulsiones invertidas: estos sistemas contiene más del 50% en agua, que se encuentra contenida dentro del aceite mediante emulsificantes especiales.
- Lodos Cuya Fase Continua es "Material Sintetico (producido por síntesis química)": Esta nueva clase de lodos –denominados “lodos basados en pseudo-aceite” – poseen la mayoría de propiedades de los lodos con fase continua aceitosa y con su uso se podrían disminuir los grandes problemas de contaminación causados, pero muchos de ellos presentan toxicidad acuática. Entre los materiales sintéticos más empleados se encuentran: Ester; Éter, Poli-alfa-olefina, Alquil-benceno-lineal y Alfa-olefina lineal.

## 5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

### 5.1 METODOLOGÍA

En el presente trabajo se realizó la siguiente metodología para la realización de las pruebas de laboratorio, la cual se muestra en el siguiente cuadro:



- Búsqueda Bibliográfica

En esta parte se buscó información concerniente con los principios teóricos de las pruebas de laboratorio, procedimientos, normas técnicas y aplicación de los resultados.

- Recolección de Muestras

Se buscaron pozos petroleros perforados en el área de interés en la base de datos de la Litoteca del Instituto Colombiano del Petróleo (ver anexo B), posteriormente se analizaron las curvas de los registros compuestos de dichos pozos, con el fin de localizar los horizontes de interés y los intervalos a muestrear; se extrajeron muestras de ripios de perforación (zanja seca) de los intervalos de interés, anotando el nombre del pozo, su ubicación geográfica, la profundidad y el nombre de la formación a la cual pertenecen.

- Ensayos MBT

Este ensayo se llevo a acabo en el Laboratorio de Lodos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la UIS; en total se analizaron 43 muestras con este método (Tabla 5). Se preparo la muestra de la siguiente forma:

Se tomo una muestra de arcillas de ripios de perforación, posteriormente se procedió a macerarla en un mortero de ágata hasta llevarla a polvo, seguido se hizo pasar por una malla 200-mesh; de este material se peso 0.57 g en una balanza electrónica. Posteriormente este material se coloco en un elermeyer de 50 ml y se le agrego 15 ml de peróxido de hidrogeno, 15 ml de agua destilada y 0.5 ml de ácido sulfúrico, se mezclo y se puso en calentamiento durante 10 minutos aproximadamente, sin dejar permitir que se vaporara la muestra; se dejo enfriar a temperatura ambiente y se adhirió agua destilada hasta completar 25 ml, luego se procedió a titular con azul de metileno, se agitaba por 30 segundos y se procedía a colocar una gota en un papel filtro, esta ultima parte se repitió hasta alcanzar el punto final.



- Análisis de Resultados MBT

Los mililitros de azul de metileno requeridos para alcanzar el punto final de la titulación se multiplicaron por 2.85; factor sugerido en la norma API RP 13B, para aplicaciones con muestras de arcillas; los resultados fueron tabulados y graficados con el fin de ilustrar la reactividad de las muestras (tendencia al hinchamiento y dispersión durante el contacto con agua). Se sugiere que para muestras de arcilla se debe tener en cuenta la siguiente escala, de acuerdo a los valores en meq de MBT:

|          |                                         |
|----------|-----------------------------------------|
| 0 – 7    | Arcillas de muy baja y baja reactividad |
| 8 – 14   | Arcillas de moderada reactividad        |
| 15 y más | Arcillas reactivas                      |

- Ensayos de DRX

Los ensayos de difracción de rayos X fueron realizados en el Laboratorio de Rayos X de la UIS (Equipo marca Rigaku, con fuente de rayos X de Cu) y del ICP (Equipo marca Siemens, D500, equipado con lámpara de Cu); en total se analizaron 5 muestras con este método (ver anexo C), bajo las siguientes condiciones de medición:

*Laboratorio de DRX-UIS*

|                  |    |                           |
|------------------|----|---------------------------|
| Voltaje          |    | 40(kV)                    |
| Corriente        |    | 20(mA)                    |
| Rendijas (Slits) | DS | 1.0°                      |
|                  | RS | 0.3mm                     |
|                  | SS | 1.0°                      |
| Muestreo         |    | 0.02°                     |
| Radiación        |    | CuK $\alpha$              |
| Monocromador     |    | Grafito                   |
| Difractómetro    |    | Rigaku modelo D-MAX-III/B |

|                                |                                                                                                 |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Base de Datos cristalográfica: | Powder Diffraction File (PDF-2) del International Center for Diffraction Data (ICDD), Sets 1-51 |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|

- **Muestra bulk**

|                      |        |
|----------------------|--------|
| Velocidad de Barrido | 3°/min |
| Rango de Medición    | 2-70°  |

- **Tratamientos**

|                      |          |
|----------------------|----------|
| Velocidad de Barrido | 1.2°/min |
| Rango de Medición    | 2-40°    |

Para esta prueba se realizaron varias etapas para la preparación de las muestras (ver figura 10), las cuales se describen a continuación:

PRIMERO: Muestra original sin tratamiento (BULK). Las muestras fueron pulverizadas manualmente en mortero de ágata y tamizadas en malla 400 (38 $\mu$ m). El espécimen seleccionado de la muestra fue montado en un portamuestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral.

SEGUNDO: Disgregación y separación de las arcillas (NORMAL). Este proceso involucró la separación de los minerales por tamaños de partículas. Los minerales arcillosos (aprox. 2 $\mu$ ) se disgregaron, se orientaron y se montaron en un portamuestra adecuado.

La separación de la fracción fina se realizó mediante el siguiente procedimiento: se tomo una cantidad apreciable de la muestra tamizada por una malla 400-mesh, se hizo un análisis con HCl, para descartar la presencia de carbonatos, posteriormente se procedió a pesar 20 g de la muestra y se colocaron en un baso de precipitado de 750 ml, se le adiciono agua destilada hasta completar 500 ml y se colocó en agitación por medio de una barra magnética en un agitador magnético; se le agrega pirofosfato de sodio para ayudar a dispersarla y se deja agitar durante 15 minutos, posteriormente se deja reposar por 24 h., luego se agita de nuevo y se deja reposar por 30 minutos. Luego se separa el residuo en suspensión del decantado; el residuo

en suspensión es colocado en una probeta de 1000 ml, y se le agrega agua destilada hasta completar los 1000 ml, se deja reposar por 26 h., según la ley de Stokes para tamaño menor a  $2\mu$  (ver anexo A). Luego de las 26 h., se drena la fracción en suspensión de la parte superior de la probeta (300 ml aprox.) y se pasa a un recipiente limpio (si en la muestra extraída no hay suficiente material en suspensión se flocula con  $\text{CaCl}_2$ ; éste paso no fue necesario).

TERCERO. Tratamientos (químicos y térmicos):

*Saturación con iones  $\text{K}^+$* . La muestra saturada con potasio se dividió en dos partes, una de las cuales se dejó secar al aire y la segunda muestra se calentó a  $550^\circ\text{C}$ .

*Saturación con iones  $\text{Mg}^{++}$* . La muestra saturada con magnesio se dividió en dos partes de las cuales una se dejó secar al aire y la segunda se solvató con etilenglicol.

#### *ANÁLISIS CUANTITATIVO*

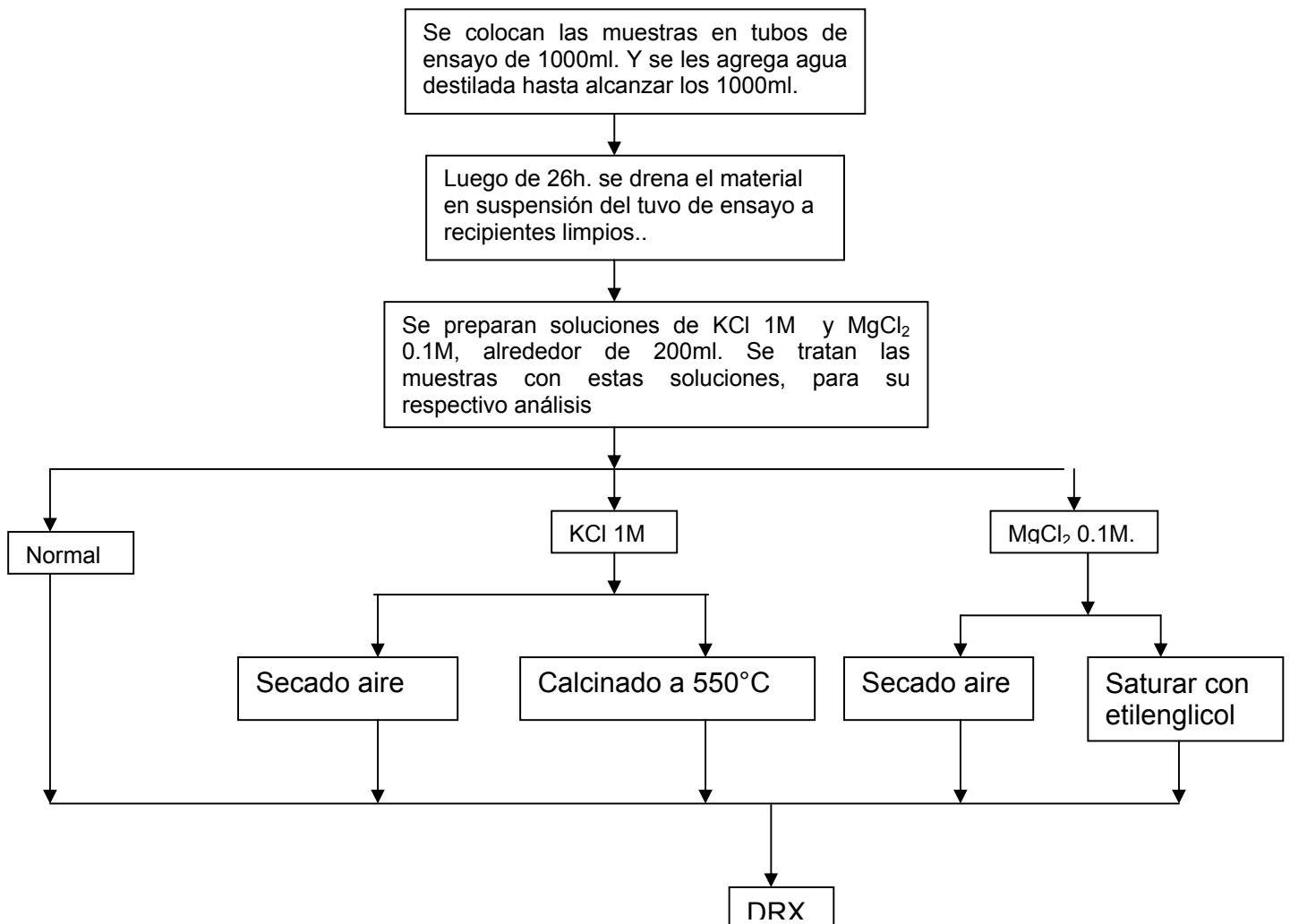
Para el análisis cuantitativo se mezcló una cantidad conocida de un patrón interno (Corundum) con la arcilla normal (minerales arcillosos). La medición se hizo a pasos dejando 2 segundos para muestreo en cada paso. Las condiciones de medición fueron las mismas utilizadas para el análisis cualitativo.

#### *Laboratorio de DRX-ICP*

Los resultados de este laboratorio fueron obtenidos básicamente con el mismo procedimiento utilizado en el laboratorio de DRX de la UIS, sólo que la separación de la fracción arcillosa ( $2\mu$ ), se realizó por centrifugado teniendo en cuenta la norma ASTM C 775-79. Inicialmente las muestras pasan por un proceso de disgregación y dispersión con ultrasonido, se eliminan cementantes y la materia orgánica lo cual permite obtener la cantidad de arcilla necesaria para los diferentes tratamientos.

Para cuantificar los porcentajes de minerales arcillosos se utilizó un estudio semicuantitativo, en el cual no se tiene en cuenta la presencia de material orgánico, así como cementos y compuestos amorfos.

Figura 9. Diagrama tratamientos químicos para arcillas.



## 5.2 RESULTADOS Y ANALISIS DE ENSAYOS MBT

Se realizaron 43 ensayos de MBT, siguiendo el procedimiento anteriormente descrito. Los pozos, los intervalos y las formaciones respectivas se muestran en el anexo C; los resultados de cada una de las muestras se observan en la tabla 5.

Como se puede observar en los resultados, la mayoría de las arcillas esta en el rango de mediana reactividad. De estas se escogieron 5, para ser analizadas con rayos X, así:

| Fm.       | Pozo              | Prof. | MBT ml | Resultado* |
|-----------|-------------------|-------|--------|------------|
| GUAYABO   | <b>GALERON-1</b>  | 2930' | 4      | 11,4       |
| GUAYABO   | <b>RIO ELE-1</b>  | 7420' | 3,5    | 19,95      |
| LEON      | <b>APIAY E-1</b>  | 4240' | 7      | 9,975      |
| LEON      | <b>LA PUNTA-1</b> | 5610' | 6      | 17.1       |
| CARBONERA | <b>TMENA-2X</b>   | 9140' | 4      | 11.4       |

\*Después de multiplicar los ml\*2.85.

### ***Criterios De Selección De Muestras Para Drx***

- 🌐 Las muestras que se seleccionaron de la Formación Guayabo tenían el propósito de explicar mediante la identificación y cuantificación de la fracción arcilla el súbito aumento de la reactividad a dos profundidades diferentes.
- 🌐 Las muestras de la Formación León también muestran un gran aumento a dos profundidades diferentes.
- 🌐 La muestra de la Formación Carbonera se eligió por ser la muestra obtenida a mayor profundidad y por que los resultados obtenidos no fueron los esperados.

TABLA 5. Resultados de los ensayos MBT.

| RESULTADOS ENSAYO MBT |            |             |            |               |
|-----------------------|------------|-------------|------------|---------------|
| FORMACION             | POZO       | PROFUNDIDAD | V-MBT (ml) | VALOR (*2,85) |
| NECESIDAD             | MELUA-1    | 700'        | 2          | 5,7           |
| NECESIDAD             |            | 710'        | 2          | 5,7           |
| NECESIDAD             | CNADO-1    | 950'        | 2          | 5,7           |
| NECESIDAD             |            | 1550'       | 4          | 11,4          |
| GUAYABO               | MELUA-1    | 1790'       | 3          | 8,55          |
| GUAYABO               | CNADO-1    | 2430'       | 4          | 11,4          |
| GUAYABO               | TMENA-2X   | 2840'       | 5          | 14,25         |
| GUAYABO               | GALERON-1  | 2900'       | 3          | 8,55          |
| GUAYABO               |            | 2910'       | 4          | 11,4          |
| GUAYABO               |            | 2930'       | 4          | 11,4          |
| GUAYABO               | LA PUNTA-1 | 3050'       | 3,5        | 9,975         |
| GUAYABO               |            | 3110'       | 3          | 8,55          |
| GUAYABO               |            | 3170'       | 4          | 11,4          |
| GUAYABO               | APIAY-13   | 3520'       | 6          | 17,1          |
| GUAYABO               | APIAY E-1  | 3760'       | 4,5        | 12,825        |
| GUAYABO               |            | 3780'       | 6,5        | 18,525        |
| GUAYABO               | CN-1       | 5640'       | 5          | 14,25         |
| GUAYABO               | RIO ELE-1  | 7420'       | 3,5        | 9,975         |
| LEON                  | CAMOA-1    | 3240'       | 7          | 19,95         |
| LEON                  |            | 3280'       | 7,5        | 21,375        |
| LEON                  | APIAY-13   | 3580'       | 6,5        | 18,525        |
| LEON                  | APIAY E-1  | 4240'       | 7          | 19,95         |
| LEON                  | LA PUNTA-1 | 5610'       | 6          | 17,1          |
| LEON                  |            | 5630'       | 6          | 17,1          |
| LEON                  |            | 5650'       | 5,5        | 15,675        |
| LEON                  | TMENA-2X   | 7010'       | 4,5        | 12,825        |
| LEON                  | CN-1       | 7190'       | 6,5        | 18,525        |
| LEON                  | RIO ELE-1  | 11320'      | 4          | 11,4          |
| CARBONERA             | CNADO-1    | 3600'       | 4,5        | 12,825        |
| CARBONERA             | GALERON-1  | 4200'       | 3,5        | 9,975         |
| CARBONERA             |            | 4320'       | 5          | 14,25         |
| CARBONERA             | CAMOA-1    | 4370'       | 5          | 14,25         |
| CARBONERA             |            | 4400'       | 7,5        | 21,375        |
| CARBONERA             |            | 4430'       | 5          | 14,25         |
| CARBONERA             |            | 4450'       | 5          | 14,25         |
| CARBONERA             | META-1     | 4450'       | 3          | 8,55          |
| CARBONERA             |            | 5160'       | 3          | 8,55          |
| CARBONERA             | CAMOA-1    | 6490'       | 7          | 19,95         |
| CARBONERA             |            | 6520'       | 2          | 5,7           |
| CARBONERA             |            | 6650'       | 6          | 17,1          |
| CARBONERA             | LUNA ROJ-1 | 8340'       | 6          | 17,1          |
| CARBONERA             | CN-1       | 8600'       | 4,5        | 12,825        |
| CARBONERA             | TMENA-2X   | 9140'       | 4          | 11,4          |

\* Factor de conversión para análisis de arcillas.

Los resultados fueron graficados con el propósito de observar mas claramente cual es el rango de reactividad de las muestras para cada formación (Figuras 10, 11, 12 y 13).

Figura 10. Resultados generales de MBT de las 43 muestras.

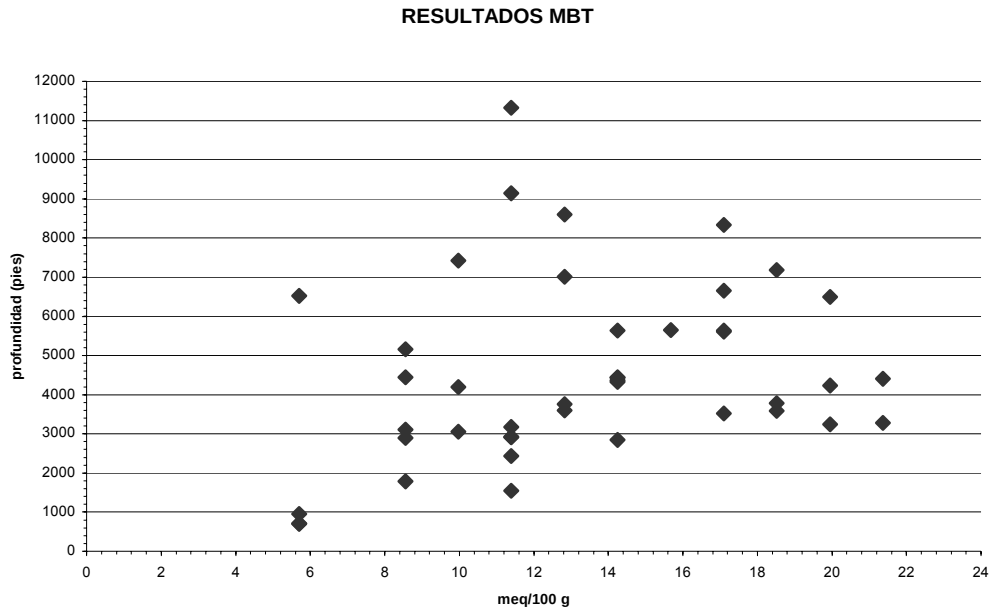


Figura 11. Resultados de MBT para la Formación Guayabo.

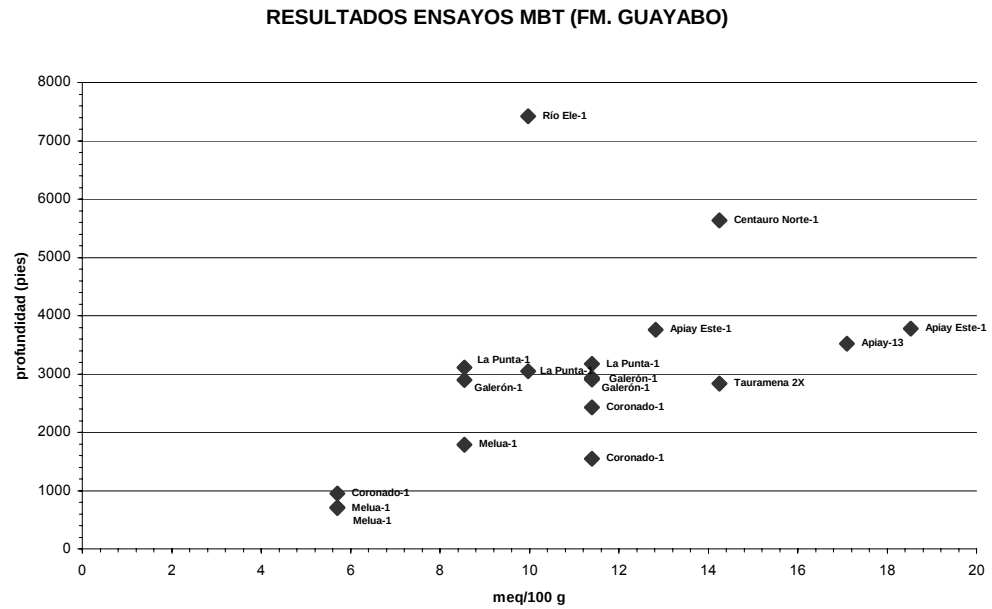


Figura 12. Resultado de MBT para la Formación León.

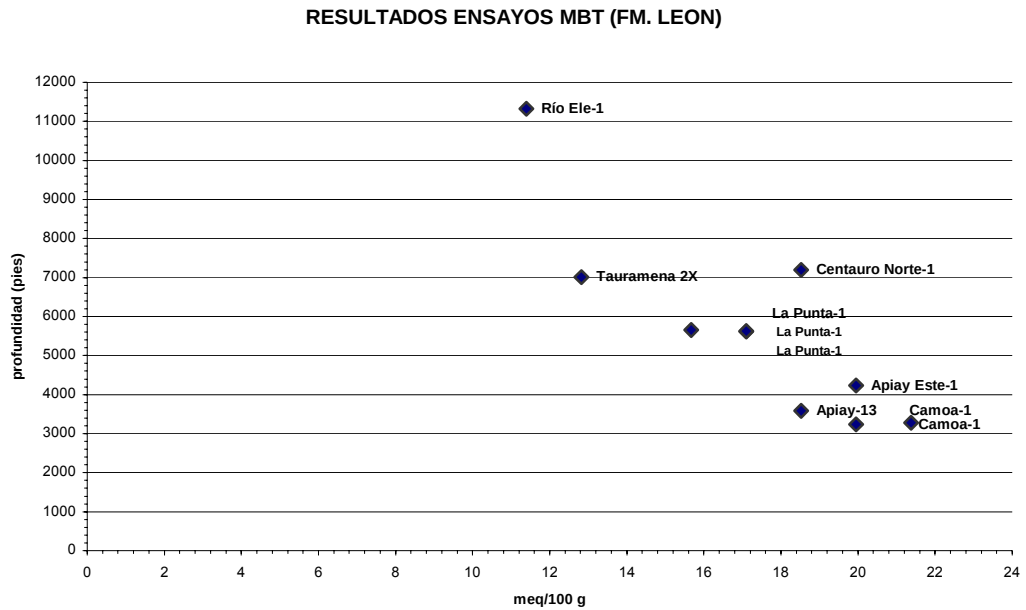
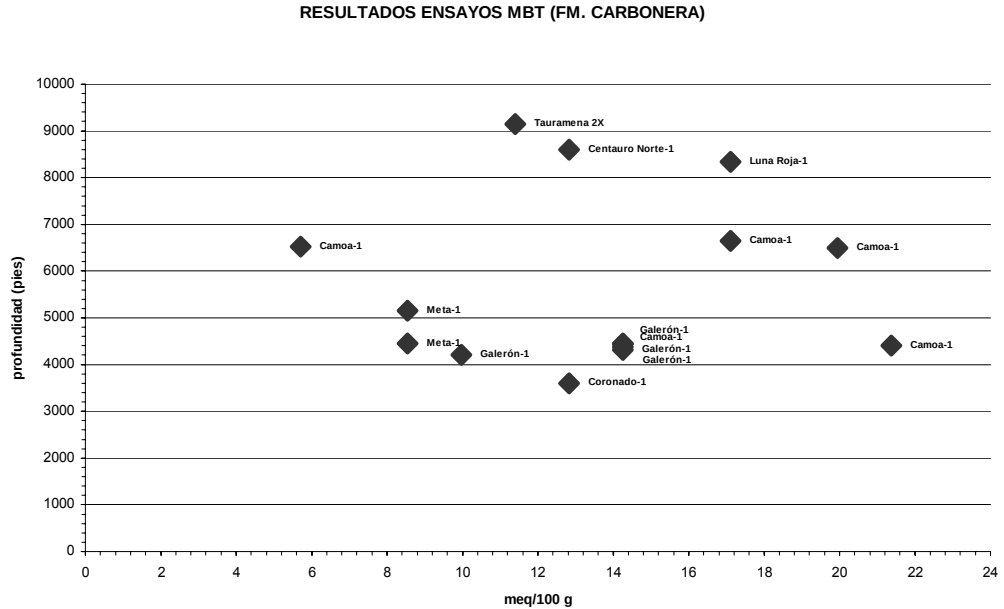


Figura 13. Resultados de MBT para la Formación Carbonera.





Una de las principales razones por las cuales se hacen estas pruebas y se grafican de esta forma, es para observar el grado de reactividad de las arcillas y con base en esto estimar intuitivamente la proporción y presencia de minerales arcillosos en la muestra y los problemas que podrían originar durante su perforación; otra razón muy importante es que esta prueba nos permite escoger las muestras a las cuales se les desea realizar pruebas de difracción de rayos X para tener una descripción mas precisa del tipo y la cantidad de arcilla presente en la muestra.

### 5.3 RESULTADOS Y ANALISIS DE DRX

Se realizaron pruebas de difracción de rayos X en 5 muestras, como se detallo en la sección anterior. De las 5 muestras, 3 fueron analizadas en el Laboratorio de Rayos X de la UIS y las 2 restantes en el Laboratorio de Rayos X del ICP.

Los resultados de las 2 muestras analizadas en el Laboratorio de Rayos X del ICP, fueron los siguientes:

#### MUESTRA LA PUNTA-1 (5610-5670)

En el análisis cualitativo se identificaron las siguientes especies para roca total: minerales de arcilla, cuarzo, pirita, feldespatos y amorfos; para la fracción arcilla: esmectita, illita, clorita, caolinita y cuarzo. Los resultados del análisis cuantitativo para los minerales de arcilla en roca total fue del 41%, para el cuarzo 51%, pirita 5%, feldespatos 1% y un 2% para material amorfo; las cantidades para la fracción arcilla fueron de:

| FASE        |                 | % CUANTITATIVO |
|-------------|-----------------|----------------|
| Cristalinos | Clorita         | 1.1%           |
|             | Illita          | 35.1%          |
|             | Kaolinita       | 50%            |
|             | Montmorillonita | 13.8%          |

#### MUESTRA RIO ELE-1 (7110-7140)

En el análisis cualitativo se encontraron las siguientes especies para roca total: minerales de arcilla, cuarzo y pirita; en la fracción arcilla se encontró: esmectita, illita, clorita, caolinita y cuarzo. Los resultados del análisis cuantitativo para roca total arrojaron un contenido del 23% en minerales de arcilla, 63% cuarzo y 14% de pirita; las cantidades de minerales de arcilla dentro de esta fracción fueron:

| FASE        |                 | % CUANTITATIVO |
|-------------|-----------------|----------------|
| Cristalinos | Clorita         | 1%             |
|             | Illita          | 25%            |
|             | Kaolinita       | 49%            |
|             | Montmorillonita | 25%            |

NOTA: El proceso completo de preparación de la muestra, identificación de los picos y cuantificación fueron realizados por el personal del laboratorio.

Los resultados de las 3 muestras analizadas en el Laboratorio de Rayos X de la UIS fueron las siguientes:

#### MUESTRA TAURAMENA-2X (9110-9140')

En el análisis cualitativo se identificaron las siguientes especies: cuarzo, caolinita, illita-2M2 y calcita. Como características de esta muestra podemos resaltar los picos de mayor intensidad en 15.77 Å, 10.80 Å, 7.53 Å, 5.16 Å y 3.40-3.66 Å. El pico de 15.77 Å corresponde a la montmorillonita, aunque en muchas ocasiones los minerales Interestratificados de tipo illita-montmorillonita-illita se solapan en este rango al igual que el material amorfo, pero no hay duda ya que al glicolarse se desplazo a 16.54 Å, que es un desplazamiento usual en la montmorillonita. En 10.80, 5.16 y 3.40 Å se localiza el rango de la illita, la cual durante los tratamientos solo presento pequeños desplazamientos de sus picos respectivos. En 7.53 y 3.66 Å tenemos la caolinita, la cual se corrobora al saturarse con KCl y luego calcinarse a 550 °C, ya que a esta temperatura desaparecen sus picos. Los resultados del análisis cuantitativo fueron:

| FASE        |                 | % CUANTITATIVO |
|-------------|-----------------|----------------|
| Cristalinos | Calcita         | 2.83%          |
|             | Illita          | 52.83%         |
|             | Kaolinita       | 38%            |
|             | Montmorillonita | 6.34%          |

#### MUESTRA APIAY ESTE-1 (4230-4290')

En el análisis cualitativo se identificaron las siguientes especies: caolinita 1A, cuarzo, illita-2M1 y yeso. Como características de esta muestra podemos resaltar los picos de mayor intensidad en 14.34 Å, 10.02 Å, 7.18 Å, 5.0 Å y 3.58-3.33 Å. El pico de 14.34 Å corresponde a la montmorillonita, aunque en muchas ocasiones los minerales Interestratificados de tipo illita-montmorillonita-illita se solapan en este rango al igual que el material amorfo, pero al glicolarse tuvo un desplazamiento a 16.66 Å, usual en la montmorillonita. En 10.02, 5.0 y 3.33 Å se localiza el rango de la illita, la cual durante los tratamientos solo presento pequeños desplazamientos de sus respectivos picos. En 7.18 y 3.58 Å tenemos la caolinita, la cual se corrobora al saturarse con KCl y luego calcinarse a 550 °C, ya que a esta temperatura desaparecen sus respectivos picos. Los resultados del análisis cuantitativo fueron:

| FASE        |                 | % CUANTITATIVO |
|-------------|-----------------|----------------|
| Cristalinos | Yeso            | 1.85%          |
|             | Kaolinita       | 34%            |
|             | Montmorillonita | 7.1%           |
|             | Illita          | 57.05%         |

#### MUESTRA GALERON-1 (2900-2930)

En el análisis cualitativo se identificaron las siguientes especies: caolinita, cuarzo, magnetita y hematita. Como características de esta muestra podemos resaltar los picos de mayor intensidad en 10.02 Å, 7.16 Å, 4.98 Å y 3.32-3.57 Å. Sólo al saturarse con  $MgCl_2$  y solvatarse con etilenglicol, se detecto un pico en 16.66 Å, en el

análisis de la muestra bulk, se corroboró que era montmorillonita. El pico de 10.02, 4.98 y 3.32 Å corresponde a la illita, la cual durante los tratamientos solo presentó pequeños desplazamientos de sus picos respectivos. En 7.16 y 3.57 Å tenemos la caolinita, la cual se corrobora al saturarse con KCl y luego calcinarse a 550 °C, ya que a esta temperatura desaparecen sus picos. Los resultados del análisis cuantitativo fueron:

| FASE        |                 | % CUANTITATIVO |
|-------------|-----------------|----------------|
| Cristalinos | Hematita        | 4.7%           |
|             | Kaolinita       | 36.7%          |
|             | Illita          | 38.4%          |
|             | Montmorillonita | 20.2%          |

NOTA: El procedimiento de preparación de la muestra e identificación de los picos fue realizado por el autor. La cuantificación fue realizada por el personal del laboratorio. Además los datos cuantitativos fueron normalizados (sólo se tuvo en cuenta la fase cristalina de los minerales de arcilla en la fracción arcilla) para guardar las proporciones con los resultados del laboratorio del ICP (en donde no se tiene en cuenta la presencia de amorfos y cuarzo > 2μ).

Los difractogramas para estas muestras se presentan en el anexo D.

## 6. DISCUSIÓN (RESULTADOS Vs. ANTECEDENTES) Y SÍNTESIS

En los resultados de laboratorio de DRX podemos observar como en las muestras La Punta-1 (5610'-5670') correspondiente a la Formación León, Río Ele-1 (7110'-7140') correspondiente a la Formación Guayabo y Galerón-1 (2900'-2930') correspondiente a la Formación Guayabo, el contenido de montmorillonita estuvo por encima del 10%, y sus resultados de MBT fueron 17.1, 19.95 y 11.4 meq/100 g respectivamente, lo cual nos indica que la reactividad en las dos primeras esta ligada a la presencia de éste mineral junto al contenido de caolinita, ya que este obtuvo alrededor del 50% en estas muestras; según **Moore** (1997), la montmorillonita puede adsorber una capa de agua poco ordenada si el catión inmutable es el  $\text{Na}^+$ , lo que hace que la arcilla se hinche o se expanda indefinidamente; también **Moreno** (1989), explica que la reactividad es el producto de la hidratación de las arcillas mas sensibles al agua, como la montmorillonita y variedades intercaladas; para **Fam** (1999), el hinchamiento es crucial solo cuando los shales poseen cantidades significantes de minerales arcillosos reactivos como la montmorillonita; **Roy** (1993), al respecto del tema afirma que los shales reaccionan con el agua del fluido de perforación, hinchándolos considerablemente y posteriormente causando pegas, así como el contenido de montmorillonita en los shales, es el factor mas importante con respecto a la hidratación y el bit-balling; así mismo, **Bol** (1974), dice que el fenómeno de hidratación puede ser cuantificado simplemente con la introducción de un esfuerzo de hidratación al esfuerzo total y a la presión de poro, además que este esfuerzo de hidratación depende del tipo de arcilla; **Van Olphen** (1968), explica que una arcilla como la montmorillonita puede llegar a producir esfuerzos hasta de 20 000 psi o mayores al hidratarse; sobre éste tema **Mondashine** (1968), realiza experimentos con el fin de apreciar el efecto de hidratación sobre la densidad de un shale, esto mostró que la hidratación disminuye la densidad en forma lineal, o sea que el volumen varía proporcionalmente; además según **Kubacki** (1983), la caolinita en contacto con el agua se dispersa, sin embargo, este hecho es un arrastre mecánico debido a la defloculación de la caolinita, pues este mineral no presenta expansión frente al agua. En la muestra Galerón-1 observamos un gran contenido de montmorillonita, comparado con las demás muestras, pero en los resultados de MBT se encontró una reactividad moderada, lo cual debe ser el producto de una baja proporción en el contenido de

caolinita en comparación con la illita; esto quiere decir que la reactividad también depende de las cantidades en las cuales se encuentren minerales como la montmorillonita y caolinita en conjunto o caolinita en comparación con la cantidad de illita. En las muestras Apiay Este-1 (4230'-4290') correspondientes a la Formación León y Tauramena 2X (9110'-9140') correspondiente a la Formación Carbonera, los resultados cuantitativos de DRX mostraron una predominancia de illita, como mineral de mayor proporción (en ambas muestras es >50% de la fracción arcilla), y sus resultados de MBT fueron 9.975 y 11.4 respectivamente; esto indica que las rocas con altos contenidos de illita tenderán a presentar reactividades entre moderadas y bajas, como lo indica **Fam et al.**, (1999). Sobre los resultados en los ensayos de MBT, los intervalos Camoa-1 (3280') y Camoa-1 (4400'), el primero correspondiente a la Formación León y el último a la Formación Carbonera, se encontró el mayor valor, 21.375; lo cual implica que en éstos intervalos las concentraciones de montmorillonita y caolinita sumadas, representan como mínimo el 60% de la fracción arcilla, ya que esto fue lo observado en las muestras La Punta-1 y Río Ele-1, a las cuales se les realizó difracción de rayos X; éste criterio también lo podemos utilizar en las muestras Camoa-1 (3240' y 3280'), Apiay 13 (3580'), Apiay Este-1 (4240'), La punta-1 (5610' y 5630') y Centauro Norte-1 (7190'), en donde los valores de MBT estuvieron por encima de 17 meq/100 g, para la Formación León y en la muestra Apiay Este-1 (3780') para la Formación Guayabo.

Algunos problemas que acarrearía perforar formaciones arcillosas reactivas son las mencionadas por **Roy** (1993) y **Cress** (1983); ellos realizan investigaciones con arcillas en donde concluyen que la inestabilidad de estas produce derrumbes de la cara del pozo, lo cual acarrea problemas durante la perforación, como disminución de la rata de penetración.

En el presente trabajo se realizó en síntesis un estudio sobre los problemas que genera la perforación de formaciones arcillosas, desde un punto de vista químico y mineralógico. Para realizar una amplia cobertura del tema se dispuso de una gran base bibliográfica, soportada principalmente por artículos publicados por la *Society Petroleum Engineer* (SPE), en donde se aborda este tema principalmente desde el análisis de pruebas de laboratorio. Para darle un mayor soporte al presente trabajo y aplicabilidad a lo obtenido en la fase bibliográfica, se realizaron ensayos de laboratorio de tipo *Metil*

*Blue Testing* (MBT) y Difracción de Rayos X (DRX) en muestras del piedemonte llanero, pertenecientes a las formaciones Necesidad, Guayabo, León y Carbonera (miembro superior).

Sobre la fase de recopilación de información, se encuentra que el tema se centra principalmente en publicaciones hechas por: **Elf**, 1962; **Chenevert**, 1970; **Bol**, 1974; **Cress**, 1983; **Brandon**, 1992; **Roy**, 1993; **Wong**, 1993; **Santarelli**, 1995; **Fam**, 1999; **Simpson**, 2000; entre otros, los cuales con base en pruebas de laboratorio realizadas en rocas arcillosas y publicadas por la SPE, concluyen que muchos de los problemas que se presentan durante la perforación de rocas arcillosas, son el producto de la alteración de las propiedades químicas inherentes de los minerales de arcilla presentes en la roca y que los principales fenómenos químicos que se deben tener en cuenta durante la perforación de la roca son: *difusión de presión de poro, plasticidad, anisotropía, efectos capilares, osmosis, alteración físico-química y la baja permeabilidad del shale*. También que cualquier alteración de los anteriores factores químicos puede generar hinchamiento, dispersión, fracturamiento o derrumbes de las rocas arcillosas.

También autores como **Paulin**, 1930; **Grim**, 1962; **Castro** (1975); **Rodríguez**, 1976 **Potter**, 1980; **Carrillo**, 1985; **Moreno**, 1989; **Moore** (1997); han realizado publicaciones que nos dan a entender este problema de la perforación de rocas arcillosas con unas bases teóricas desde el punto de vista químico, que principalmente tratan sobre la composición mineralógica y el comportamiento químico de los minerales de arcilla al ponerse en contacto con un fluido como el agua.

Las pruebas de MBT y DRX se realizaron con el fin de determinar desde el punto de vista de laboratorio, el posible comportamiento de las rocas o los problemas que se podrían generar al perforar las formaciones de las cuales se extrajeron las muestras. Es recomendable realizar primero la prueba de MBT, ya que ella va a colaborar en la identificación de las muestras con mayor reactividad o mayor susceptibilidad en el momento de perforar (**Carrillo**, 1985); con base en esto se hace la elección de las muestras a las cuales se les realizará DRX, así se caracterizará y cuantificará desde el punto de vista mineralógico las muestras reactivas y se podrá establecer más exactamente que esta provocando su tendencia a esta reactividad.

Los resultados de MBT obtenidos en 43 muestras extraídas de ripios de perforación de pozos provenientes del piedemonte llanero arrojaron resultados que permitieron establecer un determinado comportamiento para cada formación (Tabla 5), así: La Formación Necesidad se clasificó en el rango de baja reactividad; la Formación Guayabo en el rango de baja a moderada reactividad; la Formación León en el rango de alta reactividad y la Formación Carbonera (miembro superior) en el rango de moderada reactividad.

Los resultados de DRX de 5 muestras elegidas a partir de los resultados de MBT (Capítulo 5.3), permitieron establecer lo siguiente:

- La reactividad de una muestra no es el resultado de la presencia de un solo tipo de mineral arcilloso, sino de la combinación de dos o más minerales.
- Los valores de reactividad están relacionados con la presencia de ciertos tipos de minerales en conjunto y de las proporciones a las cuales se encuentren en la muestra, como lo son la presencia de caolinita junto a la montmorillonita.
- Cuando la illita se encontraba en mayor proporción dentro de la muestra, en comparación con la caolinita y la montmorillonita, los valores de reactividad eran de rangos moderados a bajos.
- Finalmente, que a partir de pruebas de laboratorio es posible establecer un determinado comportamiento de las muestras arcillosas durante su perforación, entonces lo recomendable cuando se va a perforar en una zona nueva en donde no se tiene ningún tipo de información sobre perforaciones, es realizar la mayor cantidad de pruebas de laboratorio posibles.

Con base a en la información recopilada en la fase bibliográfica y los resultados de laboratorio se ha construido la siguiente tabla, que reúne la información acerca del comportamiento de los minerales y fluidos de perforación sugeridos para su perforación, así:



| MINERAL         | CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | RECOMENDACIONES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MONTMORILLONITA | Mineral hidratable, cuya unidad cristalina sílice-alumina esta basada principalmente por dos unidades estructurales tetraedro-octaedro-tetraedro, unidas por un catión intercambiable que puede ser Mg, Ca y Na. Cuando el catión entre las unidades estructurales es el Na, la montmorillonita alcanza su máximo valor de reactividad, según resultados de pruebas MBT y DRX. | Cuando la montmorillonita es el mineral de mayor concentración en la roca, se debe perforar con mucha precaución, utilizando fluidos impermeables, como los fluidos base aceite, aunque en muchas ocasiones esto no es suficiente y se recomienda inhibir la fase acuosa del fluido base aceite con una sal, que impida reacciones osmóticas. También hay fluidos alternativos como lodos bajos en sólidos y lodos dispersos o saturados con sales de potasio, o una combinación de estos, los cuales permiten inhibir la arcilla además de dar un buen soporte a la pared del pozo. Además se requiere un gran control de las presiones sobre la pared del pozo. |
| CAOLINITA       | Mineral poco hidratable, cuya unidad cristalina también de sílice-alumina, consta de dos unidades estructurales tetraedro-octaedro unidas entre sí; al contacto con el agua tiende a sufrir defloculación y moderada reactividad, según resultados de pruebas MBT y DRX..                                                                                                      | Si la caolinita se encuentra en mayor proporción dentro de la roca, ya que es un mineral poco hidratable, no se requiere la utilización de fluidos de perforación tan costosos como los de base aceite, se pueden utilizar fluidos base agua inhibidos con un buen control de presión y viscosidad que le den buen soporte a las paredes del pozo. En este caso una posible opción seria fluidos de calcio o fluidos bajos en sólidos, o una combinación de estos.                                                                                                                                                                                                |
| ILLITA          | Mineral de silicio-aluminio, posee la misma estructura cristalina de la montmorillonita, pero a diferencia de ésta el catión entre las unidades cristalinas es el K, el cual la hace muy estable y no hidratable al contacto con agua. Es poco reactiva según resultados de pruebas MBT y DRX.                                                                                 | Como es el mineral que menos reactividad y si es el de mayor contenido dentro de la roca, durante la perforación se puede realizar un proceso similar al de la caolinita, en el cual se utilice un fluido base agua inhibido con un buen control de presiones y viscosidad. Los fluidos de calcio también serian una buena opción.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| MEZCLAS         | Teniendo en cuenta que los minerales de arcilla no se encuentran en la naturaleza en forma individual sino en grupos, se debe primero identificar las proporciones a las cuales se encuentra cada mineral dentro de la muestra.                                                                                                                                                | En este caso se tiene en cuenta las consideraciones antes mencionadas, dependiendo las proporciones de los minerales en la muestra, para así hacer una optima elección del fluido de perforación a utilizarse, es decir, si se presenta por ejemplo la siguiente proporción: Caolinita>Illita>Montmorillonita, en este caso el fluido debe mantener un muy buen soporte de la cara del pozo para evitar derrumbes, además de tener buena viscosidad para permitir mayor arrastre de ripios y a la vez ser inhibido iónicamente con una sal (por ejemplo K) para evitar que reaccione la montmorillonita.                                                          |

NOTA: Lo más recomendable es hacer pruebas de hinchamiento y dispersión con muestras del área para realizar una optima elección. Por lo general para perforación de arcillas siempre se utiliza un fluido que reúna las características en conjunto de otros fluidos de perforación. En [www.uamerica.edu.co](http://www.uamerica.edu.co) se encuentra una síntesis sobre las tipos y características de los fluidos de perforación más utilizados en la industria petrolera.

## CONCLUSIONES

- La ósmosis química encuentra su mayor desarrollo cuando la capacidad de intercambio catiónico en la roca es alta, un ejemplo de esto es lo ocurrido con la montmorillonita.
- En los resultados de intercambio catiónico “MBT” para las 43 muestras, 4 muestras fueron de baja reactividad, 25 moderada reactividad y 14 de alta reactividad; eso quiere decir que las muestras analizadas tienden a poseer una reactividad moderada, no significa que no se hinchen o dispersen, sólo que la tendencia a reaccionar o a intercambiar especies no es tan marcada, pero que se necesitan más pruebas de laboratorio como ensayos de hinchamiento y dispersión para cuantificar de una forma más exacta su reactividad.
- De los anteriores resultados se tiene que de las 4 muestras analizadas para la Formación Necesidad, ninguna presenta reactividad; para la Formación Guayabo sólo 2 presentan reactividad y las 12 restantes presentan moderada reactividad; en la muestras de la Formación León 8 son reactivas y las 2 restantes son moderadamente reactivas; en la Formación Carbonera 4 muestras son reactivas y las 11 restantes son moderadas. De esto se observa que la Formación León presente la mayor reactividad en comparación con las demás. Además se puede relacionar estos resultados con posibles ambientes de depositación, de acuerdo a las investigaciones de **Grim** (1962), éste autor de acuerdo a sus investigaciones concluye que un mineral como la caolinita se forma en mayor proporción en ambientes continentales y costeros; minerales como la montmorillonita e illita predominantemente se forman en ambientes marinos. Esto significa que formaciones como la Formación Carbonera y León tuvieron gran influencia marina, aunque por los contenidos de caolinita que presentan también hubo influencia continental. La Formación Guayabo es continental y los contenidos anómalos de monmorillonita, sugieran un aporte de mineral preexistente.

- En los resultados de rayos X, se observó que el mineral más abundante en la mayoría de las muestras fue la caolinita e illita, por lo cual se debe emplear un agente antidispersante durante la perforación.
- Los contenidos de montmorillonita en la fracción arcilla fueron superiores al 10% en las muestras Galerón-1 (2900-2930) correspondiente a la Formación Guayabo, La Punta-1 (5610-5670) correspondiente a la Formación León y Río Ele-1 (7110-7140) correspondiente a la Formación Guayabo. En la bibliografía reconocen un contenido problemático de montmorillonita por encima del 30% de la fracción arcilla, aunque en las muestras anteriormente mencionadas el contenido de éste mineral no superó el 20%, si podemos apreciar que cuando la caolinita es el mineral de mayor contenido de la fracción arcillosa (50%) y hay presencia de montmorillonita por encima del 10% las muestras dieron altos valores de C.I.C., clasificando éstas muestras como reactivas, como se puede observar en las muestras La punta-1 (5610-5670) y Río Ele-1 (7110-7140). Esto no sucedió en la muestra Galerón-1 (2900-2930), en donde el contenido de montmorillonita llegó al 20%, pero la caolinita no superó el 40%, y en donde la illita fue el mineral de mayor concentración dentro de la fracción arcilla.
- En las muestras Galerón-1 (2900-2930), Apiay Este-1 (4230-4290) y Tauramena 2X (9110-9140), el mineral de mayor concentración fue la illita, alcanzando en algunas muestras más del 50%, en estas muestras los valores de C.I.C. no fueron muy altos, destacándose que en las muestras con mayor contenido de illita los valores de C.I.C. no llegaron a 10 meq/100 g., con lo cual se observa que a mayor contenido de illita menos reactiva será la roca.

## RECOMENDACIONES

- Con el fin de determinar cuál es el método más adecuado para contrarrestar la hidratación de lutitas en áreas nuevas, en las cuales no se posee ninguna información, se debe efectuar un número representativo de ensayos de laboratorio, para así determinar el contenido y tipo de mineral arcilloso presente en las lutitas para clasificarlas más exactamente.
- Teniendo en cuenta que la ósmosis es el fenómeno de mayor influencia en las formaciones arcillosas, se recomienda realizar pruebas de laboratorio encaminadas a cuantificar la actividad de estas formaciones, esto ayudará a una mejor elección de los fluidos de perforación. Esta cuantificación se puede realizar por medio de pruebas de adsorción isotérmica.
- Como en la Cuenca de los Llanos la inestabilidad no se presenta sólo por la perforación de shales, sino también y en gran proporción por el régimen de esfuerzos, se retoma lo publicado por Van Olphen (1968), y se recomienda cuantificar los esfuerzos de hidratación de estas rocas y ver su incidencia en el estado de esfuerzos del pozo. Esto se puede llevar a cabo mediante ensayos de hinchamiento y dispersión, y adsorción isotérmica.
- La realización de ensayos de hinchamiento y dispersión pueden ayudar a corroborar y comparar los resultados obtenidos a partir de los ensayos MBT y DRX.

## BIBLIOGRAFIA

1. American Petroleum Institute. Recommended Practice Standard Procedure For Testing Drilling Fluids. Normas API RP 13B y 13 I. 2000.
2. Bole, G.M.; Wong S.W. Borehole Stability In Shales. Artículo SPE 24975. 1974.
3. Brandon, B.D. et al. "Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System," SPE Paper No. 23940 presented at the 1992 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, LA, February 1992.
4. Bustos D. Jorge E.; Enoc O. Rafael. Restauraacion Teórico – Práctica Del Laboratorio De Lodos Y Cementos. Escuela de Ingeniería de Petroleos. UIS. 1967.
5. Carrillo L. Análisis de Arcillas en Rocas Sedimentarias Mediante Difracción de Rayos X. Tesis de Grado. Escuela de Química, UIS. 1985.
6. Castro M. Dimas. Mineralogia De Suelos. Agrólogo PhD. IGAC. Subdirección agrológica. 1975.
7. Chenevert Martin E. and Vincent Pernot. Control Of Shale Swelling Pressures Using Water-Base Muds. The University of Texas at Austin. SPE 49263. 1998.
8. Chenevert M. E. Shale Control With Balanced-Activity Oil-Continuos Muds. SPE-AIME, Esso Production Reserch Co. 1970.
9. Cress, L.A. "How and When To Run a PDC Bit in the Upper Texas Gulf Coast-An Operator's Viewpoint," SPE Paper No. 11388 presented at the IADC/SPE 1983 Drilling Conference, New Orleans, LA, February 1983.
10. Fam M.A; Dusseault M. B. Borehole Stability In Shales: A Physico-Chemical Perspective. Articulo SPE 47301. 1999. Pg. 461-463.
11. Gómez R. Jorge y Cedeño L. Edgar. Estudio Sobre El Control De Lutitas Durante La Perforación. Tesis de Grado UIS. 1976.

12. Grim E. Ralph. Clay Mineralogy. McGraw-Hill. 1962.
13. Hale A.H.; Mody F.K. Experimental Investigation Of The Influence Of Chemical Potential On Wellbore Stability. Shell Development Co., and D.P. Salisbury. 1992.
14. Jackson M. L. Soil Clay Mineralogical Analisis, In: Rich, C. I. and Kunze, G. W., ed. Soil Clay Mineralogy Symposium. University of North Carolina, 1964. pp. 245-294.
15. Kubacki Witold. Alteración de la Caolinita Como la Causa de la Reducción de Permeabilidad Natural de la Formación. Petróleo y Tecnología. 1981.
16. Mondashine, T.C. DRILLING PROBLEMS SHALES. Oil and Gas Journal. 1968.
17. Moore M. Duane; Reynolds C. X-ray Diffraction and the Identificación and Análisis of Clay Minerals. Robert. Oxford University Press. Second Edition. 1997.
18. Moreno R. Hugo; Antolinez V. Análisis del Lodo Polímetro Ez-Mud Para Estabilidad de Lutitas. Tesis de grado. UIS. 1989.
19. Mossman, M. H., Freas, D. H. and Bailey, S. W. Orienting Internal Stanrd Method for Clay minerla X-ray Analysis. Clays and Clay Minerals. P. 441-453. 1967.
20. Potter E., Maynard J. y Prior W. Sedimentology of Shale. Springer-Verlag, New Cork Heidelberg Berlin. 1980.
21. Rodríguez R. Y Bravo M. Estudio De La Inestabilidad De Las Lutitas Durante La Perforación. Tesis de Grado. UIS. Pg 20-24. 1976.
22. Roy S. and Cooper G.A. Prevention of Bit Balling in Shales: Some Preliminary Results. Artículo SPE 23870. 1993.
23. Santareli, F.J. and Stefano Carminati, Enlricerche SpA. Do Shales Swell? A Critical of Available Evidence. AGIP SpA, SPE/IADC 29421. 1995.

24. Simpson, J.P. y H.L. Dearing. Diffusion Osmosis-An Unrecognized Cause Of Shale Instability. SPE, O' Brien-Goins-Simpson and Associates, Inc. Febrero de 2000. SPE 59190.
25. Torrado E. Claudia. Compilación Detallada y Análisis de la Informaciones Estratigráfica, Geoquímica y Bioestratigráfica Existente Sobre la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. Tesis de Grado, UIS. 2000.
26. H. Van Olphen. An Introduction To Clay Colloid Chemistry. Second Edition. Jhon Wiley & Sons. 1977.
27. Van Oort, E., Hale. Transport In Shales And The Design Of Improved Water-Based Shale Drilling Fluids. A.H. SPE 28309.
20. Van Ort. Physico-Chemical Stabilization Of Shales. Artículo SPE 37263.
28. Wolfv. Engelhardt. The Origin Of Sediments And Sedimentary Rocks. Sedimentary Petrology Part III. Altalsted Press Book. 1977.
29. Wong Sau-Wai and C.J. Kenter. Optimising Shale Drilling In The Northern North Sea: Borehole Stability Considerations. Artículo SPE 26736. 1993.

#### ENLACES

30. <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/Arcillas.htm#hidrat>
31. <http://www.solids.bnl.gov/home/dimosiclays/>
32. <http://www.usgs.gov.co>

## ANEXOS

### ANEXO A. Ley de Stokes

Para separar los limos de las arcillas se utiliza la ley de Stokes, la cual se representa con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{s}{t} = \frac{2}{9} \frac{gr^2}{n} \frac{dp - dl}{n}$$

En la cual, **r** es el radio de las partículas que se van a separar, para las arcillas, este valor es de  $2\mu$ .

**g**, es la gravedad.

**dp**, es la densidad de las partículas, para las arcillas, su valor promedio es 2.65 g/cc.

**dl**, es la densidad del líquido a través del cual caen las partículas.

**n**, es la viscosidad del líquido.

Aplicando la formula anterior, se despeja **t** y se encuentra que las arcillas después de 26 horas, se han desplazado una distancia de 36 cm. a través del agua destilada. El cálculo es como sigue:

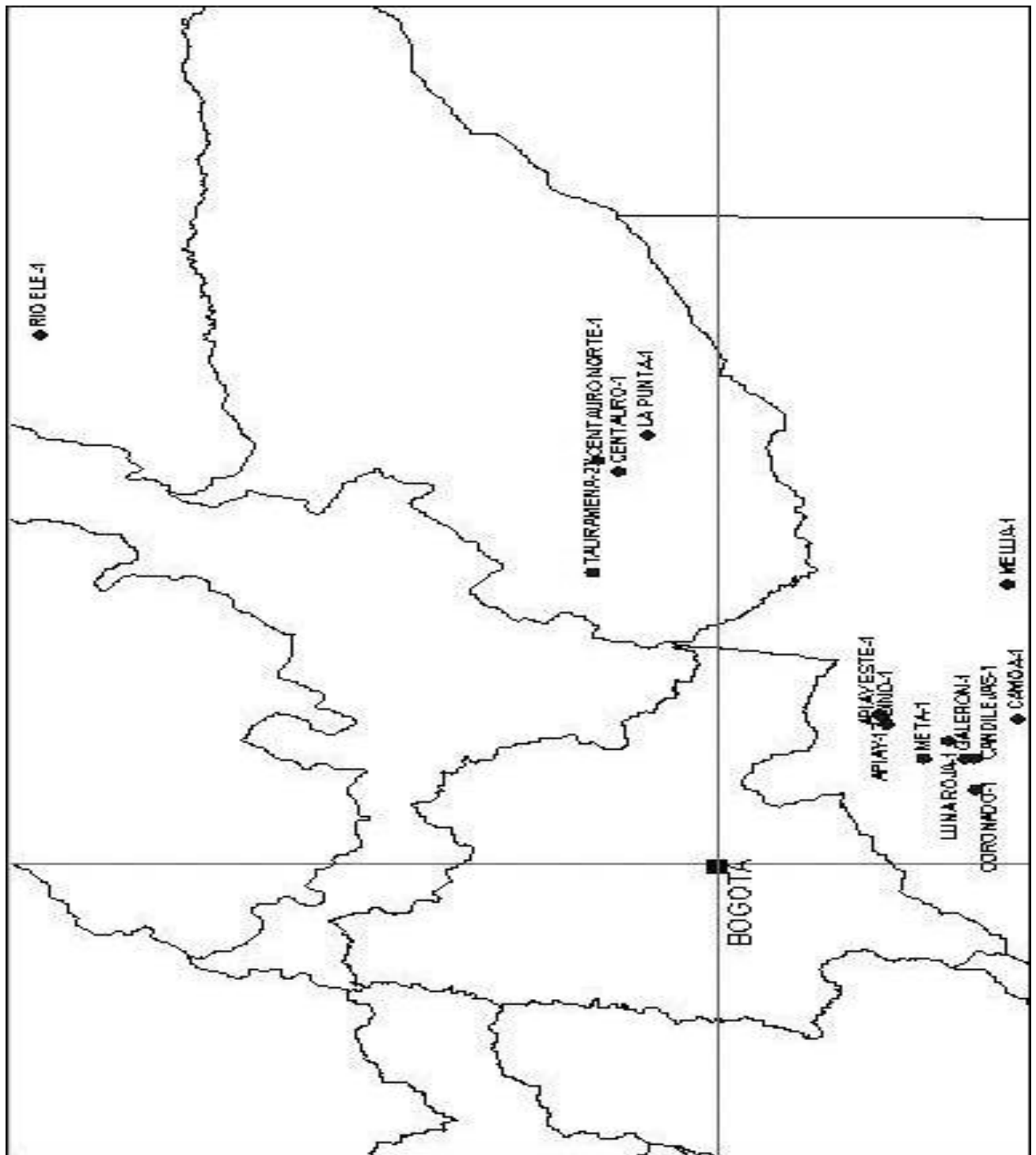
$$t = \frac{18 * h * n}{g(dp - dl) * r^2}$$

**h**, es la separación de las partículas de arcilla.

Entonces:

$$t = \frac{18 * 36 \text{ cm.} * 0.008931 \text{ g/cm.} * \text{seg.}}{980 \text{ cm./seg.}^2 * 1.6 \text{ gr./cm.}^3 * (2.10^{-4})^2 \text{ cm.}^2} = 26 \text{ h.}$$



**ANEXO B.** Mapa de localización de los pozos utilizados para el presente trabajo.

**ANEXO C.** Listado de pozos, profundidad, intervalos y formaciones.

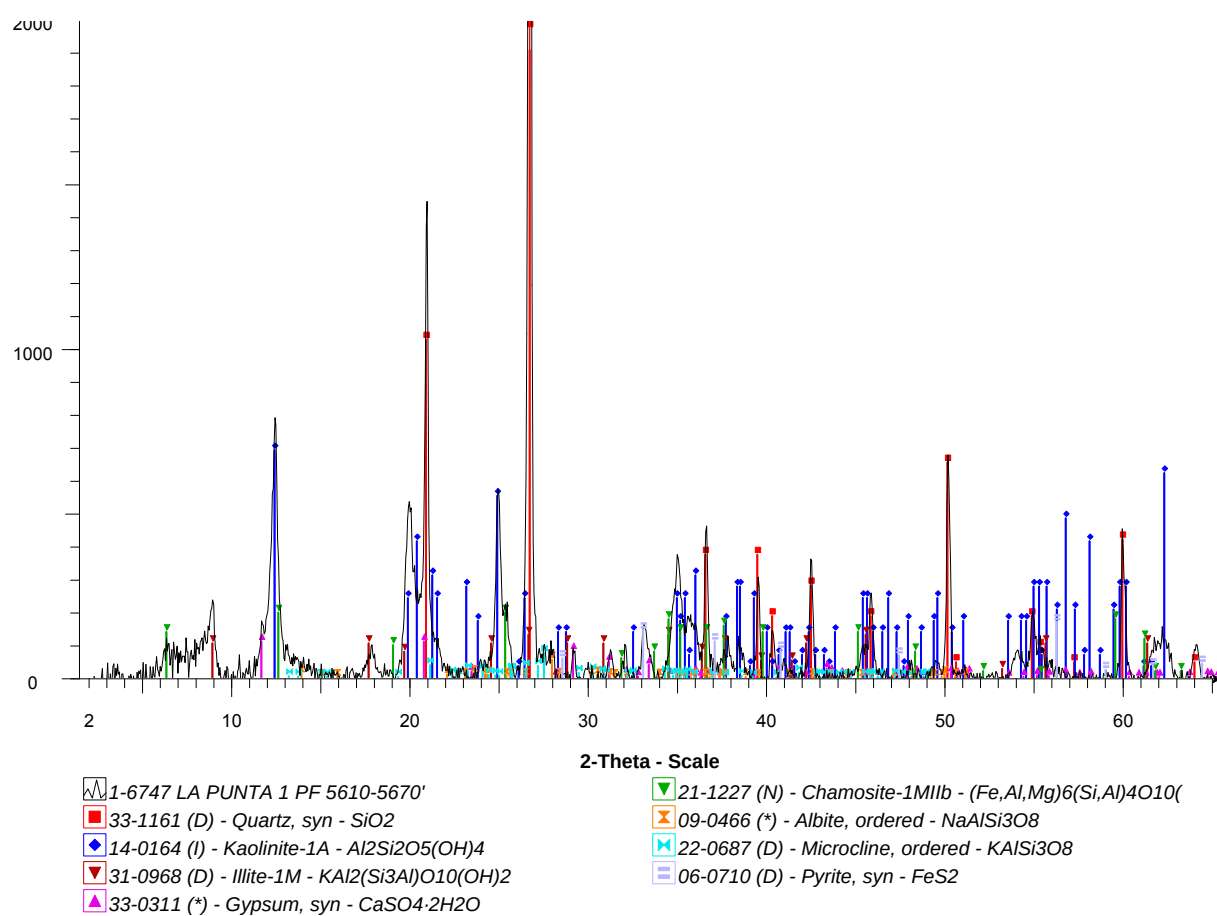
| POZO                    | X                          | Y                       | DEPARTAMENTO | PROFUNDIDAD | INTERVALOS      | FORMACION | ESPESOR | ENSAYO  |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------|-------------|-----------------|-----------|---------|---------|
| <b>APIAY ESTE-1</b>     | 1075000-1080000            | 945000-940000           | META         | 11747'      | 3750' - 3790'   | GUAYABO   | 3955'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 4230' - 4290'   | LEON      | 473'    | DRX-MBT |
| <b>APIAY-13</b>         | 1075000-1080000<br>1060000 | 945000-940000<br>900000 | META         | 7492'       | 3520' - 3620'   | GUAYABO-N | 3867'   | MBT     |
| <b>CAMOA-1</b>          |                            |                         |              |             | 3240' - 3290'   | LEON      | 331'    | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 4370' - 4460'   | CARBONERA | 3473'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 6490' - 6670'   | CARBONERA |         | MBT     |
| <b>CENTAURO NORTE-1</b> | 875000                     | 1040000                 | CASANARE     | 12364'      | 5630' - 5650'   | GUAYABO-N | 7140'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 7190' - 7210'   | LEON      | 1209'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 8600' - 8620'   | CARBONERA | 2297'   | MBT     |
| <b>CORANADO-1</b>       | 1030000-1050000            | 920000-900000           | META         | 7940'       | 950'            | GUAYABO-N | 2958'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 1540' - 1550'   | GUAYABO-N | 2958'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 2410' - 2430'   | GUAYABO-N | 2958'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 3600' - 3610'   | CARBONERA | 2740'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 2900' - 2930'   | GUAYABO   | 1750'   | DRX-MBT |
| <b>GALERON-1</b>        | 1050000-1055000            | 915000-910000           | META         | ?           | 4200' - 4230'   | CARBONERA | 5020'   | MBT     |
| <b>LA PUNTA-1</b>       |                            |                         |              |             | 3050' - 3200'   | GUAYABO   | 5600'   | MBT     |
|                         | 885000 - 890000            | 1025000-1020000         | CASANARE     | ?           | 5610' -5670'    | LEON      | 956'    | DRX-MBT |
| <b>LUNA ROJA-1</b>      |                            |                         |              |             | 8330' - 8360'   | CARBONERA | 4863'   | MBT     |
| <b>MELUA-1</b>          | 1064071                    | 916828                  | CASANARE     | ?           | 700' - 710'     | NECESIDAD | 1050'   | MBT     |
|                         | 1145000                    | 900000 - 895000         | META         | ?           | 1790' - 1800'   | GUAYABO   | 780'    | MBT     |
| <b>META-1</b>           | 1060000-1040000            | 920000-940000           | META         | ?           | 4540' - 4570'   | CARBONERA | 5732'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 5150' - 5180'   | CARBONERA | 5732'   | MBT     |
| <b>RIO ELE-1</b>        | 940000                     | 1235000                 | ARAUCA       | ?           | 7410' - 7430'   | GUAYABO   | 6832'   | DRX-MBT |
|                         |                            |                         |              |             | 11310' - 11320' | LEON      | 706'    | MBT     |
| <b>TAURAMENA-2X</b>     | 1150000                    | 1045000                 | CASANARE     | ?           | 2810' - 2840"   | GUAYABO   | 4450'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 7010' - 7030'   | LEON      | 2750'   | MBT     |
|                         |                            |                         |              |             | 9110' - 9140'   | CARBONERA | 7320'   | DRX-MBT |

## ANEXO D. Difractogramas.

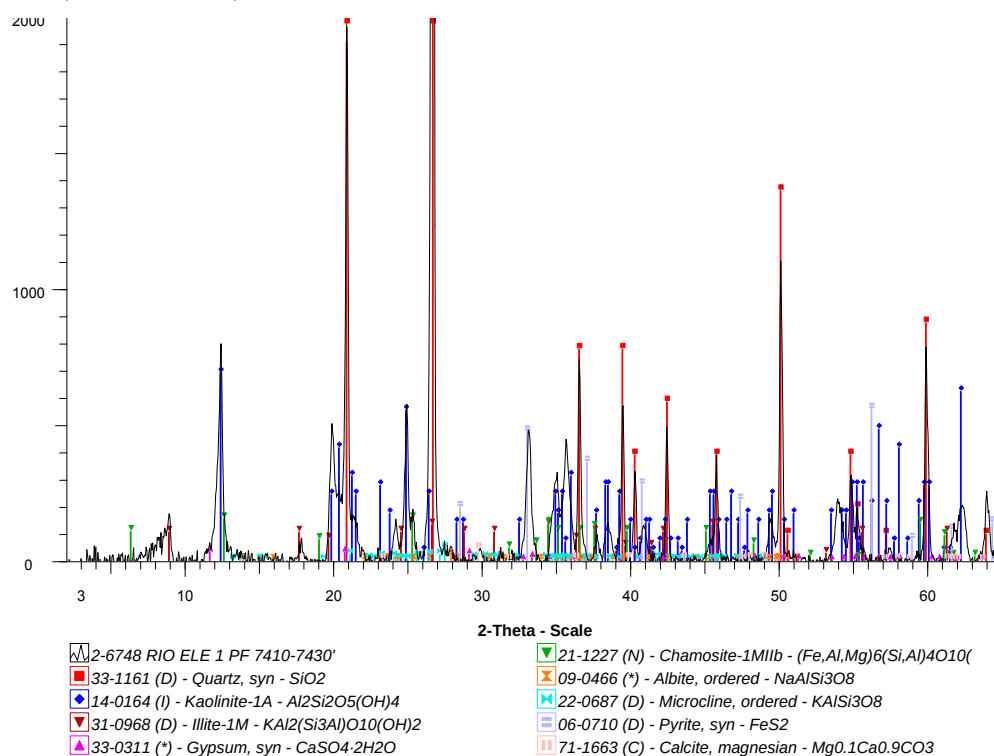
### Roca Total

Resultados Laboratorio de Rayos X, ICP

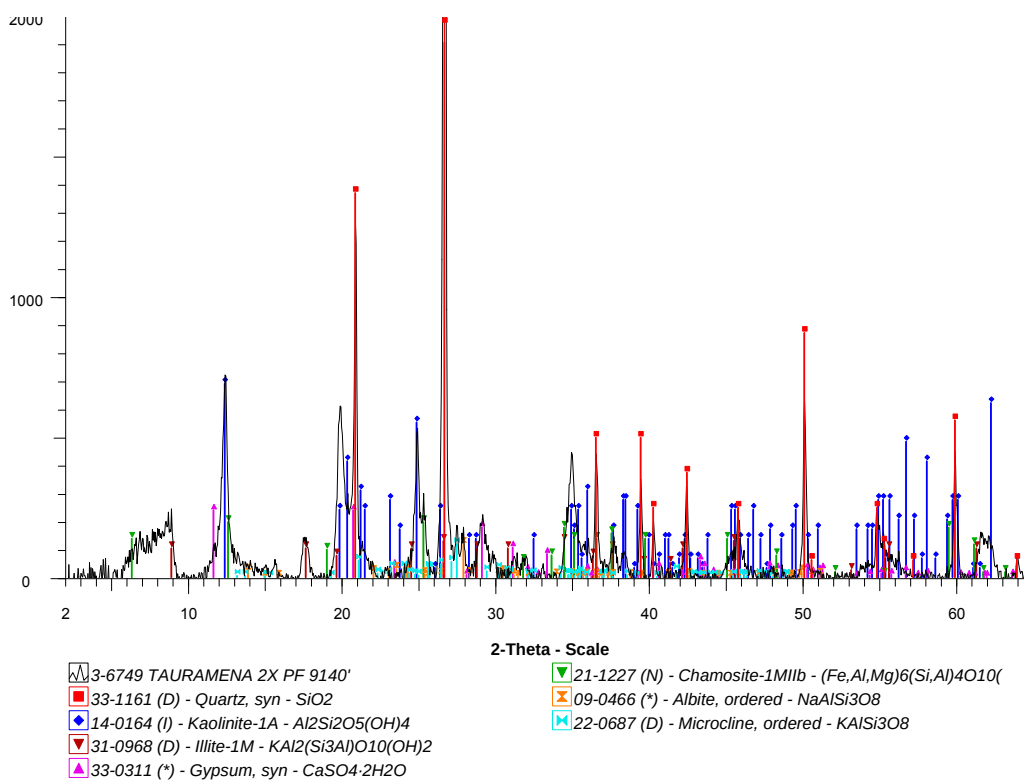
La Punta-1 (5610'-5670')



## Río Ele-1 (7410'-7430')

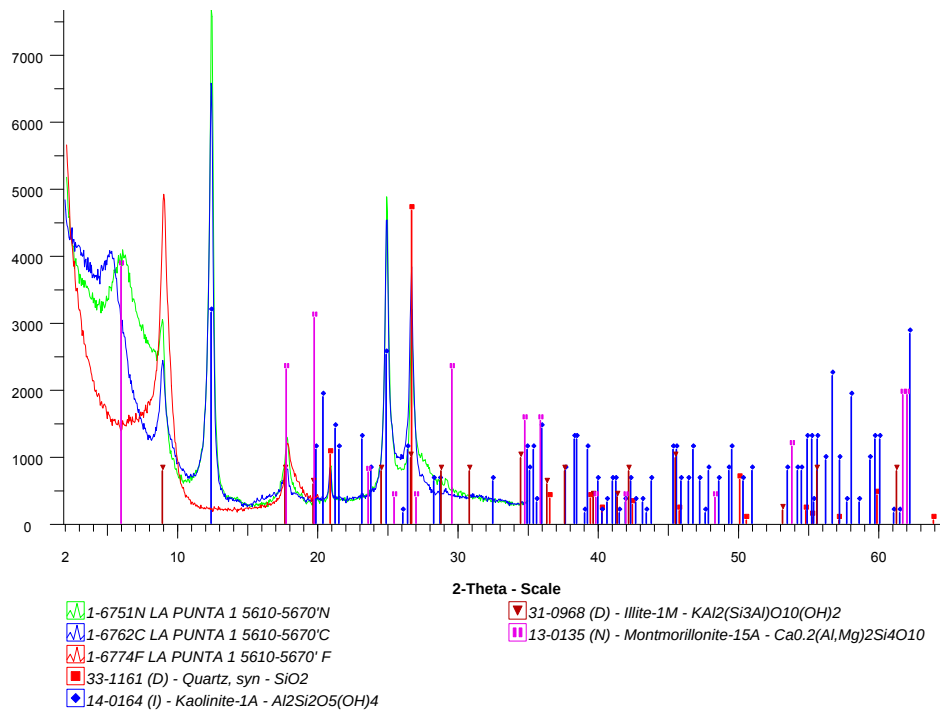


## Tauramena 2X (9140')

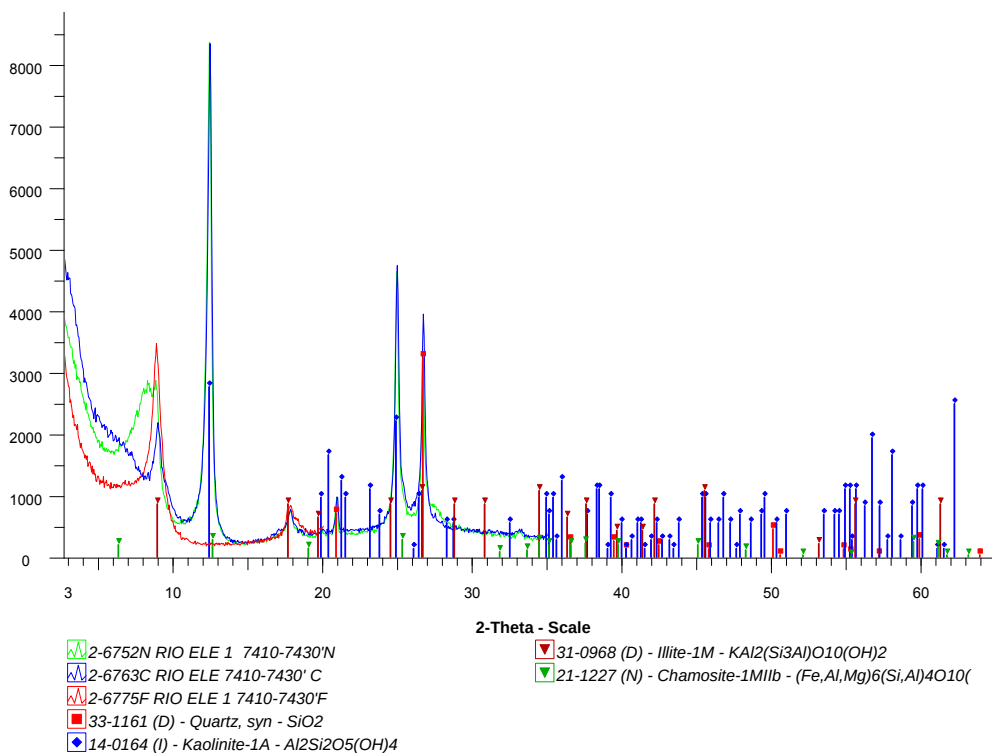


## Difractogramas Fracción Arcilla

### La Punta-1 (5610'-5670')

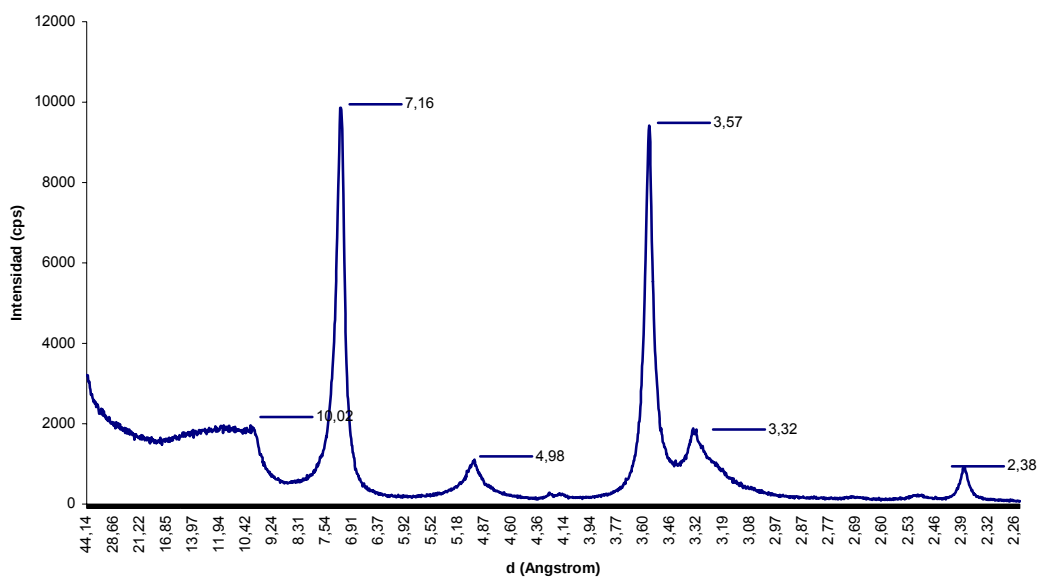
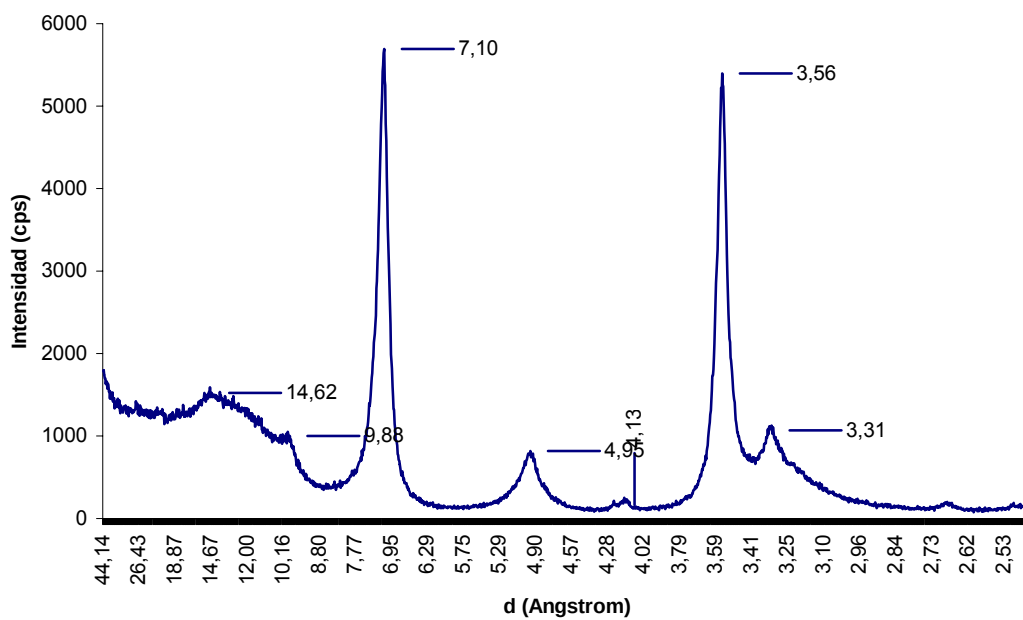


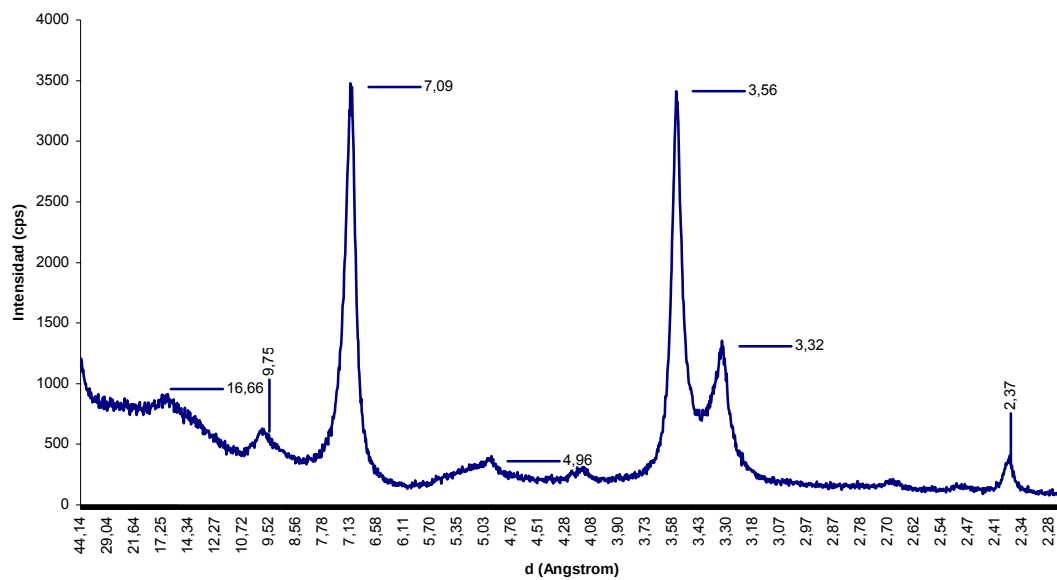
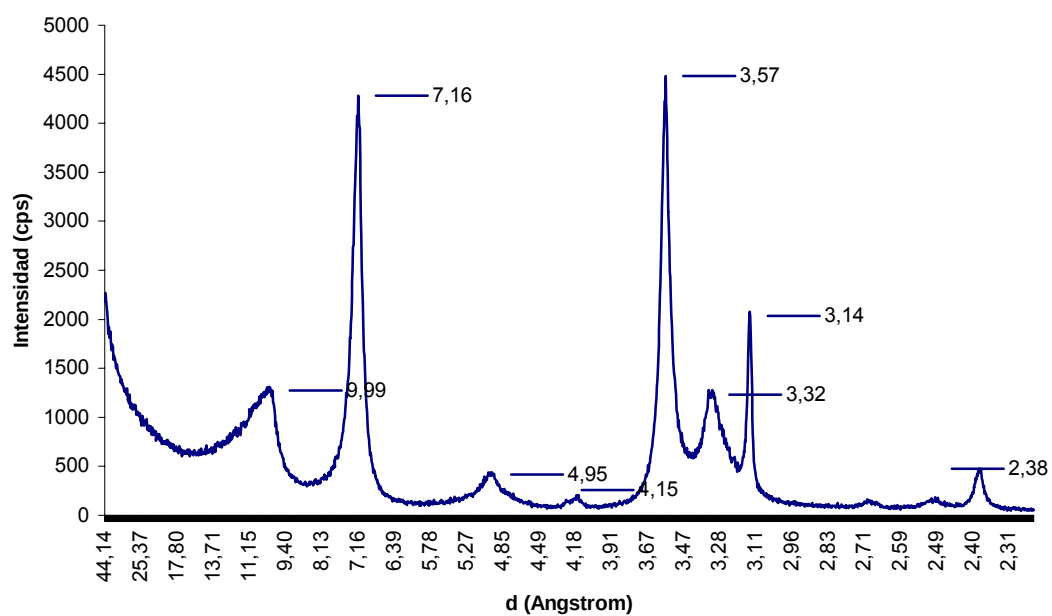
### Río Ele-1 (7410'-7430')



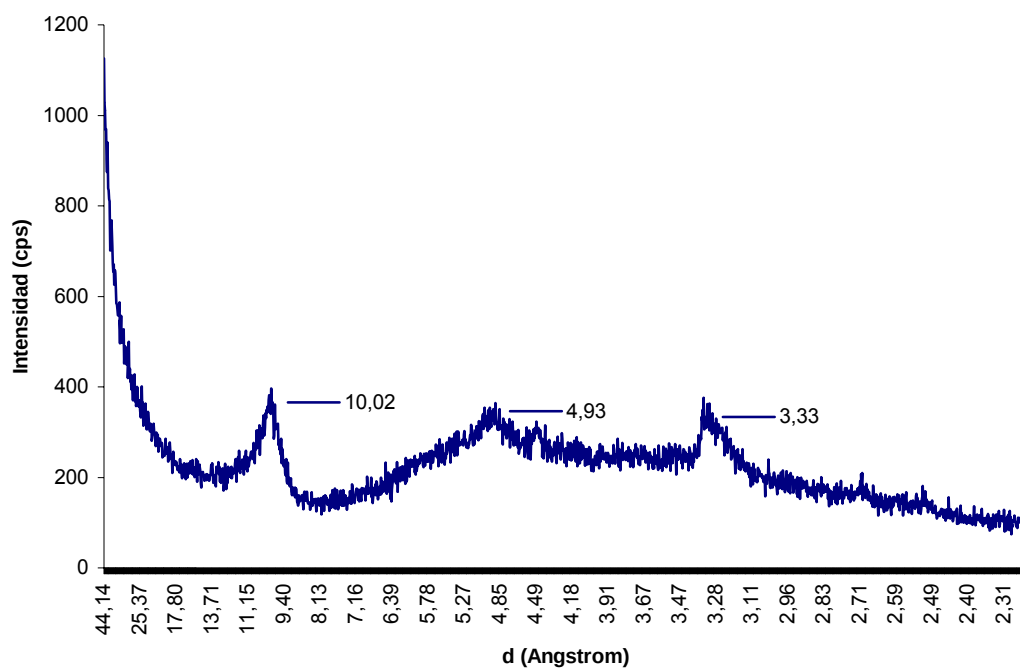
## Laboratorio de Rayos X, UIS

GALERON 1 (NORMAL)

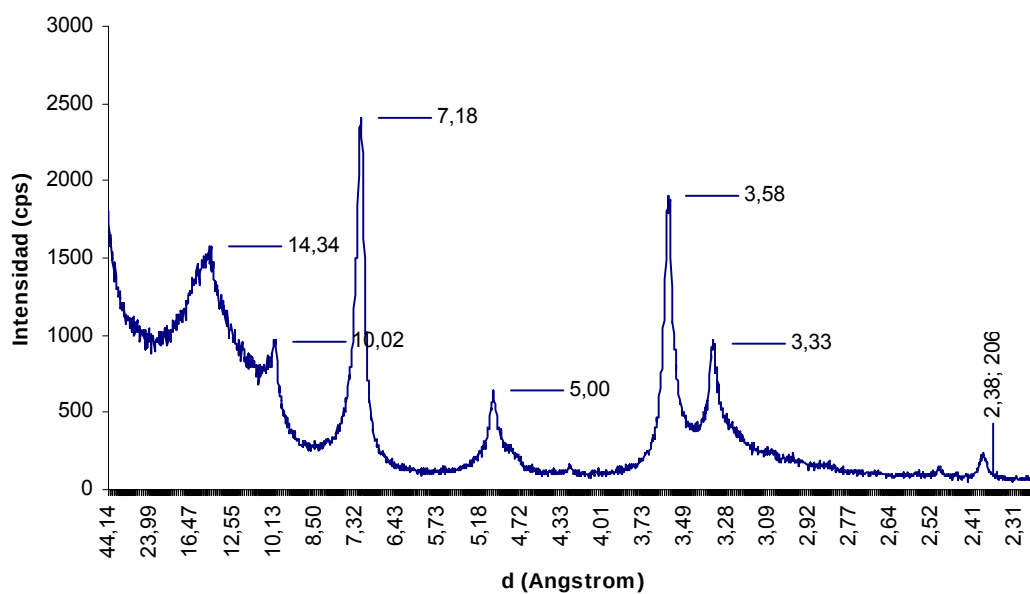
GALERON 1 (MgCl<sub>2</sub> AIRE)

**GALERON 1 (ETILEN MgCl<sub>2</sub>)****GALERON (KCl AIRE)**

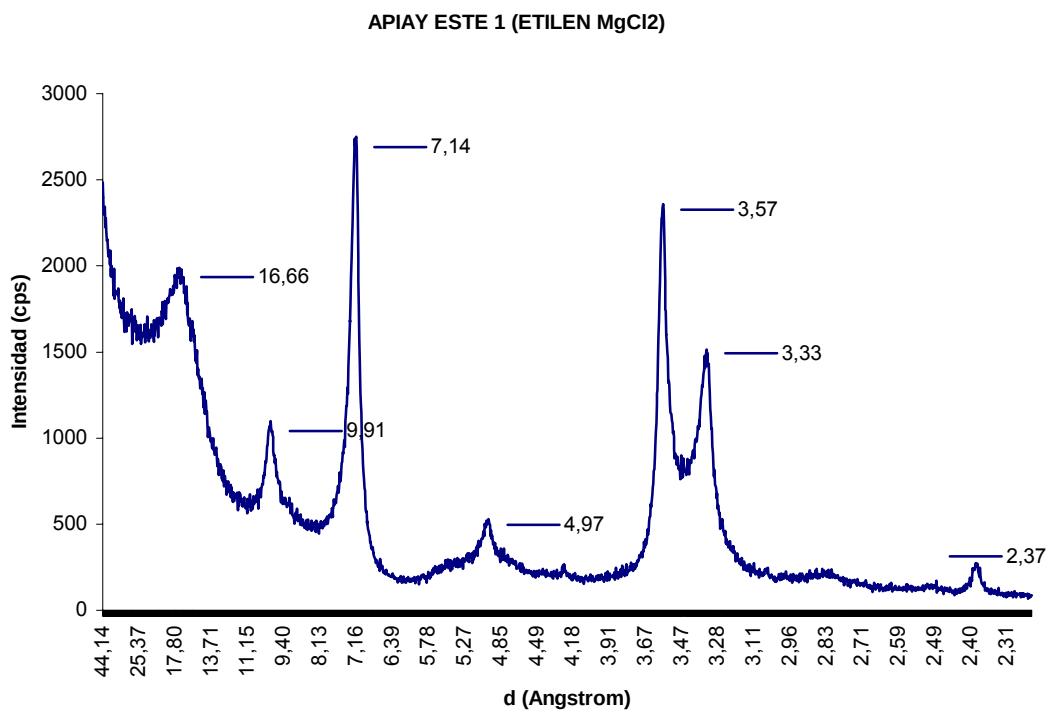
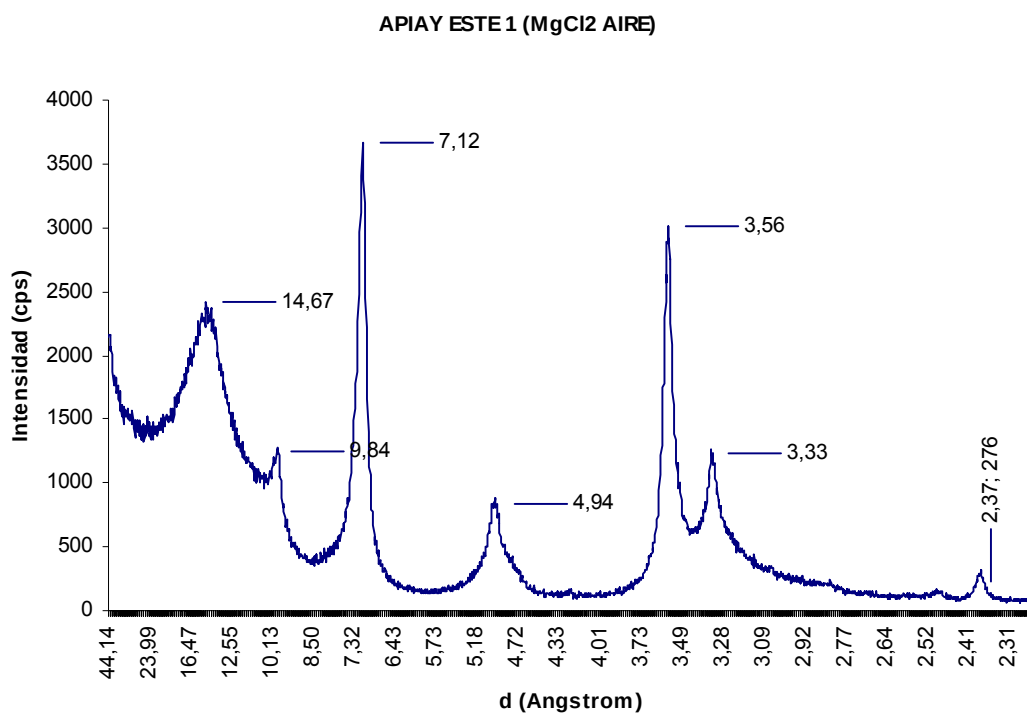
GALERON 1 (KCl 550°C)



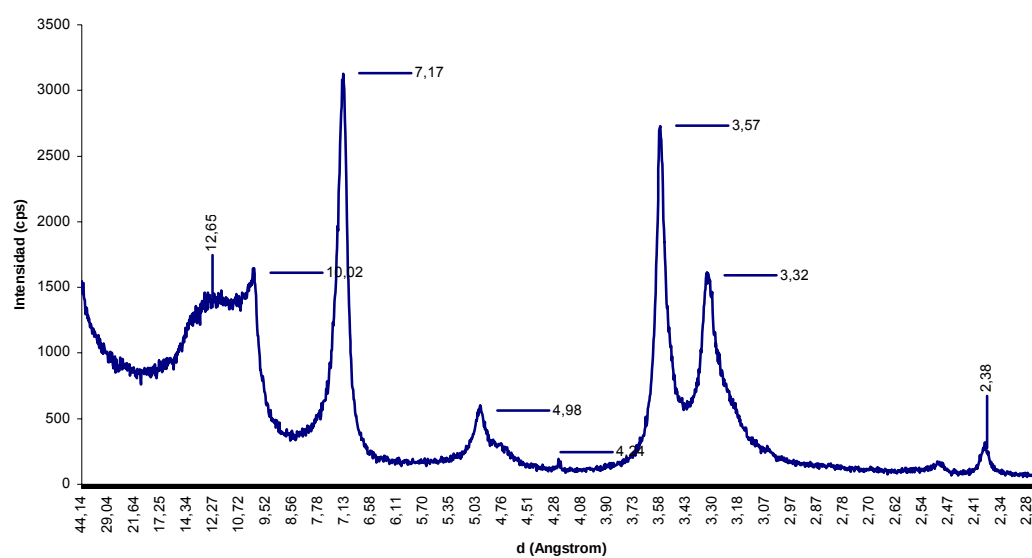
APIAY ESTE 1 (NORMAL)



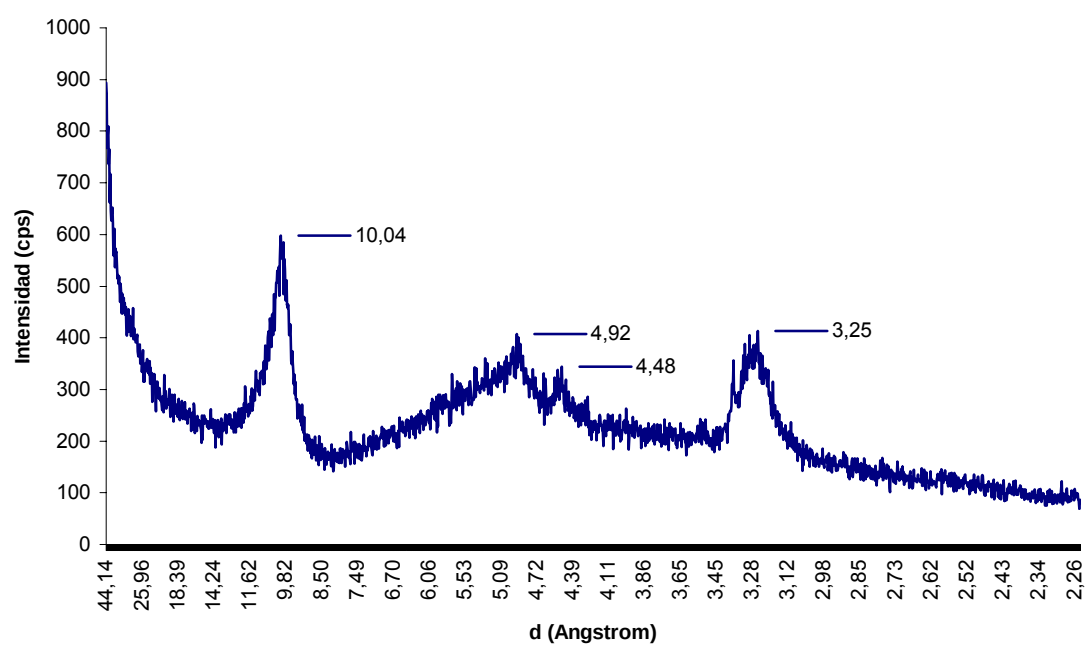




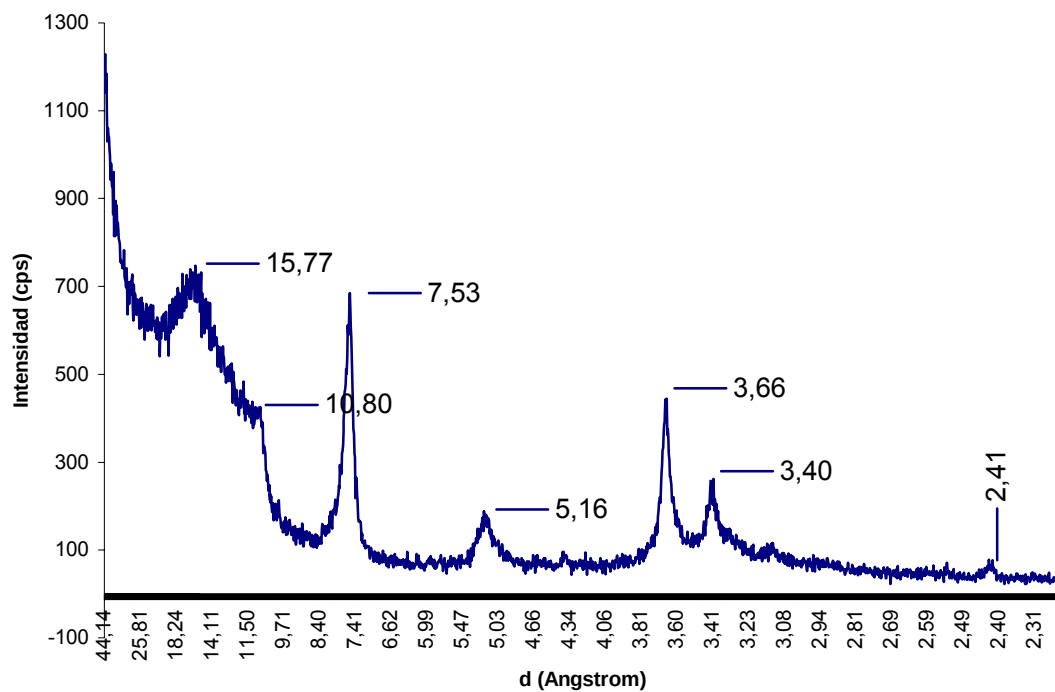
APIAY ESTE 1 (KCI AIRE)



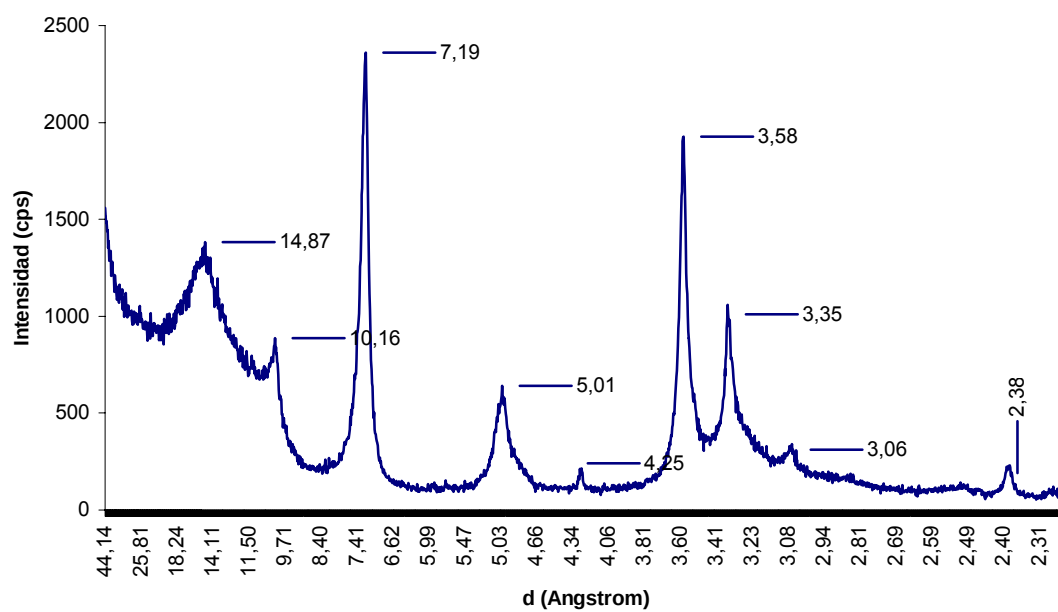
APIAY ESTE 1 (KCI 550°C)



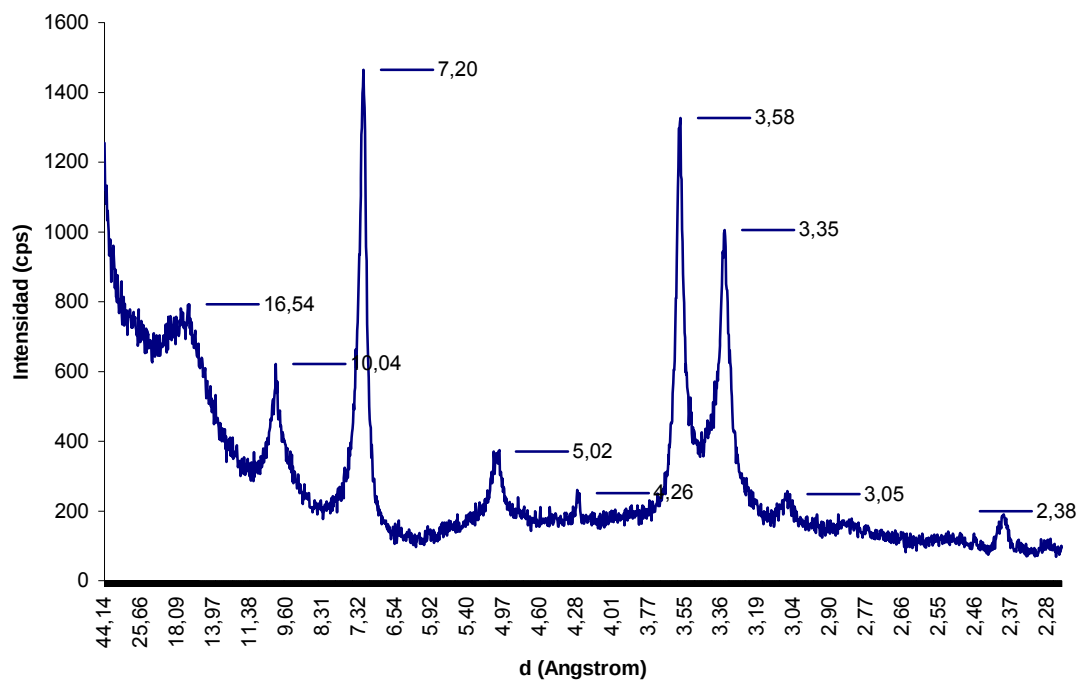
TAURAMENA 2X (NORMAL)



TAURAMENA 2X (MgCl2 AIRE)



TAURAMENA 2X (ETILEN MgCl2)



TAURAMENA 2X (KCl AIRE)

