

Estudio comparativo de la influencia de minerales arcillosos en las propiedades petrofísicas  
de rocas siliciclásticas

Fred Jesús Paba Santiago

Trabajo de Grado para optar por el título de Geólogo

Director

Carlos Alberto Ríos Reyes

Geólogo PhD

Codirectora

María del Rosario Pérez Trejos

Física

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Físicoquímicas

Escuela De Geología

Bucaramanga

2018

### **Dedicatoria**

*Agradezco y dedico enormemente al Creador.*

*A mis padres Maritza y Fred, quienes han sido la columna vertebral de este proyecto de vida que estoy por finalizar, y en todos aquellos que como persona me han permitido edificar con su educación y motivación.*

*Se la dedico a mis hermanos, grandes contribuyentes a formarme en vida y aprender y educar como mis padres lo hicieron conmigo, a mi sobrina, tíos, tías, siempre motivando y orientándome hacia el éxito.*

*Agradezco a todos mis compañeros y amigos que conocí durante esta linda carrera, los viajes, lo aprendido y las aventuras, todo hoy me lleva aquí, a tenerlos en cuenta en este reconocimiento.*

*En memoria de los seres que he perdido mientras he estado en este camino, fundamentales en su sabiduría, a mis abuelas, de las que aprendí demasiado. A los compañeros que ya no nos acompañan y que formaron parte de nuestro registro y nuestros más gratos recuerdos.*

Fred J. Paba Santiago

### **Agradecimientos**

Agradezco a los laboratorios de Rayos X, Petrofísica, Microscopía, Espectroscopía, adscritos al Laboratorio Central de la Vicerrectoría de Investigación y extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander, así como al personal encargado de la adquisición y manejo de datos.

Agradezco a mi director Carlos Alberto Ríos Reyes y a mi codirectora María del Rosario Pérez Trejos por su fundamental apoyo, orientación y gestión para construir mi proyecto de grado.

Agradezco al Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA), al Instituto Colombiano de Petróleo de ECOPETROL S.A y los Laboratorio de Investigación del Parque Tecnológico Guatiguará.

Agradezco a todos los profesionales que intervinieron en conocimientos para este trabajo: José Antonio Henao, Hernando Buendía, Angélica Carreño, Carlos Chacón, John Bonilla, Miguel Ramos (QEPD).

A mis abuelas Ana y Nidia que descansan en paz, fueron una gran sabiduría para mi camino y a mis padres, de nuevo, y familiares en Bucaramanga por su hospitalidad y apoyo.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	15
1. Justificación.....	16
2. Objetivos.....	19
2.1 Objetivo general.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3. Marco de referencia.....	20
3.1 Antecedentes.....	20
3.1.1 Estudios en Colombia.....	22
4. Marco geológico.....	25
5. Marco teórico.....	27
5.1 Mecanismos que involucran daños a la Formación.....	27
5.2 Minerales de la Arcilla.....	28
5.2.1 Morfología de los minerales de arcilla.....	32
5.3 Diagénesis.....	34
5.4 Técnicas analíticas usadas en el fenómeno.....	35
5.4.1 Parámetros de Propiedades Petrofísicas.....	36
5.4.2 Porosidad ( $\Phi$ ).....	37
5.4.3 Permeabilidad.....	41
5.4.4 Tipos de permeabilidades.....	43
5.4.5 Klinkenberg Slipfactor (b).....	45
5.4.6 Coeficiente de resistencia inercial y coeficiente de resistencia viscosa ( $\beta$ o $\alpha$ ).....	46

ESTUDIO COMPARATIVO	7
5.4.7 Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier	48
5.4.8 Espectroscopia Raman (Raman).	49
5.4.9 Difracción de rayos X.:	49
5.4.10 Microscopía electrónica de barrido (SEM).	51
6. Metodología	52
7. Resultados	57
7.1 Estereomicroscopía	58
7.2 Microscopía de luz transmitida	60
7.3 Parámetros petrofísicos obtenidos	63
7.4 Espectroscopía Infrarroja con la Transformada de Fourier (FTIR)	72
7.5 Espectroscopía Raman (Raman)	75
7.6 Difracción de Rayos X	76
7.6.1 Muestra FR-1.	78
7.6.2 Muestra G-21.	80
7.6.3 Muestra P2.	82
7.6.4 Muestra P1.	83
7.6.5 Muestra T2.	84
7.7 Cuantificación de las Fases Minerales de Difracción de Rayos X	85
7.8 Microscopía Electrónica de Barrido	87
7.8.1 Muestra FR-1	87
7.8.2 Muestra G-21.	89
7.8.3 Muestra P1	90
7.8.4 Muestra P2.	92
7.8.5 Muestra T2.	94

8. Discusiones.....	96
8.1 Calidad de las rocas para Predecir Propiedades.....	96
8.2 Influencia de la mineralogía en la relación Permeabilidad-Porosidad.....	100
8.3 Influencia de los minerales arcillosos en las Permeabilidad y Porosidad.....	101
8.4 Mecanismo de Daños a la Formación.....	108
9. Conclusiones.....	109
10. Recomendaciones.....	111
Referencias bibliográficas.....	113

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Datos de los parámetros petrofísicos los plug de las muestras. ....	64
Tabla 2. Evaluaciones cualitativas propuestas de manera independiente de la porosidad y permeabilidad y los rangos de valores de cada intervalo de calidad .....	66
Tabla 3. Clasificación de rocas que funcionan como reservorio de acuerdo a parámetros de Permeabilidad y Porosidad .....	67
Tabla 4. Adaptación de la Tabla 3 incluyendo diámetros de poro según Choquette y Pray (1970) citados por Net & Limarino (2000). ....	97

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Mapa de las cuencas de interés de donde fueron tomadas las muestras para este estudio, hacen parte de Cuenca VMM y Catatumbo que es donde afloran.....	25
Figura 2. Geometría de las formas tetraédricas y dioctaédricas que componen las estructuras de los minerales arcillosos.....	30
Figura 3. Vista en microscopio electrónico de barrido de un agregado de caolinitas en un poro.....	32
Figura 4. Morfología de pore-lining de capas mixtas intercrecidas en forma de "Cornflakes" (hojuelas de maíz.....	34
Figura 5. Ilustración tridimensional de morfología pore-bridging en un volumen de arenisca con contacto tangencial. ....	34
Figura 6. Tipos de Porosidad y sus características Figueroa (2013) .....	36
Figura 7. Esquema de un Sistema poroso .....	40
Figura 8. Flujo idealizado a través de diferentes secciones transversales que aluden situación en el espacio poral medio.....	48
Figura 9. Mapa conceptual que representa el esquema de la metodología propuesta por este trabajo y el uso de técnicas.....	56
Figura 10. Vista por estereomicroscopio de las muestras de roca.....	58
Figura 11. Microfotografías de secciones delgadas de 30 $\mu\text{m}$ .....	60
Figura 12. Diagrama ternario de clasificación composicional para las areniscas modificado de Folk (1974).....	62
Figura 13. Gráfica de los parámetros petrofísicos de permeabilidad y porosidad medidos en laboratorio ambos en escala logarítmica.....	67

Figura 14. Gráficas de relación entre la permeabilidad del aire, la de Klinkenberg respecto a la porosidad y a los coeficientes de resistencias inercial y viscoso.....	68
Figura 15. Relación entre Permeabilidad del aire y Porosidad frente a Slipfactor.....	71
Figura 16. Espectros Infrarrojos (MID-IR) con ATR de las muestras de este estudio mostrando las vibraciones entre 400-4000 $\text{cm}^{-1}$ .....	72
Figura 17. Espectros Raman de las cinco muestras de este estudio.....	75
Figura 18. Difractograma del total de roca de la muestra FR-1.....	78
Figura 19. Difractogramas de la fracción arcilla en la muestra FR-1.....	80
Figura 20. Difractograma de muestra total de G-21.....	81
Figura 21. Difractogramas de la fracción arcilla de la muestra G-21.....	81
Figura 22. Difractograma del total de roca y fracción arcilla de la roca P2.....	82
Figura 23. Difractograma de la muestra P1 del total de roca .....	83
Figura 24. Difractogramas de la fracción arcilla de la muestra P1 .....	84
Figura 25. Difractograma de la muestra T2 en el total de roca y fracción arcilla .....	85
Figura 26. Cuantificación por el procedimiento Rietveld de las cinco muestras.....	86
Figura 27. Micrografías analizadas en SEM de la muestra FR-1 .....	87
Figura 28. Micrografías de la muestra G-21 analizadas en SEM.....	88
Figura 29. Micrografías de la muestra P1 analizadas en SEM.....	91
Figura 30. Micrografía analizada en SEM de la muestra P2 .....	93
Figura 31. Micrografías de la muestra T2 analizadas en SEM .....	95
Figura 32. Porcentaje de Micas en general obtenido de la Cuantificación Rietveld de las muestras de estudio contra la Porosidad y Permeabilidad medidas en laboratorio .....	101
Figura 33. Gráficas de Permeabilidad de aire contra Porosidad, exponiendo regiones características para los minerales arcillosos .....	103

Figura 34. Micrografía en microscopio petrográfico en nicoles cruzados y micrografía analizada en SEM de la muestra FR-1.....	105
Figura 35. Esquema de las relaciones entre Permeabilidad contra Porosidad y la influencia de la morfología de los minerales arcillosos sobre ellas .....	106
Figura 36. Propuesta para modificar regiones de influencia de minerales arcillosos sobre la Permeabilidad y Porosidad de las rocas siliciclásticas .....	107

## Resumen

**TÍTULO:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LA INFLUENCIA DE MINERALES ARCILLOSOS EN LAS PROPIEDADES PETROFÍSICAS DE ROCAS SILICICLÁSTICA\*

**AUTOR:**

FRED JESÚS PABA SANTIAGO\*\*

**Palabras clave:** Minerales arcillosos, Petrofísica, Permeabilidad, Porosidad, Rocas siliciclásticas, reservorio de areniscas.

Tres formas de mecanismos de daños a la formación se presentan en las rocas siliciclásticas, de manera general involucran aspectos que tienen que ver con hinchamiento, migración-dispersión de partículas finas y cambios de fases de minerales, en especial de los filosilicatos de la fracción arcilla, denominados ‘clay minerals’ o minerales de arcilla. Este estudio se estableció mediante el uso de técnicas petrofísicas, petrográficas y químicas con el fin de determinar la influencia que tenían dichos minerales para rocas siliciclásticas en la porosidad, la permeabilidad y otras propiedades petrofísicas. Se analizaron cinco muestras de afloramiento y se les hicieron las metodologías propuestas para técnicas de DRX, SEM, FTIR Y Raman, además de petrografía básica, enfrentando la composición y morfología frente a la porosidad y permeabilidad. Se encontró que asociados a buenas porosidad-permeabilidades primaban minerales de arcilla como la Caolinita y que minerales de arcilla como la Esmectita involucran una pérdida de porosidad en presencia de agua. Se reconoció que la Illita influye en la pérdida de porosidad, pero que la permeabilidad tiene más asociación con la morfología de dichas Illitas. En adición, se identificaron zonas específicas de cualidad de la roca y de influencia de minerales de arcilla en gráficos que enfrentaron los parámetros petrofísicos propuestos.

---

\*. Trabajo de Grado

\*\*\*. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología UIS. Director: Geólogo Carlos Alberto Ríos Reyes, Codirectora: María del Rosario Pérez Trejos.

**Abstract**

**TITLE:** COMPARATIVE STUDY OF THE INFLUENCE OF CLAY MINERALS IN THE PETROPHYSICAL PROPERTIES OF SILICCLASTIC ROCKS \*

**AUTHOR:**

FRED JESÚS PABA SANTIAGO\*\*

**Keywords:** Clay minerals, Petrophysic, Permeability, Porosity, Siliciclastic rocks, sandstone reservoirs.

Three forms of mechanisms of damage to the formation appear in the siliciclastic rocks, in a general way they involve aspects that have to do with swelling, migration-dispersion of fine particles and changes of phases of minerals, especially of the phyllosilicates of the clay fraction, called clay minerals. This study was established through the use of petrophysical, petrographic and chemical techniques to determine the influence of these minerals for siliciclastic rocks in porosity, permeability and other petrophysical properties. Five outcrop samples were analyzed and the proposed methodologies for XRD, SEM, FTIR and Raman techniques were made, as well as basic petrography, facing the composition and morphology against porosity and permeability. It was found that clay minerals such as Kaolinite were associated with good porosity-permeabilities and that clay minerals such as Smectite involve a loss of porosity in the presence of water. It was recognized that the Illita influences the loss of porosity, but that the permeability has more association with the morphology of said Illites. In addition, specific areas of rock quality and influence of clay minerals were identified in graphs that confronted the proposed petrophysical parameters.

---

\*. Bachelor Thesis

\*\*\*. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología UIS. Director: Geólogo Carlos Alberto Ríos Reyes, Codirector: María del Rosario Pérez Trejos.

## Introducción

Las propiedades petrofísicas son condicionantes en rocas siliciclásticas ya que califican la calidad del reservorio. La porosidad está estrechamente relacionada con la capacidad de almacenamiento del yacimiento, mientras que la permeabilidad controla el proceso de filtración (Zhao *et al.*, 2015). tanto la porosidad como la permeabilidad son los factores clave que afectan la explotación del yacimiento (Ghanizabath *et al.*, 2015). Por lo tanto, los datos petrofísicos precisos y una comprensión precisa de los factores de control de la porosidad y la permeabilidad son cruciales para la explotación exitosa de yacimientos de petróleo. Diferentes técnicas analíticas (CT, microCT, SEM, QEMSCAN, FIB-SEM, RMN o MIP) se han utilizado ampliamente en la caracterización de propiedades petrofísicas de reservorios. El propósito de este trabajo es a través de técnicas analíticas evaluar la influencia de minerales arcillosos en rocas siliciclásticas, así como la cantidad, patrón de distribución y morfología de minerales arcillosos y sus efectos significantes sobre las propiedades de rocas siliciclásticas como las areniscas en términos de porosidad, permeabilidad, densidad, radiactividad natural, contenido de agua en campos petroleros y reactivación de diversas prácticas de recuperación de hidrocarburos (Worden & Morad, 2003) en adición, el Cuarzo secundario también puede impactar como lo hacen las arcillas. El mismo autor señala que era erróneo pensar como se hacía anteriormente, que los minerales de arcilla eran detritos en el origen, siendo sindepositados con la arena primaria encajante; no obstante, las leyes de la hidrodinámica tienden a causar separación de las fracciones de arcilla y arena, implicando que los procesos post-depositacionales deben ser principales responsables de la incorporación de

la mayoría de estos minerales en las areniscas (Worden & Morad, 2003). Desde este punto, el trabajo se centraría a un análisis que se enfoque hacia estos primeros procesos, pero la principal intención de esta investigación, basado en los conceptos anteriores es definir la situación de los minerales arcillosos aplicando una metodología para entender el comportamiento de los yacimientos. Es importante aclarar que este trabajo no solo se definió para formaciones reservorio sino, involucra un análisis de una gran variedad de muestras desde rocas siliciclásticas tipo areniscas muy porosas o muy apretadas. En adición, las muestras de rocas areniscas son de afloramientos de Formaciones geológicas como Formación Tibet, Formación Tibasoza, Formación Picacho, Formación Los Santos.

## **1. Justificación**

Los espacios porales de las rocas siliciclásticas en especial de las areniscas son vitales en el proceso de acumulación de crudo, gas, agua y otros fluidos hidrogeológicos. Sin embargo, estos procesos permiten que estos espacios sean rellenos por minerales arcillosos producto del transporte o de alteración de otros minerales (Flórez y López, 2006) y formados en la diagénesis. Lo anterior ha sido un problema para la industria, ya que genera que realicen metodologías de mejoramiento de los yacimientos a través de inyección de gas, agua y compuestos químicos u otros métodos, con el fin de aprovechamiento al máximo que permita la extracción de crudo pesado. Incluso en exploración, es importante el papel de la diagénesis calidad de la formación, que pueden limitar propiedades petrofísicas. De manera general, el problema de las arcillas es muy diverso y

negativos para la industria de hidrocarburos (Lai & Krevor, 2014), pues estas hacen parte del espacio que dejan las areniscas, y que algunas cuando entran en procesos de mojabilidad se hinchan, -aunque pueden mantener sus propiedades laminares-, lo que provoca que jueguen un papel negativo de acuerdo a la relación arena-arcilla existente y el comportamiento de las primeras (Salgado y González, 2005).

Este trabajo tiene el propósito de determinar a nivel geológico, como las arcillas y Cuarzo secundario influyen dentro de los espacios porales de muestras de rocas tomadas de afloramientos de diversas formaciones siliciclásticas tipo arenisca, aplicando una metodología que integre herramientas que permitirán entre otras funciones que más adelante serán descritas, el poder reconocer el tipo de mineral arcilloso y las propiedades petrofísicas de las areniscas, relación arena-arcilla (poro-arcilla) y pérdidas de porosidad y permeabilidad.

A partir de la composición mineralógica de rocas siliciclástica, sistema poroso y propiedades petrofísicas, diversos estudios han planteado el gran problema que son las arcillas en especial cuando se habla de daños a las formaciones generadoras, ya que estas están dentro de todos los procesos desde la diagénesis, hasta fenómenos de migración de fluidos posteriores a esta. Las areniscas, como principales formaciones generadas, son rocas sedimentarias de tipo clástico, es decir, agregados de partículas fragmentadas constituidos principalmente por granos de Cuarzo cementados por material silíceo, arcilloso, calizo u otros (Bidner, 2001). Como el agregado y la cementación de estos no son uniformes por todo el volumen de roca, hay espacios entre los contactos de los granos y donde no hay cementación, estos son conocidos como los poros, y determinan la porosidad, así como otras propiedades petrofísicas que finalmente hacen referencia a la ocupación de ese espacio con agua e hidrocarburos. La determinación de la porosidad y de la permeabilidad no solo tiene que ver con solo la cantidad de poros, los minerales de arcilla también

por diagénesis, procesos autigénicos o migración de fluidos puede ayudar a reducir aún más el espacio poral, su capacidad de caudal y también, pueden afectar incluso en inyecciones de recobro, cuando estas no tienen en cuenta el tipo de mineral de arcilla. De acuerdo a lo anterior el planteamiento de preguntas problemas: A partir de esas características de composición de material silíceo, arcilloso, calizo, entre otros y los espacios porales y propiedades petrofísicas ¿Qué papel cumplen los minerales arcillosos en las propiedades petrofísicas (porosidad y permeabilidad) de las rocas siliciclásticas?

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Determinar el papel que cumplen los minerales arcillosos y Cuarzo secundario en la porosidad de rocas siliciclásticas con el fin de establecer su impacto en daños a la formación y reducción de calidad de las propiedades petrofísicas.

### 2.2 Objetivos específicos

- Identificar, caracterizar y seleccionar muestras de afloramiento de rocas siliciclásticas de tipo areniscas.
- Realizar una revisión del estado del arte sobre técnicas analíticas y ensayos de laboratorio con el propósito de evaluarla influencia de la mineralogía de arcillas en rocas siliciclástica y sus propiedades petrofísicas.
- Realizar pruebas a partir de técnicas de análisis como: propiedades petrográficas, FTIR, FTRS, y DRX, con escáner de Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), estableciendo una metodología que cualifique la porosidad-permeabilidad de las muestras de rocas siliciclásticas

### 3. Marco de referencia

#### 3.1 Antecedentes

A nivel mundial el estudio de los yacimientos se ha orientado cada vez más a la determinación geológica de dichos yacimientos, lo que ha permitido que las ciencias de la Tierra hayan avanzado tanto en su desarrollo como ciencia, pues, la gran diversidad de sustancias del planeta ha dado cierto grado de dificultad al análisis de la composición y estructura de estas, cuando se presentan como minerales en la naturaleza. Los minerales de arcilla, la sílice y otros compuestos que sirven de cementantes en las rocas sedimentarias, han adquirido cierta importancia pues no son solo procesos de formación de las rocas, sino que ocurren incluso, posteriores a ellas, y es por eso que en Geología del Petróleo, el análisis de estas ha tomado una vital importancia, sin embargo, la naturaleza y pequeñez de estas estructuras influyó a que herramientas como la difracción de Rayos X y espectrometría de Rayos Infrarrojos, así como el barrido por microscopio electrónico lograran llegar a escalas tan pequeñas pero tan influyentes en la determinación de características como la calidad de reservorios.

Uno de los trabajos pioneros sobre daños a la Formación provocados por minerales arcilloso en areniscas fue el de Gray & Rex en 1966, quienes estudiaron mediante barrido por microscopio electrónico a areniscas no esmectíticas y la pérdida de permeabilidad asociada con la migración y características de pozos sellados de illita euahedral y partículas de caolinita siguiente el movimiento del agua dentro de la formación (citados en Wilson *et al.*, 2014). En el mundo se han realizado cuantiosos estudios de determinación y caracterización de minerales, composiciones y sustancias

polimórficas a base no solo de SEM sino de otras herramientas como DRX y FTIR, en especial, muchos estudios como los de Lazarev (1972) y Farmer (1974) estudiaron la Caolinita con Espectroscopía Infrarroja (FTIR), mientras que aplicando Raman han sido autores como Wiewiora *et al.* (1979) y Frost en 1993 (citados en Frost (1997)).

El estudio de los minerales arcillosos como caolinita, Esmectita, Illita, Clorita, entre otros fue realizado ampliamente por Margaret Foster en 1954 determinando factores de composición e hinchamientos de los minerales arcillosos (Foster, 1945). La importancia de estos minerales radica en que son omnipresentes en las rocas de explotación de petróleo y gas (Jiang, 2012). Resalta el mismo autor que en los años 40s que fue la etapa temprana de la exploración de petróleo, los minerales de arcilla fueron estudiados para predecir la cualidad de apilamiento orgánico de la roca fuente y mecanismos de generación cuando científicos trataron de investigar el origen del aceite y el gas de acuerdo a Grim, (1947) y Brooks, (1952) (citados en Jiang, 2012). Ahora bien, el análisis de minerales arcillosos fue usado también como una herramienta en términos de identificación zonal para encontrar intervalos objetivos de exploración, los cuales lo que predijeron fue preliminar y generalmente resumidos por Weaver en 1960. Para los años 70s, los minerales arcillosos empezaron a ser ampliamente estudiados para predicción de la calidad de reservorio y diagénesis debido a la aplicación de análisis petrológico y análisis mineralógico cuantitativo por difracción de rayos x (Griffin, 1971; Pettijohn, 1975; Heald & Larese, 1974; Bloch *et al.*, 2002 citados en Jiang, 2012).

En cuanto al avance de las propiedades petrofísicas, de manera estandarizadas, fueron las herramientas de laboratorios que primero se realizaron, antes de los años 60s, Recommended Practice for Determining Permeability of Porous Media del año 1952 y 1956, y Recommended Practice for Core Analysis Procedure de 1960 (API RP 27) formaron las bases para convertir al

análisis petrofísico y sus propiedades en el desarrollado actual de diferentes principios hidrodinámicos a las rocas en la Norma API RP 40 de 1998 (American Petroleum Institute, 1998)

**3.1.1 Estudios en Colombia.** En Colombia son diversos los estudios enfocados a los campos y la reconstrucción de la historia diagenética y otras aplicaciones que tiene mucho que ver con la influencia de los minerales arcillosos en dichos procesos e incluso en procesos pos-diagenéticos. Resaltando el trabajo de grado de Hernández (2012) quien analizó las propiedades petrofísicas de rocas por medio de registros eléctricos, descripción de corazones y resultados de laboratorio básicos para el Campo Escuela Colorado, sin embargo, no usó una investigación más a fondo de la petrografía y registros eléctricos con el uso de las herramientas espectroscópicas y del SEM.

El VMM es uno de las cuencas más estudiadas en Colombia, sin embargo, todavía con algo grado de incertidumbre exploratorio; el trabajo de grado de Duarte y Ortiz (2011) expone historia diagenética de las areniscas de la Formación Lisama de esta cuenca, sin embargo, dentro de sus herramientas usan petrofísica básica para determinar aumentos de porosidad e historia de diagénesis para determinar cementación, compactación y disolución en las que influyeron en gran proporción minerales arcillosos, aunque este estudio tampoco realiza un análisis usando herramientas de espectrometría, difracción y SEM. La importancia de estos dos estudios anteriores, es su interés por caracterizar niveles de areniscas o exploratorios midiendo la influencia de minerales arcillosos en los procesos diagenéticos y posteriores en el VMM.

Estudios más enfocados han sido realizados también como trabajos de maestrías, Naranjo (2010) realizó un análisis en factibilidad de la inyección de agua en areniscas de la formación Mugrosa del Campo Lisama, en donde usó herramientas de DRX para el reconocimiento de la composición mineralógica con el fin de realizar una inyección de agua dentro de dicho campo

cuyo propósito fue aumentar el recobro o recuperación del campo. Por ejemplo, sostiene que LISA0146 de Campo Lisama tiene presencia de minerales arcillosos entre el 7 y 27% en peso y que el Cuarzo supera el 70% en todas las muestras, que hay caolinita en mayor proporción dentro de la fracción menor y minerales micáceos tipo illita (también mineral arcilloso) predominando en el nivel estudiado, además de interstratificación illita/esmectita, cloritas y esmectitas en casos puntuales (Naranjo,2010).

Amorocho y Badillo (2012) realizaron un estudio sobre la influencia de la composición mineral de rocas arcillosas en la estabilidad de pozos petroleros; indican que durante la operación de perforación de un pozo, los costos pueden aumentar entre el 10 y 15% del presupuesto inicial, si la composición de las formaciones perforadas es arcillosa y destacan que los principales efectos químicos que están involucrados en la interacción fluido de perforación-formación arcillosa son la ósmosis química, y esfuerzos de hidratación, además de efectos capilares, deshidratación, desbalance de presiones e intercambio catiónico, por lo que en otra cuenca petrolera de Colombia, el Piedemonte Llanero, esto es un costo elevado para las compañías, y usaron herramientas como Metil Blue Testing (MBT) y DRX para caracterizar minerales arcillosos y bajo contenido de minerales a sufrir hinchamiento, por ejemplo, identifican Caolinita, un mineral arcillosos que no se hincha pero que provoca derrumbes de las paredes del pozo. Determinó este trabajo la presencia de caolinita, montmorillonita e illita, en la Formación León, en pozos como el Apiay Este-1 y Camoa-1, definiendo que el comportamiento esperado en las formaciones lodosas durante la perforación es un hinchamiento del pozo, este comportamiento dado por el MBT de 17meq/100 gr en esta Formación.

Uno de los estudios anteriores más antiguos en Colombia usando Espectroscopía Infrarrojo en arcillas fueron Bravo *et al.* (1980), quien analizaron muestras del yacimiento Mondoñedo en

Cundinamarca, indicando que la IR es muy buena cuando se combina con DRX y otras técnicas similares, en especial si un filosilicato es de composición dioctaédrica o trioctaédrica, sustituciones isomorfas, hidratación de minerales y la interacción de las arcillas con compuestos orgánicos e inorgánicos y un análisis cuantitativo, -note que estos autores de los 80s referían a arcillas, asociándolos más a los tamaños. Estos autores Definieron intervalos de estudio de las longitudes de onda de 3200 a 3700  $\text{cm}^{-1}$  para vibración de enlaces OH y zonas de vibraciones de red de 1100 a 400  $\text{cm}^{-1}$ , que podrían ser utilizadas en otras técnicas más profundas como la espectrometría Raman (ER).

Aunque Gaviria *et al.* (2012) realizó en Colombia un estudio completo de minerales arcillosos marcadores en procesos termodinámicos en niveles lodolíticos del Cretácico inferior en la Cuenca Cordillera Oriental de Colombia, en dicho estudio integró herramientas como DRX, FTIR, análisis textural y Fluorescencia de Rayos X, obteniendo que los cambios mineralógicos reflejan aumentos anómalos en presión y/o temperatura progresivamente más intensos hacia la parte inferior de la secuencia sedimentaria, incremento en el grado de la secuencia sedimentaria para la serie caolinita-dickita-pirofilita, aparición de estructuras interestratificadas tipo illita-esmectita con bajo de ordenamiento (Reichweita), clorita-esmectita (corrensita), vermiculita-clorita y un aumento de porcentaje illítico en los interestratificados illito-esmectita, es decir, condiciones que indican alta temperatura reflejando una diagénesis profunda.



realizados serán tomados con este mismo propósito, sin embargo, se ha querido dar un poco de información de la Formación sea o no generadora, de la cual se tomaron las muestras.

Entre las formaciones que se tomaron fue la Formación Tibet (Dt) creado por Cediél en 1969 (citado en Mojica y Villaroel, 1984) categorizado como Miembro, en el Macizo de Floresta, y para 1984 es elevada a la categoría de Formación en el mismo macizo por Mojica y Villaroel (1984), tanto estos últimos autores como Cediél fueron citados por Geoestudios (2006) y quienes, además, citan a Ingeominas estableciendo que es una formación con areniscas Cuarzosas y feldespáticas, conglomerados intercalados en poco frecuentes capas de limolita. La Formación Tibazosa es la base del Cretácico en Soapaga según el mismo autor anterior, se designan cuatro miembros, uno basal que es conglomerática, areniscas y limolitas, otro miembro calcáreo, calizas arenosas y areniscas, otro miembro arenáceo intermedio constituido por shales y un miembro superior calcáreo con shales, calizas lumaquéllicas y areniscas. La Formación Arcabuco (Jar) se compone de bancos gruesos de arenisca Cuarzosa, de tamaño de grano fino a medio, a veces conglomerática, de colores claros, ocasional rojizos y con algunas capas de lodolitas (Etayo *et al.*, 1983 citado en Espinel y Hurtado, 2010). La Formación Los Santos tiene su parte más representativa en la Mesa de los Santos al costado occidental de la Cordillera Central, entre el piedemonte llanero y el Valle Medio del Magdalena, son rocas sedimentarias de edad cretácica (Díaz *et al.*, 2009). La Formación Picacho (Pgp) fue nombrada por Alvarado & Sarmiento citados por la Agencia Nacional de Hidrocarburos en su informe de productividad (ANH, 2008b) el cual es un conjunto potente de areniscas del Eoceno Medio (Tp) que descansa sobre la Formación Socha Superior o también llamada Formación Areniscas de Socha, y establece su localidad tipo en el cerro Picacho ( 1 milla al noreste de Paz de Río), sus rocas son areniscas de grano medio a grueso, friables, lentes de conglomerado Cuarzosos y friables. El Pozo Corrales-1 plantea el inicio del intervalo de

interpretación desde Picacho desde 2100 pies a 2138, en un análisis que se extiende hasta 4040 pies y según este documento el potencial de generación de hidrocarburos la cataloga como servorio su porosidad promedio a partir de registros eléctricos oscila entre 16% y 4% (ANH, 2008).

En general, dos bloques o cuencas petroleras de Colombia e incluso de interés hidrogeológico están representadas en las muestras: El Valle Medio del Magdalena (VMM), y la Cordillera Oriental, aunque en este caso, la Formación reservorio aflora en el Catatumbo donde se tomó la muestra. La Cuenca VMM geomorfológicamente está localizada a lo largo del valle cursado por el río del mismo nombre éntrelas cordilleras Oriental y Central, comprende parte de Boyacá, Santander, Cundinamarca y Antioquia (ANH, 2008b).

## **5. Marco teórico**

### **5.1 Mecanismos que involucran daños a la Formación**

Se cree que diversos procesos que involucran a minerales arcillosos son los responsables de daños a la formación en areniscas (Wilson *et al.*, 2014). En general, se ha presentado fenómenos como, por ejemplo, hinchamiento de arcillas esmectítas, dispersión y migración de una variedad de minerales arcillosos como la illita y la caolinita, aunque incluso reportes de este fenómeno han sido dados a la esmectíta. Otro fenómeno es la transformación a partir de minerales de arcilla hacia otras fases minerales (Wilson, 2014; Flórez y López, 2006). Estos daños a la formación por minerales arcillas son también conocidos como daños a la formación “por finos” (Ramírez, 2010).

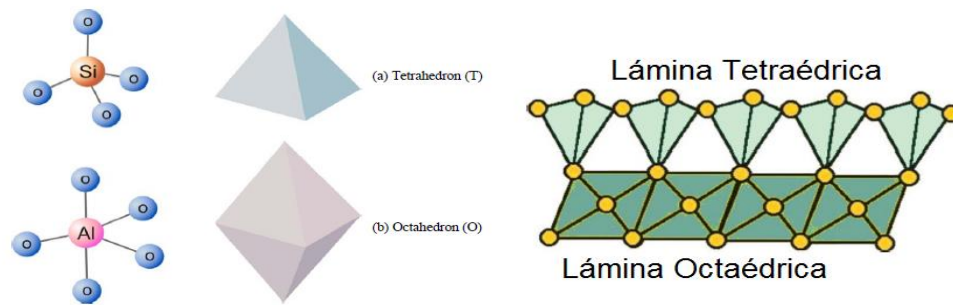
El daño a la formación es un problema significativo en cuanto sube el costo de la extracción de crudo, siendo más importante que nunca para la productividad máxima tanto en pozos convencionales como en operaciones de recuperación y mejoramiento (Krueger, 1986 citado en Wilson *et al.*, 2014). El principal problema para generar daños a la formación son las partículas finas, que usualmente, relata Wilson *et al.*, basado en Krueger, son los minerales de arcilla y sus reacciones con respecto a fluidos involucrados en las rocas, como se decía ya por Flórez y López (2006) y Salgado y González, (2005). Por esta razón, es necesario hacer un estudio importante en las propiedades fisicoquímicas de los minerales arcillosos y su gran variabilidad, el análisis de atributos como tamaño de partícula, morfología, características de hinchamiento, hidratación, intercambio catiónico, dispersión, agregación, dados para cada formación tanto por fluidos transportados, procesos nativos e incluso durante operación de exploración y explotación (Wilson, *et al.*, 2014) son algunos de los referentes importantes en cuanto al estudio de la influencia de la mineralogía de arcillas en rocas siliciclásticas.

## **5.2 Minerales de la Arcilla**

Minerales de arcilla, minerales arcillosos o minerales de la arcilla es un concepto que hace referencia a diversos grupos de minerales miembros de hidratos de aluminio-silicatos, mientras que en terminología la palabra ‘arcilla’ es estrictamente un término de tamaño de grano referente a diámetros de menos de 3.9  $\mu\text{m}$ , de acuerdo a Wentworth (citado en Worden & Morad, 2003) pertenecientes a los filosilicatos. Desafortunadamente, en petrología sedimentaria, sostienen los mismos autores, el termino arcilla es frecuentemente usado como sinónimo de mineral arcilloso.

La ocurrencia de los minerales arcilla está relacionada con dos fenómenos en la naturaleza, las arcillas dendríticas las cuales pueden proceder de otras rocas que las contengan o pueden ser formadas en el mismo lugar donde se encuentran a las que se les da el nombre de neoformadas. Las arcillas pertenecen a una división de un amplio tipo de minerales denominados silicatos – como se dijo en el párrafo anterior-, las cuales tienen como estructura esencial un tetraedro de silicio en donde este último se encuentra coordinado con cuatro oxígenos. Dichos silicatos se van a dividir de acuerdo a la posición que obtengan los tetraedros y el número de tetraedros que estén unidos entre sí dentro de una red cristalina. Por ejemplo, cuando los tetraedros están unidos formando láminas a lo largo de la red cristalina, se clasifican como filosilicatos y es dentro de este grupo que se encuentran los minerales de arcilla (Domínguez & Schifter, 1992 citados en Ramírez, 2010).

Los minerales de arcilla se forman cuando una o dos láminas de tetraedros se vinculan con una lámina de octaedros (Figura 2). Dichos octaedros están formados generalmente por un catión de magnesio o aluminio, los cuales están coordinados con seis átomos de oxígeno. Algunos de los vértices del plano inferior de los octaedros no tienen abajo ningún silicio tetraédrico lo que provoca que haya cargas desbalanceadas, para compensar la carga, el oxígeno se une al hidrogeno formando grupos hidroxilo (-OH).



*Figura 2.* (Izquierda): Geometría de las formas tetraédricas y dioctaédricas que componen las estructuras de los minerales arcillosos. Derecha: Estructura tipo 1:1 de capas de la caolinita ilustrando la conexión entre las láminas tetraédricas y octaédricas (Thair & Sarapää, 2008).

Para el estudio de sedimentos acumulados en cuencas, la caracterización de minerales arcillosos constituye un aporte crucial en el entendimiento de los ambientes de sedimentación y de las transformaciones que ocurrieron durante el enterramiento de los minerales (Gaviria *et al.*, 2012). Además, estos minerales arcillosos sufren modificaciones en su estructura por aumento de la presión-temperatura, lo que origina minerales más complejos, generando más de un tipo de estructura básica. Esto último puede producir interstratificación con espaciado basal de tipo Illito-esmectita, clorito-esmectita (Thorez, 1976; Moore & Reynolds, 1997). Ahora, en procesos de hidrodinamismo o en diagénesis, el caso de las esmectitas neoformadas en la cuenca o transportadas desde la fuente, sufren transformaciones con el resultado de pérdida de cationes interlaminares hidratados, que son reemplazados por potasio (illita) o  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  (clorita), procedentes de las soluciones acuosas (Meunier, 2005; Bgrigatti *et al.*, 2006 citados en Gaviria *et al.*, 2012).

En ocasiones, el término ‘arcilla’ se tiene a usar erróneamente. Es importante aclarar que el término “arcilla” hace alusión a un tamaño de grano para las rocas sedimentarias, por esta razón

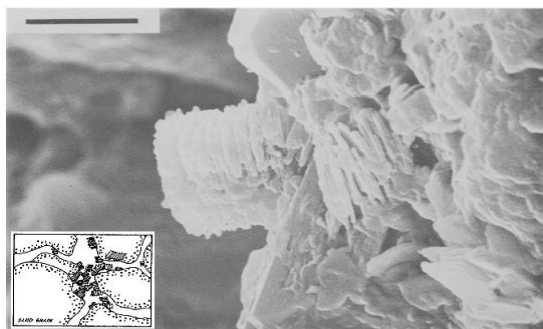
hablar de arcillas cuando se hace inferencia a filosilicatos del tamaño arcilla, es ciertamente una equivocación y, por ende, es necesario aclarar que el nombre pertinente en estos casos es mineral arcilloso, e incluso el termino en inglés ‘clay minerals’ puede permitir una interpretación como mineral de la arcilla. De acuerdo con lo anterior, los minerales arcillosos hacen parte de los minerales filosilicatos, de la fracción menor a dos micrómetros y del que se estudian con técnicas de rayos X, técnicas térmicas, Infrarrojo, Raman y por microscopia electrónica de barrido:

Anteriormente se había dicho que los minerales arcillosos sufren modificaciones en su estructura por aumento de presión-temperatura, dando origen a minerales más complejos, por ejemplo, los Illito-esmectíticos. Besoain (1987) define a mineral de arcilla como aquellos que comprenden “a los aluminosilicatos hidratados cristalinos, algunos con sustitución parcial o total del aluminio por magnesio, hierro y que incluyen como constituyentes, en ciertos casos, elementos alcalinos o alcalinoterróreos”. Se clasifican en grupos definidos según su estructura, por ejemplo, en minerales 2:1 en los que están la pirofilita, talco, esmectitas, vermiculitas y micas. Y en otro grupo, los minerales 1:1 en los que está la caolinita y la serpentina. Además, dentro de los minerales de arcilla se incluyen -según el mismo autor- los aluminosilicatos amorfos y paracristalinos, con sus representantes principales como la alófana e imogolita, aun cuando su estructura es poco definida.

En la identificación de minerales arcillosos no es tan sencilla, realmente es fácil apreciar grupos grandes de minerales de arcilla como las cándidas o más conocidas como el grupo de la Caolinita, el grupo de la Esmectita o las arcillas expandibles, el grupo de la Illita, el grupo Clorita, el Grupo vermiculita, el Grupo Paligorskyta y el Grupo de los interestratificados (Thair & Sarapää, 2008). Romero & Suarez (2018) proponen una división entre arcillas Bilaminares en donde están las Cándidas, Trilaminares donde está la Pirofilita, el Grupo Esmectita, Vermiculitas, Illita y el Grupo

de las Micas, el Grupo de las cloritas y los fibrosos como la Paligorskyta. Otra clasificación distingue solamente Minerales de arcilla trioctaédricos y dioctaédricos, la cual es una clasificación de acuerdo a los iones que entran en su estructura cristalina en la parte octaédrica (Wang *et al.*, 2015). Por ejemplo, filosilicatos Dioctaédricos tienen 2/3 de las capas ocupadas por  $Al^{3+}$  o  $Fe^{3+}$  cationes, mientras que filosilicatos Trioctaédricos tienen todos los sitios ocupados en la capa octaédrica por  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  u otros cationes divalentes, casos como la Caolinita es dioctaédrica.

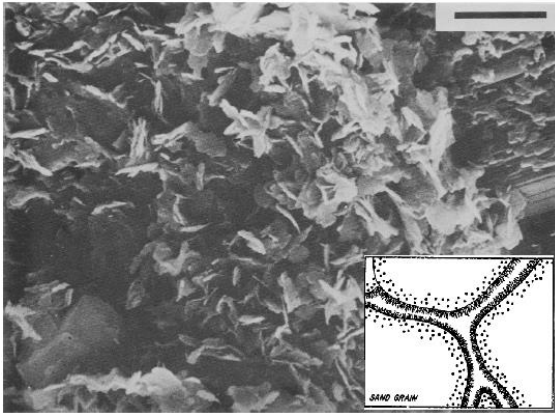
**5.2.1 Morfología de los minerales de arcilla.** Como se dijo en el párrafo anterior, aspectos como la morfología van a condicionar el poro disponible y la permeabilidad presente. Las partículas de arcilla dispersas fueron clasificadas por Neasham (1977), quien estableció tres categorías de areniscas con hidrocarburos a partir de imágenes en SEM y correlacionándolas a parámetros petrofísicos. Para este autor, las arcillas dispersas - y en esto está bien usado, porque son las partículas tamaño arcillosa las que se dispersan – se pueden presentar como partículas discretas sin Intercrecimiento, Intercrecimiento cristalino en los muros de los poros y como puentes de cristales cruzando el poro.



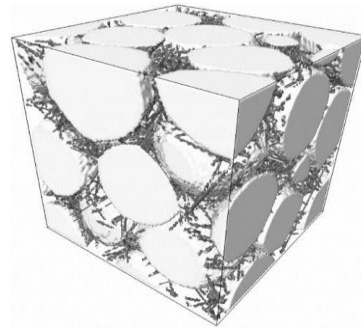
*Figura 3.* Vista en microscopio electrónico de barrido de un agregado de caolinitas en un poro. La escala es de 4 micrómetros (Morris & Shepper, 1982 y Nasheam 1977).

Morris & Shepperd (1982) a partir del autor del párrafo anterior y sus trabajos establecen resumidamente los nombres de la morfología para las arcillas o bien a definición de este trabajo de los minerales de arcilla, como: partículas discretas, arcillas pore-lining, y arcillas pore-brigging, respectivamente a la nomenclatura de Neasham. Con ello, por ejemplo, la caolinita ocurre en gran parte como agregados de partículas discretas o pore-filling (relleno de poros) que no son intercrecidas, sus cristales son pseudo-hexagonales, sub-idiomorficos no muy adheridos a los muros (Figura 3). Otro ejemplo, es la illita y las arcillas interestratificadas o mixed-layers que ocurren como pore-linig firmemente adheridos a los muros de los poros y formando un revestimiento relativamente continuo de minerales de arcilla, a diferencia de las caolinitas de partículas discretas de tamaños entre 12 a 20  $\mu\text{m}$ , las partículas de illita o arcillas mixed-layers son de 8  $\mu\text{m}$  y son frecuentemente orientados ortogonalmente respecto a los muros de los poros. Estos cristales son comúnmente intercrecidos en un arreglo tipo conflake, es decir, como las hojuelas de maíz cuando se ponen en un plato hondo (Figura 4).

Las variedades de minerales de arcilla como la illita, clorita y montmorillonita pueden tener arreglos en pore-brigging unidos a las superficies de los muros de los poros, extendidos a través de un poro o garganta poral creando el efecto de puentado en los que hay Intercrecimiento y/o entrelazamiento de cristales dentro del sistema (tamaño arcilla), formando tanto microporosidad como una ruta del caudal tortuoso de los fluidos (Figura 5).



*Figura 4.* Morfología de pore-lining de capas mixtas intercrecidas en forma de "Cornflakes" (hojuelas de maíz) (Morris & Shepperd, 1982; Nasheem 1977).



*Figura 5.* Ilustración tridimensional de morfología pore-bridging en un volumen de arenisca con contacto tangencial (Fourar *et al.*, 2002).

### 5.3 Diagénesis

La historia diagenética de una roca está influenciada por factores como: el área fuente, el ambiente de depositación, la historia de enterramiento, clima, tipos de organismos, tiempo, profundidad, presión y temperatura, propiedades del agua, procesos diagenéticos como bioturbación, bioerosión, compactación, cementación, disolución y reemplazamiento (Ramírez, 2010). La diagénesis es definida como el conjunto de procesos químicos y físicos que modifican los sedimentos en su depositación, dichos cambios se producen desde condiciones superficiales en el ambiente de acumulación hasta profundidades en las que la temperatura y la presión alcanzan aproximadamente 200° C y 1.5 kbar, respectivamente, aunque no haya un límite claro entre la diagénesis y el metamorfismo. Han sido establecidas tres etapas dentro de la diagénesis: Eogénesis (Sindiagénesis), Mesogénesis o Anagénesis y Telogénesis o Epidiagénesis (Spalleti & Poiré, 2007 como se citó en Ramírez, 2010).

Los cambios mineralógicos en minerales arcillosos son productos de aumento de presión/temperatura incrementando el grado de cristalinidad para series de caolinita-dickita-pirofilita, pudiendo indicar estas asociaciones mineralógicas condiciones de alta presión-temperatura por diagénesis profunda (Gaviria, 2012). En la dispersión y migración de minerales arcillosos de mayor interés son formados principalmente durante la diagénesis (Wilson *et al.*, 2014).

La cementación es el proceso más importante mediante el cual los sedimentos son consolidados para formar rocas sedimentarias. Es un cambio diagenético químico que implica la precipitación de los minerales entre los granos sedimentarios individuales. Los materiales cementantes son transportados en solución por el agua que percola a través de los espacios abiertos entre las partículas. A lo largo del tiempo, el cemento precipita sobre los granos de sedimento, llenas de espacios vacíos y une los clastos. De la misma manera que el espacio del poro se reduce durante la compactación, la adición de cemento al depósito sedimentario reduce también su porosidad.

#### **5.4 Técnicas analíticas usadas en el fenómeno**

**5.4.1 Parámetros de Propiedades Petrofísicas.** De las rocas sedimentarias, en especial las formadoras de hidrocarburos y para este estudio las areniscas, es de vital importancia la consideración de determinadas propiedades físicas dentro de su volumen, sea de una muestra de afloramiento, un núcleo perforado, registro eléctrico o uno magnético. Dichas propiedades permitirán el análisis en especial de la relación volumen de granos sobre volumen de espacios vacíos, además, de la interacción de los fluidos con la roca, el arreglo de las partículas (empaquetamiento) el contacto de las partículas y la composición del cemento, armazón y matriz; por lo que las características texturales indirectamente influyen sobre las propiedades físicas de la roca o propiedades petrofísicas.









TIPOS DE POROSIDAD	INTRAPARTICULAR	INTERPARTICULAR	PRIMARIA MEJORADA	INTERCRISTALINA	MÓLDICA	VUGULAR	BRECHAS Y FRACTURAS	ESTILOLÍTICA
Tamaños de Poro	0.01 - 1 mm.	0.05 - 1 mm.	0.1 - 1 mm.	0.1 - 10 mm.	0.2 - 10 mm.	1 mm. - 1m.	0.5 - 10 mm.	0.1 mm y de 10 cm a 10 m de largo
Variación en tamaño	Pequeño-grande	Pequeño	Moderado	Pequeño	Moderado	Grande	Moderado - Grande	Moderado
Forma del Poro								
Selectividad de la Estructura	Si	Si	Si	Variable	Si	No	No	Variable
Se originó durante....	Su depósito	Su depósito	Diagénesis temprana	Diagénesis Temp/Tardía	Diagénesis Temp/Tardía	Diagénesis Temp/Tardía	Posterior a la litificación y compactación	Posterior a la litificación y compactación
Relación con la Permeabilidad	Pobre	Moderada	Moderada	Buena	Pobre	Pobre a Moderada	Buena	Moderada a Buena
Eficiencia relativa de recuperación (0-20% porosidad)	Muy baja 0 - 5%	Gruesa 45-55 % Fina 20%	45 - 60 %	50 - 60 %	10 - 50 % dependiendo de la tortuosidad	15 - 30 %	15 %	15 %
Anisotropía del sistema poroso	Isótropo	Estructura con flujo anisótropo y sedimentos mezclados isotropo	De isotropo a anisótropo	Isótropo	Isótropo a escala fina pero fuertemente anisótropo en escala laminar	Variable pero en cavernas grandes, fuertemente anisótropo	Fuertemente anisótropo	Fuertemente anisótropo
Presencia en los yacimientos mas importantes	Muy raro	Comúnmente	Comúnmente	Raro / común	Raro / común	Comúnmente	Comúnmente	Muy raro

Figura 6. Tipos de Porosidad y sus características Figueroa (2013) quien hace una adaptación de acuerdo a Choquette & Pray (1970).

**5.4.2 Porosidad ( $\Phi$ ).** La determinación de la porosidad juega un papel importante en un yacimiento debido a que estima las reservas del reservorio, el espacio entre los granos es llamado espacio poral o intersticio, y es ocupado por fluidos (líquidos y/o gases), que dependerán de la porosidad (Tiab & Donaldson, 2004). Este parámetro es la relación del volumen de poros contra el volumen total de la muestra, en donde se considera que de acuerdo al origen de los poros y de la porosidad existen dos tipos de esta, la porosidad primaria la cual es formada en el mismo instante de la formación o depositación de los sedimentos, y se subdivide en intercrystalina, intergranular, en planos de capas y vacíos sedimentarios misceláneos (Figura 6) (Tiab & Donaldson, 2004). El otro tipo de porosidad es la porosidad secundaria y se da durante procesos posteriores a la depositación de los sedimentos (Cruz y Caballero, 2007).

Otro tipo de porosidad es la primaria intercrystalina que presenta vacíos entre los planos de exfoliación de los cristales, espacios vacíos entre cristales individuales y espacios entre las celdillas cristalinas o cristales lattices como su término en inglés es conocido. Muchos de los espacios vacíos son subcapilares, es decir, poros menos que 0.002 mm de diámetro, según Pittman en Tiab & Donaldson (2004) esta porosidad es denominada microporosidad.

La porosidad intergranular que se da entre los granos o espacios intersticiales, en un rango que va desde la sub-capilaridad hasta tamaños de super-capilaridad (espacios más grandes que 0.5mm en diámetro).

Los planos de estratificación son otro tipo de porosidad. La mayor geometría de muchos de los reservorios de petróleo es controlada por dichos bedding planes o planos de estratificación. diferentes de los sedimentos depositados, del tamaño de las partículas y el arreglo (empaquetamiento), así como el ambiente de depositación son causas de espacios entre los planos de estratificación.

Vacíos Sedimentarios Misceláneos: Estos se pueden dar por vacíos resultantes de acumulación de fragmentos dendríticos de fósiles, o resultado de empaquetamiento de oolitos o espacios tipo vuggy o cavernosos de amañes variables e irregulares para un tiempo de depositación, y espacios creados por bioturbación en el tiempo de la depositación. La porosidad de vuggy o vugular es para disoluciones que dejan espacios con diámetro menos a 50 cm.

**Porosidad secundaria:** Todas las secuencias sedimentarias varían en tamaño de sus poros, estas variaciones se denominan primarias si dependen del ambiente de depositación de la formación, el calibrado de las partículas y su tamaño, la naturaleza de los materiales que la componen y el contenido de matriz (Figueroa, 2013). Las variaciones se denominan secundarias, si se dan bajo la dependencia de fenómenos dados después de que ocurrió la sedimentación de la roca, incluyendo eventos de fracturamiento, disolución, la re-sedimentación y cementación, la compactación debida a un aumento de sobrecarga. La porosidad varía normalmente en los yacimientos entre el 5 y el 30%.

De manera general, la porosidad secundaria es el resultado de procesos geológicos como diagénesis y citogénesis después de los procesos de sedimentación, a esto, sumarle que a la magnitud, forma, tamaño e interconexión de los poros pueden no tener relación directa con la forma original de las partículas sedimentarias originales (Tiab & Donaldson, 2004). La porosidad inducida puede ser dividida entre tres grupos basados en los principales procesos geológicos dominantes:

Otras porosidades secundarias importantes se dan por fracturas, las cuales en aberturas creadas por fallas estructurales de las rocas reservorios por actividad tectónica como plegamientos o fracturamiento. Estas aberturas incluyen grietas, fisuras y fracturas. En algunos reservorios, caso que cita Tiab & Donaldson en Elerburger carbonate fields en el oeste de Texas, Estados Unidos,

la porosidad por fractura es muy importante, a pesar de que la porosidad por fracturas solo en carbonatos por lo general no excede el 1%. También puede existir espacios de porosidad secundaria variada como Saddle reefs, pero se alejan del tema del énfasis de este trabajo sobre la influencia en de las arcillas en las arenas. Si desea conocer un poco más, es aconsejable utilizar el libro del cual se citan las partes anteriores.

**Determinación de la Porosidad:** La expresión matemática para la porosidad se presenta de la forma:

$$\emptyset = \frac{Vb - Vgr}{Vb} = \frac{Vp}{Vb}$$

Donde:

$\emptyset$  = Porosidad

$Vb$  = Volumen total

$Vgr$  = Volumen de granos

$Vp$  = Volumen de poros.

De acuerdo con esta definición, la porosidad de materiales porosos podría tener cualquier valor, pero la porosidad de la mayoría de las rocas sedimentarias es generalmente inferior a 50 (Tiab & Donaldson, 2004). Como es una relación de un término respecto al otro, es los análisis se usa por lo general en términos de porcentaje.

Experimentalmente, en el laboratorio la porosidad se mide sobre las muestras de plugs y dicha medida es usada para calibrar los cálculos de porosidad hechos desde registros eléctricos. No obstante, no todo el espacio poroso está disponible para almacenar fluidos, es por esto que cuando se cuantifica el volumen de fluidos móviles se trabaja con porosidades efectivas, que en general, se da cuando existe una comunicación entre los poroso, la porosidad puede ser interconectada o efectiva, es decir, la porosidad efectiva hace alusión a un porcentaje de poros interconectados

mediante gargantas que permiten la circulación de los fluidos en especial los móviles (Figura 7) (Rojas, 2011). En laboratorio usualmente se hacen dos mediciones de porosidad, la ya dicha porosidad efectiva y la porosidad total, esta última es una medida del total de espacios “vacíos”, es decir, tanto los poros aislados como los poros interconectados (porosidad efectiva) de una muestra de roca (American Petroleum Institute, 1998). La porosidad total y la efectiva pueden ser determinadas por el volumen total, peso seco y volumen de granos de medidos en una muestra desagregada (American Petroleum Institute, 1998).

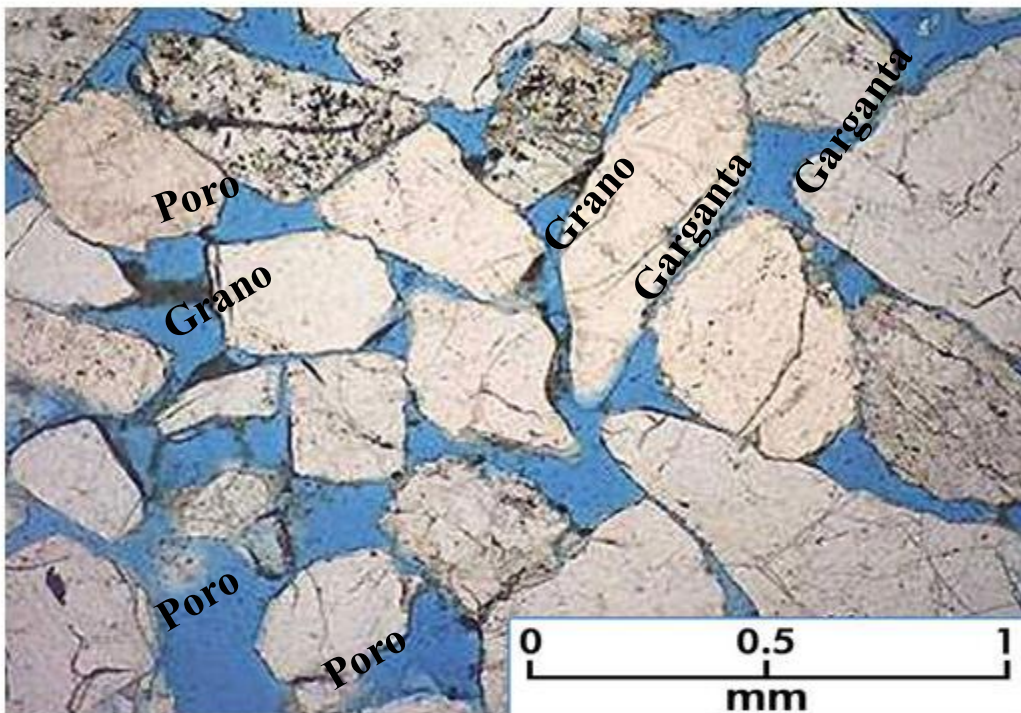


Figura 7. Esquema de un Sistema poroso.

**5.4.3 Permeabilidad.** Es la propiedad que permite el paso de un fluido a través de los poros interconectados de una roca, sin que haya un daño o desplazamiento de las partículas de la roca (Figueroa,2013). Según API-RP 40 es una propiedad de la media poral y es una medida de su habilidad para transmitir el fluido. La medición de la permeabilidad de una roca porosa o estrato, “es la medida de la conductividad del fluido de material particular” (American Petroleum Institute, 1998). La permeabilidad es el análogo al flujo o caudal de otras ciencias que miden conductividad eléctrica o térmica. El recíproco a la permeabilidad representa la viscosidad que la media poral ofrece a flujo del fluido cuando hay prevalencia de velocidades bajas de caudal o flujo. Dicha condición de flujo es comúnmente llamada “viscosidad de flujo”, o formalmente *Stokes Flow*.

Como la permeabilidad puede representarse como un caudal o cantidad de fluido que pasa por un área particular, la permeabilidad está vista como un fenómeno explicado a través de la ley de Darcy, para el caso de la permeabilidad, la expresión se relaciona con la cantidad de flujo a través de la media poral efectiva. Según American Petroleum Institute (1998) la ley de Darcy establece la velocidad volumétrica de flujo por unidad de área de la sección transversal de un medio permeable la cual es directamente proporcional al gradiente de potencial e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido, donde el coeficiente de proporcionalidad es la permeabilidad.

La ley de Darcy, a pesar de su aplicabilidad, se presenta muy limitada, es decir, solo hace parte de los flujos volumétricos bajos. En el caso de los flujos más altos, se considera importante la Resistencia Inercial de Forchheimer, este autor observó que el gradiente potencial requerido para un flujo volumétrico dado es más grande que el predicho por la ley de Darcy por una cantidad proporcional al producto de la densidad del fluido y el área de su flujo volumétrico (American Petroleum Institute, 1998). Para un mejor entendimiento, el resultado de esta proporcionalidad es

el coeficiente de resistencia inercial ( $\beta$ ) la cual según el glosario de términos de Schlumberger es la resistencia extra de un medio poroso al flujo de un fluido, más allá de lo predicho por la ley de Darcy, causada por aceleraciones locales dentro del volumen del poro tortuoso. Este valor es muy significativo con el gas porque el caudal puede ser altos, en los laboratorios se usan mucho con muestras de alta permeabilidad donde se necesita altos caudales para tener gradientes de presión significativos, todo dentro de corrección con ecuaciones de Forchheimer.

Todo este tratado acerca de la permeabilidad es muy importante para el entendimiento en especial de reconocer la importancia y el uso de los parámetros de las propiedades petrofísicas, las cuales deben asociarse a estas teorías y obtener valores certeros de la representación de las muestras (American Petroleum Institute, 1998). La permeabilidad es entendida bajo conceptos de Klinkenberg, donde se hace una analogía de la muestra y su permeabilidad de acuerdo a tubos capilares, es decir, una representación de un plug representado por un haz de tubos capilares y da origen a otros parámetros petrofísicos como la permeabilidad de Klinkenberg y Klinkenberg Slippage Factor (KSF) (b) (Jones & Aime, 1972).

La permeabilidad es controlada por varios aspectos como la porosidad efectiva de la roca, la geometría de los poros, incluyendo la tortuosidad, y la medida de las gargantas porales entre los poros, la fuerza capilar entre la roca y los fluidos que las invaden. Como se había dicho, la ley de Darcy la representa muy bien, por lo que la unidad de medida de esta en una roca es el sistema cegesimal (CGS) denominados darcys, experimentados por Henri Gaspard Darcy en 1956 con circulación de fluidos en medios porosos (Figueroa, 2013) Además, como la mayoría de las rocas tiene una permeabilidad inferior a un darcy, esta propiedad es dada en milidarcy (1md= 0.001 darcy).

**5.4.4 Tipos de permeabilidades.** Permeabilidad Absoluta: La propiedad absoluta es una propiedad de la roca que permite el paso de un fluido cuando esta roca se encuentra con una saturación del 100% por el mismo fluido, que debe ser mojado y no modifique el medio poroso (Meza, 2013).

**Permeabilidad Efectiva:** dado a un fluido es la propiedad petrofísica que permite el paso de un fluido cuando no se encuentra saturada por este fluido al 100%. Es decir, hay presencia de más de un fluido en el medio poroso (Meza, 2013).

**Permeabilidad Relativa:** Este concepto permite cuantificar el flujo de cada fluido en un sistema multifásico. Su tratado es importante en el estudio del flujo simultáneo de los fluidos inmiscibles a través del medio poroso. Su definición hace alusión a la relación que existe entre la permeabilidad efectiva a un fluido y la permeabilidad absoluta (Meza, 2013).

$$Kr = \frac{Ke}{Ka}$$

**Factores influyentes en la Permeabilidad:** Factores que afectan la naturaleza de la roca, como características internas, estructuras porosas o algunos otros aspectos de la roca que genera variación del tamaño y forma de los granos, la arcillosidad y la cementación, según Meza (2013) afectan en especial la permeabilidad absoluta. A su vez, la porosidad relativa, es muy dependiente de la saturación de fluidos, en menor proporción la mojabilidad, efectos de sobrecarga, estructura de la roca, contenido de arcilla y finos, temperatura, viscosidad, tensión interfacial y los gastos de desplazamiento (Meza, 2013).

**Permeabilidad medida en Laboratorio:** Para la determinación de la permeabilidad de los núcleos para ensayos petrofísicos se tienden a realizar tres medidas. La primera es la permeabilidad absoluta, la cual mide el caudal de un sólo fluido o fase (gas, agua o aceite) a través del núcleo

siguiendo la ley de Darcy cuando este se encuentra 100% saturado con este fluido. La permeabilidad efectiva es caracterizada por la habilidad para transmitir un fluido cuando otros fluidos inmiscibles están presentes en el núcleo, como ejemplo, se dan tres casos: un gas en un núcleo con gas y agua, o aceite con un núcleo con aceite-agua o inyectar agua en un núcleo con saturación en aceite-agua, en este ensayo cada fluido inmisible restringe la capacidad de flujo de los otros siendo la permeabilidad efectiva de cada fluido menor a la permeabilidad absoluta (Camacho y Ebrath, 2014).

La última permeabilidad es la permeabilidad relativa, es una simple relación entre la permeabilidad del aceite sobre la permeabilidad absoluta, que por lo general es la del agua, esta es un término adimensional que se implementó para adaptar la ley de Darcy al flujo multifásico. Gráficamente a medida que disminuye la permeabilidad relativa del aceite, la saturación de agua va aumentar. Con lo anterior, se definen permeabilidades en estado Estable (ley de Darcy) y Estado inestable (modelos analíticos o matemáticos). La suma de las permeabilidades de las fases nunca será igual a 1 (Camacho y Ebrath, 2014).

Las permeabilidades que se dan por el laboratorio son dos y hacen parte de este estudio. La permeabilidad del aire, la cual es una permeabilidad absoluta y la permeabilidad de Klinkenberg no es un fenómeno común en campos petrolíferos, pero si lo es en laboratorio. En este sentido, se ve involucrado el efecto Klinkenberg en donde la permeabilidad a un gas es una función del camino libre promedio del paso de las moléculas de gas, esto hace que dependa de factores que afecta dicho camino: temperatura, presión y clase de gas, en este sentido, cuando ese camino de paso de gas es pequeño, es decir, a altas presiones, se esperaría que la permeabilidad del gas se comporte como la permeabilidad de un líquido (Escobar, 2012).

**5.4.5 Klinkenberg Slipfactor (b).** En el párrafo pasado cuando se estaba hablando de la permeabilidad de Klinkenberg, se expuso el efecto Klinkenberg. En este sentido, la permeabilidad de una muestra a un gas varía con el peso molecular del gas y la presión aplicada, como consecuencia del Gas Slippage en la pared del poro. Fue Klinkenberg quien determinó que la permeabilidad líquida es relativa a permeabilidad del gas:

$$Kl = \frac{Kg}{\left(1 + \frac{b}{p}\right)}$$

Dónde  $p$  es la media de la presión del flujo y  $b$  es una constante para un gas particular en un tipo de roca dado (Petrowiki, 2015). Esta corrección en el parámetro  $b$  es determinada por conducir la prueba en varias presiones del flujo y extrapolando a presión infinita. Alternativamente, se puede usar una correlación empírica establecida por Jones (1987) para estimar a  $b$ , quien trabajó con 364 muestras principalmente areniscas en un rango de 0.01 – 2500 mD (Petrowiki, 2015). Este factor se da en psi cuando la permeabilidad se da en mD y la porosidad como una fracción, además, es muy importante para rocas de baja permeabilidad y menos importante para rocas de alta permeabilidad.

El valor de la permeabilidad líquida obtenida después de aplicar la corrección representa la permeabilidad a un gas de presión infinita o a un líquido que no reacciona con los minerales componentes de la roca (Petrowiki, 2015).

**5.4.6 Coeficiente de resistencia inercial y coeficiente de resistencia viscosa ( $\beta$  o  $\alpha$ ).** En un régimen de flujo donde la velocidad es baja, la ley de Darcy aplica y las rocas reservorio se pueden representar por esta ley. No obstante, hay evidentes excepciones, en particular relacionado con los alrededores de pozos que producen a los niveles de caudales tales como pozos de gas, es decir, aplicar una ley más general, de caudal no laminar. Por esta razón, aparecen la ecuación de Reynold y la ecuación de Forchheimer.

Dentro de un flujo monofásico a través de un medio poroso, dos fuerzas contrarrestan la fuerza externa simultáneamente, es decir, fuerzas viscosas e inerciales. La fuerza inercial aumenta a medida que la velocidad aumenta, mientras que para un caudal de velocidad baja la viscosidad domina (Jones *et al.*, 1987).

Tanto el parámetro  $\beta$  como el  $\alpha$  fueron tribuidos por Forchheimer en 1901 quien descubrió que el gradiente de presión requerido para sostener la velocidad del caudal alto en un medio poroso es más alto que lo que ecuación de Darcy podría predecir. Entonces, la desviación aumenta con incremento de la velocidad, atribuyendo el exceso de gradiente requerido a la resistencia inercial del flujo ( $\beta$ ) (Jones *et al.*, 1987). Entonces, el coeficiente de resistencia inercial es definido como el estrés confinado menos la presión de poro promedio. El estrés confinado se mantiene constante y la presión de poro promedio decrece durante el curso de una medida transitoria de permeabilidad, el estrés neto correspondiente aumenta durante el experimento. Dicho incremento de estrés causa un decrecimiento de permeabilidad a la vez que la velocidad de flujo promedio de un gas decrece. Por tal motivo, la resistencia al flujo aumenta con decrecimiento de la permeabilidad. El problema es que esto es contrario a lo que la ecuación de Forchheimer predice (es decir, se asume una permeabilidad constante): La resistencia al flujo es más que en la más alta velocidad de flujo y

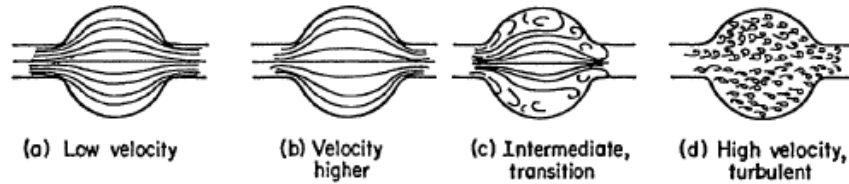
presiones de poro promedio más altas debido al  $\beta\rho v^2$ . Este término cuando es demasiado pequeño es indicador de rocas de muy baja permeabilidad.

El incremento del estrés neto causa que la permeabilidad disminuya al mismo tiempo que el caudal de la media poral disminuye. De esta forma, la resistencia al flujo aumenta con la disminución del caudal. Cuando este término del párrafo anterior es muy pequeño, como en rocas de baja permeabilidad y la variación de permeabilidad al variar el estrés neto es un efecto importante más que los términos inerciales causan, entonces el coeficiente inercial es representado como negativo. Un  $\beta$  negativo más conocido por Jones *et al.* (1987) como factor  $\alpha$  es físicamente insostenible. Lo anterior ocurre solo como un resultado de la pretensión de que la permeabilidad permanece constante durante la medida de la permeabilidad. Sin embargo, algunas muestras de baja permeabilidad son por mucho insensibles al estrés. Estas son generalmente rocas “limpias” y homogéneas que están bien consolidadas y libres de micro-fracturas.

El factor  $\alpha$  ha tenido diversos nombres, por ejemplo, Jones *et al.* (1987) lo denomina como coeficiente de resistencia viscosa al igual que Norman *et al.*, (1985), mientras que Soeder & Chowdiah (1990) lo define como factor de permeabilidad estrés-dependiente. El factor  $\beta$  era denominado como factor de turbulencia (Cornell & Katz, 1953 citado en Norman *et al.*, 1985) e incluso factor de fricción por Fancher *et al.* (citado en Firoozabadi & Katz, 1979).

Para entender mejor, las permeabilidades discutidas, tenga en cuenta como si la presión efectiva permanezca constante. No obstante, a medida que la presión creciente cierra las fracturas y comprime el espacio de los poros, la permeabilidad disminuirá. La magnitud del cambio depende de la estructura de la roca. Las rocas débiles no consolidadas colapsarán fácilmente y la caída de la permeabilidad puede ser drástica. A medida que la roca es más consolidada, esta dependencia de la presión disminuye. Por otra parte, incluso para rocas con baja permeabilidad, a medida que

se introduce el fluido por las fracturas y comienzan a dominar el flujo de fluido, esta tendencia general se invierte y aumenta la dependencia de la presión.



*Figura 8.* Flujo idealizado a través de diferentes secciones transversales que aluden situación en el espacio poral medio. Froozabadi & Katz (1979).

**5.4.7 Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier.** El método de Espectrometría infrarroja por Transformada de Furier (FTIR) puede ser aplicada a rocas reservorios para la rápida determinación de minerales (Adamu, 2010). El rango de trabajo conocido como el espectro infrarrojo medio ha sido usado para la determinación de abundancia relativa de Cuarzo, arcilla y calcita. El espectro da una representación gráfica de como la luz infrarroja actúa con enlaces interatómicos en materiales inorgánicos en las rocas, en especial,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , los cuales son excitados en sus enlaces dando un espectro diferente con la absorción siendo directamente relacionada con la concentración del mineral en la muestra de roca (Adamu,2010).

La espectrometría Infrarroja fue obtenida a partir de muestra pulverizada de las rocas y realizada usando el equipo is50 FT-IR Nicolet. Thermo Scientific, con un rango de adquisición de 4000-4000  $\text{cm}^{-1}$ , total de 32 barridos, una resolución de 4, velocidad óptica de 0.4747  $\text{cm/s}$  y en modo de reflectancia atenuada (ATR).

**5.4.8 Espectroscopia Raman (Raman).** La Espectrometría Raman (ER) -Raman en este trabajo- o por Transformada de Fourier (FTRS), es una herramienta reciente y la cual ha encontrado su uso en las ciencias de la Tierra, en especial en investigaciones mineralógicas, geoquímicas y petrológicas de diversa índole. En la actualidad se utiliza la ER en la investigación y determinación del grado de orden-desorden en la estructura de algunas sustancias minerales desordenadas con diferentes grados de cristalinidad (Ostrooumov, 2012). Lo que convierte a esta herramienta en una de las más sensibles, por encima incluso, de métodos de difracción y de espectroscopia infrarroja, en lo referente al estado del orden y desorden estructural de los minerales. La simple explicación, es que las bandas de absorción son más estrechas en Raman que en FTIR, por lo que pueden definir mejor cuando hay espaciados irregulares entre los enlaces. Uno de los buenos usos de los que se puede hacer con ER es la distinción de las muestras polimorfas de los minerales, pues la sensibilidad de secuencias vibracionales y de intensidades difusas de las bandas características permite determinar los cambios débiles de la estructura cristalina (Ostrooumov, 2012), además, dan información sobre la química e isotopía composicional de los minerales y espectroscopia de soluciones sólidas. El Equipo usado es el LabRam HR Evolution, se usaron tres tipos de láser: 473 nm, 532 nm y 785 n con un objetivo de 100x.

**5.4.9 Difracción de rayos X.** La identificación de minerales arcilla por la difracción de rayos X (DRX) se basa en la Ley de Bragg, la cual permite medir el tamaño de las unidades estructurales de los filosilicatos de acuerdo al ángulo de incidencia de los rayos x, basado en la siguiente ecuación:

$$n\lambda = 2d\text{sen}(\theta)$$

Para el caso de la ecuación,  $n$  es un número entero.  $\lambda$  es la longitud de onda del rayo incidente, es decir, los rayos  $x$ , y el ángulo  $\theta$  es la incidencia de dichos rayos  $x$  y  $d$  es la distancia entre planos o tamaño de la unidad cristalina básica (Melo, 2008 citado en Ramirez, 2010). Según el mismo autor,  $d$  es única para cada mineral de arcilla lo que permite su identificación. Sin embargo, DRX sea electrónica o neutrónica, no siempre puede determinar las características estructurales de los compuestos naturales de bajo grado de cristalinidad y amorfos, por lo que herramientas como Espectrometría Raman pueden contribuir en estos aspectos (Ostrooumov, 2012).

El método de difracción de rayos X por la técnica del polvo puede aplicarse a diversas fases granulométricas del suelo e incluso de rocas, como la arena, el limo y la arcilla, y a partir de esto, se evidencia la calidad o éxito existente desde el tratamiento realizado con la muestra y su preparación, esto incluye eliminar agentes cementantes y componentes amorfos, eliminando carbonatos, materia orgánica, óxidos de hierro, óxidos de manganeso, sílice y alúmina (Justo y Morillo, 1999). Los mismos autores resaltan lo indispensable que es la eliminación de agentes cementantes y amorfos pues estos evitan una dispersión adecuada, reducen la intensidad de las líneas de difracción, evitan una orientación adecuada de los minerales laminares en agregados orientados e incrementan la difusión de los rayos X en la muestra analizada disminuyendo también, el haz primario.

La necesidad de utilizar una integración entre técnicas espectroscópicas como infrarrojo y Raman, junto con difracción del total de muestra difracción de fracción arcilla, es que esta última no es conveniente como resaltan Justo y Morillo (1999) realizarlo como una práctica rutinaria, pues pueden inducir a serio errores tanto en la identificación como en la evaluación de la proporción relativa de los componentes; también, contiene mucho material primario como Cuarzo, feldespatos y otros.

Los planos basales (001) presentan la mayores intensidades de los picos difractados, para un mismo mineral de la arcilla, las distancias entre las capas basales y la intensidad de la difracción dependerá además del catión de cambio que las satura y de la naturaleza y cantidad del líquido absorbido entre dichas capas, caso crítico en minerales de capas que pueden expandirse, siendo un uso en determinación de especies de minerales de arcilla que tienen picos con un espacio  $d_{001}$  similares (Justo y Morillo, 1999).

**5.4.10 Microscopía electrónica de barrido (SEM).** El Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés) usa un haz enfocado de electrones de alta energía para generar una variedad de señales en la superficie de muestras sólidas, dichas interacción electrones-cuerpo sólido revelan información sobre la muestra incluyendo morfología externa (textura), composición química, estructura cristalina y orientación de los materiales que componen la muestra (Swapp, 2017). Dichas áreas pueden variar de un centímetro a 5 micrómetros de ancho donde se pueden visualizar en un modo de escaneo usando técnicas convencionales de SEM, es decir, ampliación que varía de 20X a aproximadamente 30.000X resolución espacial de 50 a 100 nm (Swapp, 2017).

La observación fue realizada sobre muestras pequeñas y frescas tomadas de las rocas de afloramiento, buscando la superficie más homogénea posible, con el fin de mantener una buena calidad en la resolución. El objetivo al igual que expone Billault *et al.* (2003) es la caracterización textural de las partículas y la muestra de roca en general, esto incluye la determinación del tamaño y morfología con lo que se pretende, en sumatoria, generar unas relaciones petrográficas a escala micrométrica. Sin embargo, el autor anterior centró su estudio al análisis característico de partículas de cloritas, mientras que este trabajo ampliará el estudio hacia el poro, composición y estructura de las muestras.

## 6. Metodología

La metodología propuesta a continuación se divide en fases, cada una responderá al estudio del fenómeno aquí presenta y cómo a partir de esta establecer respuestas a los objetivos.

**Fase 1: Estudio del Estado del Arte.** Esta fase parte de la intención de estudio de este trabajo, es decir, partió de entender como los minerales de arcilla afectaban a la roca sedimentaria siliciclástica como tal, el estudio del arte identificó que para rocas reservorio el fenómeno era estudiado a partir de propiedades petrofísicas como porosidad y permeabilidad, y que usaban diferentes técnicas para estudiar el fenómeno. Se estableció, además, el papel de los minerales de la arcilla a nivel general desde aspectos diagenéticos como de producción de una manera básica.

**Fase 2: Determinación de las Técnicas de Análisis.** Establecido el estudio del arte y qué se puede estudiar respecto al fenómeno, se determina cuáles son las técnicas a utilizar a partir de otros autores y estas se deben corroborar en la posibilidad de que la Universidad Industrial de Santander o el Instituto Colombiano del Petróleo cuenten con ellas para realizar la investigación. Con lo anterior, se plantea hacer una investigación que contenga Espectroscopía Infrarroja y Espectroscopía Raman, Difracción de Rayos X, Microscopio Electrónico de Barrido y Propiedades Petrofísicas básicas. De manera que el nuevo aporte de este trabajo construya un estudio tanto comparativo como de identificación. Comparativo en el contexto de involucrar todas las técnicas posibles dadas por los autores del estado del arte con el fin de caracterizar a los minerales arcillosos y de identificación, porque a partir de contener caracterización y cuantificación, puedan enfrentarse esas técnicas a analizar la influencia de la mineralogía de arcillas en las propiedades petrofísicas de las rocas siliciclásticas.

**Fase 3: Muestras.** Una vez identificadas las técnicas y el estado del arte, el paso siguiente es escoger muestras siliciclásticas de afloramiento, estas se dieron gracias a las campañas de Campo I de estudiantes adscritos a la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, dichas muestras tendrían que ser lo suficientemente grandes como para poder realizarle tomas con el fin de analizarlas en las diferentes técnicas propuestas. En general, se necesitaría sacar un plug para propiedades petrofísicas, un fragmento para SEM, y pulverizarlas para FTIR, Raman y DRX. Las muestras en campo tenían que cumplir las condiciones de ser rocas siliciclásticas y de por lo menos conocer la formación geológica de la cual se obtuvieron, no es necesario coordenadas ni mapa geológico pues este no es el propósito del trabajo. Las muestras además se necesitaban que tuvieran diferentes escenarios posibles de permeabilidad y porosidad, por lo que el estudio toma muestras porosas, unas de rango medio y otras muy apretadas, de baja permeabilidad y porosidad.

**Fase 4: Preparación de Muestras.** Cada técnica necesitará una preparación de muestras particular. Aunque en el caso de DRX, FTIR y Raman se necesita la misma preparación, es decir, pulverización de las muestras, la cual puede usar un mortero ágata o de aleaciones metálicas. En el caso de SEM se escogió fragmentos lo más frescos y planos posibles y en el caso de los plug para las propiedades petrofísicas se realizaron se sacar un poco más de una pulgada de diámetro y que por lo menos la longitud de ese cilindro fuera mayor que el diámetro del mismo, con el fin de obtener mediciones fidedignas.

De ser necesaria, la difracción del total de roca o Bulk de la muestra al igual que las otras herramientas que usan polvo de muestra tendrán el problema de que las señales que se necesitan para caracterizar los minerales arcillosos son muy débiles en presencia de otros minerales como el Cuarzo, por consiguiente, aplicar una preparación especial a la fracción arcilla será necesario, esto involucra realizar agregados orientados y a partir de las propiedades térmicas y físicas de las

arcillas, lograr identificar por lo menos los grupos de minerales de arcilla al que pertenece, reconociendo que la determinación exhaustiva y específica involucra parámetros cristalográficos y hasta esa profundidad este estudio no llegará. Estos agregados orientados deberán ser por un lado calcinados y por otro expuestos al Etilenglicol, el primero con el fin de que estructuras cercanas colapsen y se identifique que mineral de arcilla sigue en la seña y cual colapsó; el segundo, es para determinar cuáles son los minerales expandibles ya que esta sustancia se introduce en las capas de forma similar a como lo hace las moléculas de agua y así determinar si hay presencia de minerales del grupo de la Esmectita. A groso modo esta es la explicación del método para separar la fracción arcilla e identificar fases cristalinas difíciles de determinar, además, todavía habrá una no muy clara determinación de minerales de la arcilla interestratificados o de capas mezcladas.

**Fase 5: Desarrollo de ensayos de laboratorio.** En general, se van a realizar cuatro grandes grupos de técnicas. El primero son los análisis petrográficos que involucran láminas delgadas de las muestras y microscopio petrográfico, estereomicroscopio para muestras de mano y microscopio electrónico de barrido. En general, para determinar minerales, tamaños de partículas, clasificación de rocas en las dos primeras, y la última, para la composición, morfología e influencia en los poros. En el segundo grupo de análisis se encuentran los análisis petrofísicos y la determinación de los diferentes parámetros petrofísicos tales como permeabilidad y porosidad, pero que, además, involucran otros resultados que más adelante se explicarán.

El tercer grupo de ensayos de laboratorio son los análisis espectroscópicos, que involucran espectroscopia infrarroja y espectroscopía Raman, ambas con Transformada de Fourier, serán parte de la caracterización y como estudio comparativo con otras técnicas y de carácter suplementario para la determinación de minerales de arcilla en las muestras analizadas.

El último grupo son los análisis de Rayos X, que involucran difracción de rayos X, pero no fluorescencia. Esta será la prueba 'reina' de este trabajo, la razón es que la mayoría de las fuentes consultadas usaron difracción de rayos X para estudiar el fenómeno, es la que en general, da una mejor aproximación de la influencia en la roca de los minerales de la arcilla y es especial para el estudio de minerales filosilicatos y en caso de ser necesario, deberá realizarse una preparación especial para estudiar a la fracción arcilla. Debido a que la cristalinidad, como expresión de orden de los minerales de arcilla, es relativamente baja, la difracción puede presentar una no detección de estos con tan solo el análisis del total de roca en polvo (Plana 1982). Para ello será necesario un método con el fin de separar la fracción arcilla de los demás componentes de las rocas analizadas y luego como se dijo al final de la Fase 4 de preparación de muestras tener tres agregados orientados uno calcinado, otro normal y otro con etilenglicol, con el fin de poder determinar estructuras a partir del colapso o expansión, relativamente, de las fases de los minerales de arcilla en cuestión.

**Fase 6: Interpretación de Resultados.** En la primera parte de la interpretación de resultados se establece que se van a representar cualitativamente los datos obtenidos en el caso de los análisis petrofísicos y en el caso de las otras técnicas, se hará una interpretación por separado y luego una integración coherente con lo que se está caracterizando, es decir, FTIR y Raman se analizarán por separado a DRX y a SEM y láminas delgadas, luego a partir de lo que encuentra se vuelve a identificar si las especies minerales si se pueden detectar en cada análisis. En el caso de DRX un programa de computadora es usado con el fin de identificar los minerales, pero en el caso de FTIR y FTIRs es más complicado, ya que en estos se obtienen son grupos de frecuencias de determinadas moléculas, por lo que el uso de espectros de fuentes a consultar será necesario, de la misma forma con SEM, se analizarán morfologías y composiciones similares mediante citar otros autores.

**Fase 7: Discusión de Resultados.** La integración de los resultados de todas las técnicas se hará en esta fase. La caracterización de los minerales arcillosos y las evaluaciones cualitativas de las propiedades petrofísicas, así como los análisis cuantitativos (semicuantitativos) de la fracción arcilla en cada muestra, servirán para discutir cómo es la influencia de la mineralogía de arcillas o de minerales de la arcilla en las propiedades petrofísicas, que, por consiguiente, resulta inevitable no establecer una relación a procesos ocurridos en reservorios o en producción de hidrocarburos.

**Fase 8: Conclusiones y entrega final.** La última fase incluirá como las discusiones y resultados, así como las fases en este estudio respondieron al propósito, a la pregunta problema y los objetivos. Esto terminará, además, con el final del libro que resulte de este trabajo involucrando una bibliografía y referencias de las fuentes consultadas.



*Figura 9.* Mapa conceptual que representa el esquema de la metodología propuesta por este trabajo.

## 7. Resultados

Los resultados de esta investigación se basan en cinco muestras de areniscas a las cuales se les aplicó la metodología propuesta y se exponen en este capítulo. Dichas muestras fueron tratadas para obtener un plug que en promedio tiene dimensiones entre los 3.5 cm en diámetro y 5 cm en longitud.

La preparación de las muestras tuvo sometida a un proceso antes del desarrollo de la obtención de los parámetros petrofísicos experimentales. En el caso de los análisis de DRX, FTIR y FTRS las muestras del afloramiento -no los plug- se fracturaron y separaron. Para el caso de los análisis SEM también tuvieron otra preparación diferente a las demás.

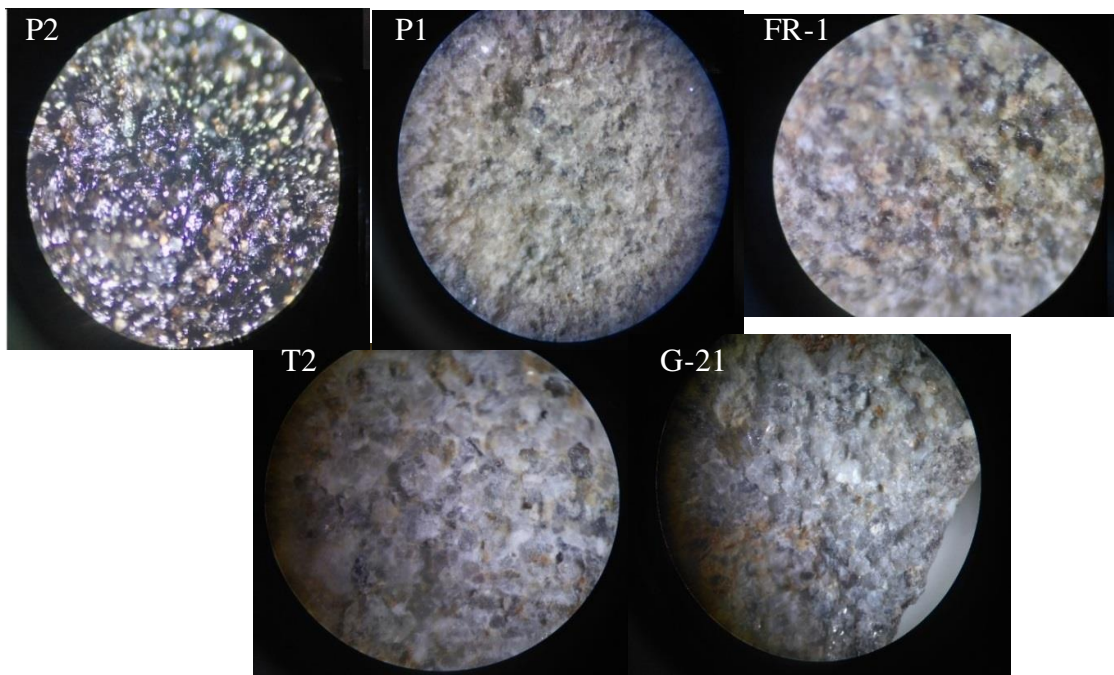
Para el procedimiento de los plug, primero el aceite residual fue removido de estos, logrando secarlos en un proceso de 48 horas. Las primeras mediciones que se realizaron fueron calculadas usando un permeámetro y porómetro automatizado AP-608. Una inspección básica de los plug fue llevada a cabo con un estereomicroscopio Binocular Zeiss, un modelo Stemi DV4 con el fin de distinguir sus características tanto texturales y como las macroestructuras.

Para los procedimientos de espectrometría y difracción (DRX, FTIR y Raman), las muestras fueron preparadas triturando unos fragmentos de roca en un medio lo más estéril posible, esto se realiza tomando fragmentos de las muestras cortas y sometiéndolas por aparte a maceración hasta lograr conseguir un ‘polvo’ con tacto arcilloso a la vista de todas las muestras, este procedimiento ayuda a la adquisición de todos los componentes por parte de los equipos utilizados. El macerador es de componentes de aluminio.

### 7.1 Estereomicroscopía

El Estereomicroscopio para hacer petrografía básica es fundamental pues en la mayor escala es posible el establecimiento de características como la fábrica de las rocas, la naturaleza de la porosidad y asociación con minerales, Para establecer composición y naturaleza de las rocas siliciclástica en especial las areniscas.

Este es el primer análisis realizado a las muestras, un estudio preliminar que dará apertura a las demás técnicas utilizadas en este trabajo, y que todos en cierto grado de importancia van a permitir establecer ciertas características influyentes en las propiedades físicas y composicionales de las rocas. Dentro de este primer método de caracterización macro se puede observar la gran variabilidad de las muestras, éstas difieren mucho en su estado de meteorización, compactación, tamaño de grano, esfericidad y redondez, color y composición mineral.



*Figura 10.* Propuesta para modificar regiones de influencia de minerales arcillosos sobre la Permeabilidad y Porosidad de las rocas siliciclásticas.

La muestra FR-1 (Figura 10) se ha descrito como una arenisca de grano fino a muy fino, bien calibrada, granos subangulares a subredondeados un poco esféricos, está bien cementada pero no con materiales calcáreos, composicionalmente presenta 45% de Cuarzo, 40% de feldespatos y 15% de fragmentos líticos, además de poca porosidad. Se definió que el contacto es cóncavo-convexo y según Cruz y Caballero, su estado es madura.

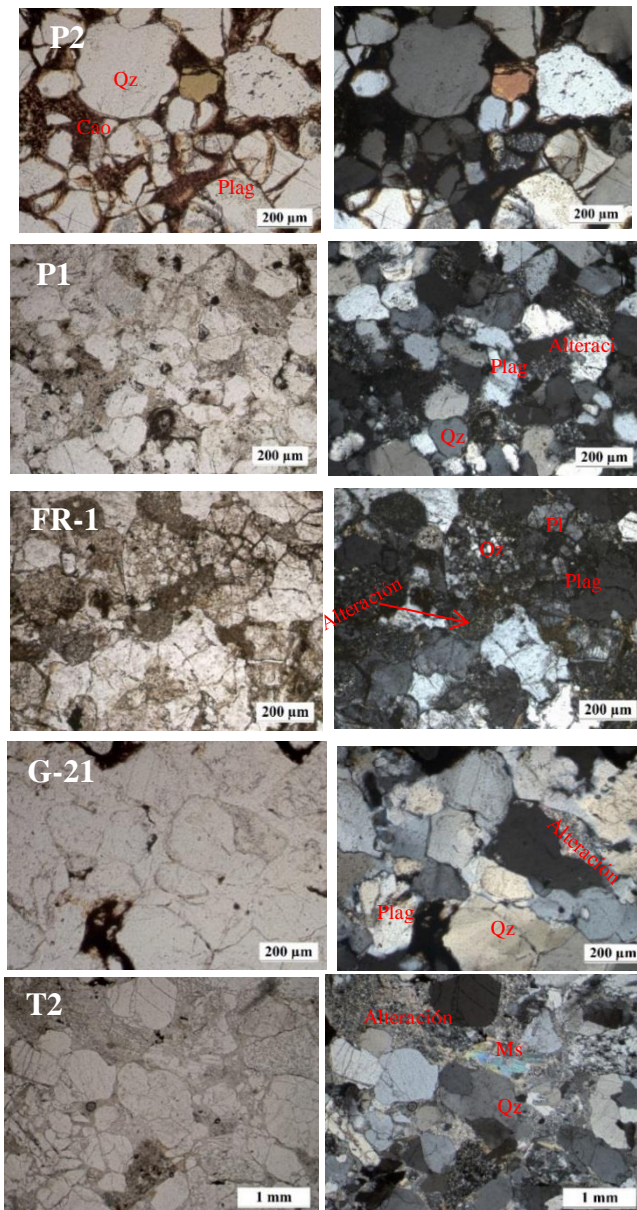
La muestra T2 es una arenisca de grano medio a fino, bien calibrada con granos angulares y poco redondeados, no reactiva en ácido clorhídrico (HCl) (materiales no calcáreos), su composición normalizada estimada es de 40% de Cuarzo, 30% de feldespato y 30% de fragmentos líticos, una estimación de porosidad baja, el contacto interparticular se muestra como cóncavo-convexo. Hay minerales máficos alterados.

Las muestras P1 y P2 hacen parte de la Formación Picacho, la primera es una arenisca de grano medio a grano fino, moderadamente calibrada, granos angulares a subangulares y sobredondeados, presenta una compactación no muy buena; además, no presenta reactividad en HCl por lo que se descarta calcita como cementante. Su composición estimada y normalizada es de 50% de Cuarzo, 40% de feldespato y 10% de fragmentos líticos, se estima que su porosidad es medianamente apreciable. La otra presenta una matriz Arenosoportada, poco cementada, granos esféricos a subangulares, de contacto tangencial, un tamaño de gran fino a muy fino, hay presencia de feldespato alterado (intraclastos), Cuarzo y sílica secundaria, alta porosidad y está impregnada a diferencia de la P1 de crudo (Petróleo), la muestra, además, es bastante friable (Figura 10).

La muestra G-21 es una arenisca de tamaño de grano arena fina a media, presenta una matriz lodosa, poca cementación, arenosoportada, bien calibrada, angulares y no esféricas, contacto apreciado como tangencial, poco compacta, porosidad baja y en estado inmaduro. Lo anterior descrito es apenas una forma básica de observar la roca, para llegar a profundizar más acerca de

esta, se realizaron secciones delgadas a cada una de estas, a continuación, se exponen cada una y el estudio que involucraron.

## 7.2 Microscopía de luz transmitida



*Figura 11.* Microfotografías de secciones delgadas de 30 μm, Imagen de la izquierda está en nicoles paralelos y la de la derecha en nículos cruzados. Qz (Cuarzo), Ms (Muscovita) Ser (sericita), Chl (clorita), Plag (plagioclasa), Feld (feldespato), Alteración (en general sericítica).

La muestra P2 en sección delgada se ve por microfotografía de la Figura 11, tanto en nicols cruzados como en paralelos se aprecian granos de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ , sin casi o muy poca deformación de sus cristales, esto, además, deja apreciar la existencia de poros y una apariencia de buena porosidad, dentro de la cual es posible observar paquetes discretos en grupos de minerales, similar a la forma que la Caolinita se agrupa y se adhiere de forma leve a los poros de las rocas. Los cristales son esféricos subangulares a subredondeados, bien calibrada, algunos cristales de Cuarzo presentan extinción ondulosa, presenta Clorita, Biotita, Plagioclasa y traza de Piroxenos, sin embargo, es muy prominente la presencia de Cuarzo, la composición se representa en el triángulo de la Figura 11.

La muestra P1 (Figura 11) presenta cristales no deformados, exhibe Clorita y Micas en general, feldespatos alterados y un poco de materia orgánica. Por conteo de granos, se determinó 71.7% de Cuarzo, feldespatos en 14.6%, Muscovita en 5.9%, Clorita en 1.5% y otros en 6.3%. Presenta alteración de los feldespatos en un estado no muy avanzado. Hay aspectos entre los espacios porales que permiten observar gran cantidad de minerales de arcilla, los cuales se determinan por sus tonalidades marrones tanto en nicols cruzados como en nicols paralelos del microscopio petrográfico. P1 presenta cristales cercanos al rango de 200 a 150  $\mu\text{m}$ .

La muestra G-21 (Figura 11) presenta gran cantidad de Cuarzos y con un tamaño de grano grande, algunos de más de 500  $\mu\text{m}$ , presencia de Plagioclasa con alteración a Sericita, hay aspectos de muy poca porosidad y hay poca deformación de los cristales. En composición presenta 72% de Cuarzo, 18% de Plagioclasa y 8% de líticos y casi 1% de materia orgánica, es visible presencia en nicols paralelos de arcillosidad en zonas grandes, pero es difícil identificar el tipo de morfología.

La lámina delgada de FR-1 (Figura 11) presenta Cuarzo y feldespatos predominantemente, hay evidente y frecuente alteración, se observó poca Microclina y el feldespato se asoció más a plagioclasa, hay indudable deformación en zonas específicas de la muestra. En composición, 43% de Cuarzo, 29% de feldespatos y 28% de líticos.

La muestra T2 (Figura 11) presenta cristales grandes y cristales pequeños, no hay un buen calibrado, aunque es difícil de percibir, hay evidencias de deformación, crenulaciones en algunos cristales de Cuarzo y alteraciones de feldespatos. Composicionalmente presenta Cuarzo en 48%, plagioclasa en 12% y líticos en 39%, este último con gran cantidad de Sericita producto de la alteración de la plagioclasa.

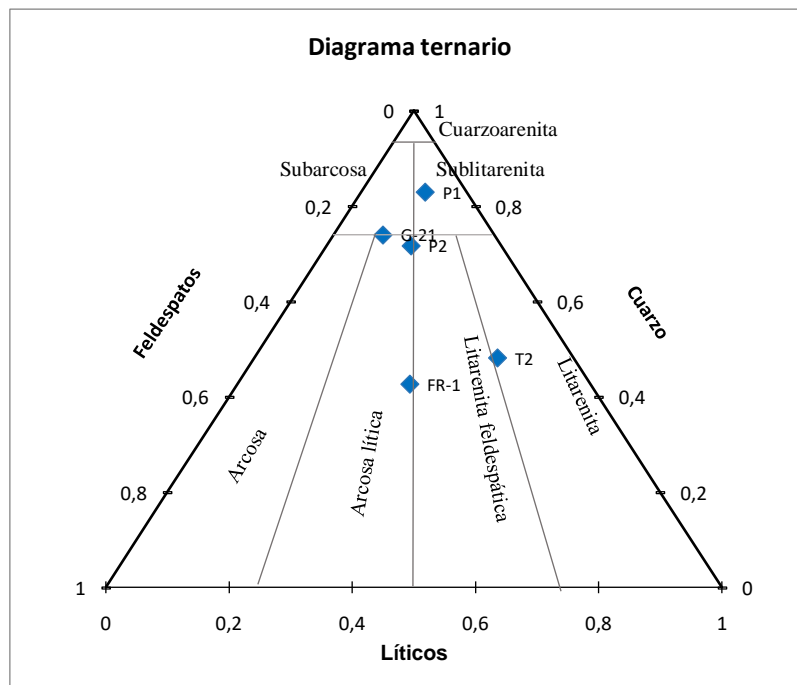


Figura 12. Diagrama ternario de clasificación composicional para las areniscas modificado de Folk (1974) citado por Cruz y Caballero (2007).

Según Cruz y Caballero (2007) las muestras presentan una clasificación composicional de areniscas según Folk (1994), la cual es la más usada por la industria petrolera, y que define como se muestra en la Figura 12 que P1 es una sublitarenita, la muestra P2 es una arcosa lítica, la muestra FR-1 es también una arcosa lítica con un porcentaje de Cuarzo inferior al 50% y muy cerca al límite de poder ser también una litarenita feldespática, T2 está en todo el límite de ser entre una litarenita feldespática o una litarenita, aunque presenta una mayor tendencia a esta última, la última muestra es la G-21 la cual es clasificada como una subarcosa con muy bajo contenido de Cuarzo. Es importante aclarar que durante el conteo que determinó la clasificación se presentaron inconvenientes debido a que muchas muestras tenían una composición donde predominaba en gran medida las alteraciones, con frecuencia sericítica, imposibilitando una buena toma de identificación de minerales, lo cual otras técnicas determinarían más información de las muestras.

Esta primera vista expuso en gran medida, que hay presencia de gran cantidad de minerales de fracción arcilla y casos como Muscovita y Sericita predominan, pues son los más visibles, también fue posible identificar paquetes discretos de Caolinita, en la muestra que mejor presencia de porosidad muestra (P2) y la cual no tenía alteración sericítica.

### **7.3 Parámetros petrofísicos obtenidos**

Como puede apreciar en la Tabla 1 se exponen los diversos datos de los parámetros petrofísicos analizados y obtenidos en las rocas siliciclásticas definidas como areniscas. Se presentan rangos de permeabilidad del aire entre 0.142 hasta 1,429.3 mD. En permeabilidad de Klinkenberg van de 0.057 a 1383.3 mD, Slipfactor (b) oscila entre 0.499 y 67.7 psi, el coeficiente inercial, entre resistencia inercial y resistencia viscosa, en esto casos estos oscilaron en valores altos para  $\beta$

(coeficiente inercial) entre (4,341,501,406,052 - 3,965,184 ft<sup>-1</sup>) y  $\alpha$  entre (1495 - 17.8  $\mu\text{m}$ ). También son el volumen real de poro que oscila entre 34.8 - 59.86 cm<sup>3</sup>, el volumen de grano (31.8 - 58.8 cm<sup>3</sup>), la presión confinada como condición de toma fue de 400 psi y por supuesto la porosidad que está dada entre 1.812-20.649%.

Tabla 1.

*Datos de los parámetros petrofísicos los plug de las muestras. Las comas indican valores en miles y los puntos indican decimales.*

Parámetro	FR-1	G-21	T2	P1	P2
<b>Longitud (mm)</b>	30.27	44.48	43.82	51.79	34.96
<b>Diámetro (mm)</b>	38.28	44.8	38.26	38.18	38.23
<b>Peso (gr)</b>	86.14	119.04	126.47	131.29	82.14
<b>Presión Confinada (psi)</b>	400	400	400	400	400
<b>Permeabilidad de Klinkenberg(m D)</b>	1.839	25.788	0.328	17.603	1383.28
<b>Permeabilidad del Aire (m D)</b>	2.408	29.220	0.568	19.888	1429.27
<b>Volumen de grano (cm<sup>3</sup>)</b>	32.902	44.670	47.850	49.403	31.801
<b>Volumen de Poro (cm<sup>3</sup>)</b>	1.883	6.109	2.459	9.798	8.275
<b>Densidad de Grano (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	2.618	2.665	2.643	2.658	2.583
<b>Porosidad (%)</b>	5.414	12.031	4.887	16.550	20.649
<b>Slipfactor, b (psi)</b>	4.642	1.997	10.927	1.947	0.499
<b><math>\alpha</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	730.836	1494.72	150.915	240.33	17.8
<b><math>\beta</math> (ft<sup>-1</sup>)</b>	122,729,975,800	17,900,851,104	141,943,982,977. 05	4,216,193,31 2	3,965,184

Nota: las comas indican miles y los puntos decimales.

En primer lugar, una vez definidos los rangos de variación de los resultados de los parámetros petrofísicos, es importante aclarar, que al realizar un estudio de petrofísica en rocas siliciclásticas, este se enfocaría en determinar a partir de la evaluación de los reservorios la calidad de los mismos.

Por ende, el análisis a continuación se pretende calificar con este enfoque evaluativo a las rocas de este estudio a partir de los resultados obtenidos en la Tabla 1.

La porosidad y la permeabilidad son las propiedades petrofísicas más importantes en la evaluación de yacimientos o en general de las rocas sedimentarias de interés económico. Estas dos propiedades condicionan la capacidad de las rocas para almacenar y transmitir fluidos (Pradana & Rossi, 2016). La investigación de las relaciones de porosidad y permeabilidad son fundamentales en rocas areniscas y las dolomías pues forman la mayor parte de acuíferos y reservorio de hidrocarburos, sin embargo, otros tipos de rocas también se les ha aplicado dichos análisis. Los análisis cualitativos de la calidad de las rocas a partir de la relación porosidad-permeabilidad están lejos de ser netamente cuantitativos, sin embargo, es visible la tendencia y también las excepciones, entre el gran rango de datos de porosidad y permeabilidad.

Antes de realizar un comparativo porosidad-permeabilidad, es necesario analizar independientemente los resultados obtenidos. De acuerdo a North (1985), la muestra FR-1 es calificada en porosidad como pobre y en permeabilidad como pobre, la muestra G-21 en porosidad es determinada como justa y en permeabilidad como moderada, la muestra T2 tiene una porosidad despreciable y una permeabilidad pobre, la muestra P1 en porosidad es calificada como justa y en permeabilidad como moderada; y, por último, la muestra P2 tiene una porosidad buena y una permeabilidad excelente. Los anteriores análisis se basaron en la permeabilidad del Gas (aire) y porosidad de la Tabla 1 respecto a determinaciones de la Tabla 2.

Tabla 2.

*Evaluaciones cualitativas propuestas de manera independiente de la porosidad y permeabilidad y los rangos de valores de cada intervalo de calidad.*

$\Phi$ (%)	Porosidad		Permeabilidad	
	Evaluación Cualitativa	Valor en mD	Evaluación Cualitativa	
<b>0 - 5</b>	Despreciable	< 1.0 – 15	Pobre a justa	
<b>5 – 10</b>	Pobre	15 – 50	Moderada	
<b>10 – 15</b>	Justo	50 – 250	Buena	
<b>15 – 20</b>	Bueno	250 – 1000	Muy buena	
<b>&lt; 20</b>	Excelente	>1000	Excelente	

Tomado de North (1985)

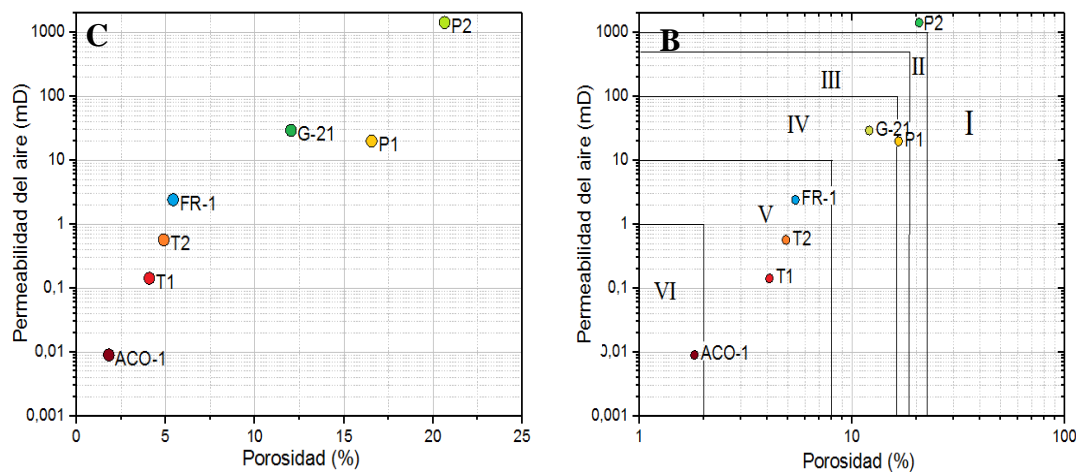
La calificación dada anteriormente, toma en cuenta a la porosidad y la permeabilidad de manera independiente, pero Shogenov *et al.* (2015) establece una relación entre la calificación de calidad de reservorios de hidrocarburos de Kharin (1965 y 1969) y otros autores que hablan sobre capacidad de almacenamiento de CO<sub>2</sub>, con el fin, de que a partir de dichas dos variables, identifique regiones en calidad y potencial de reservorio de las muestras (ver Tabla 3). En este sentido, en una clasificación de Grupos y clases, de I a IV que reflejan respectivamente niveles de muy buenos a muy malos en cuanto a calidad de ser reservorio de las rocas, se puede identificar en la Figura 13 que la muestra P2 es calificada con una calidad muy alta, la P1 presenta una calidad promedio, la muestra G-21 una calidad reducida, por último, las muestras FR-1 y T2 una calidad de reservorio baja.

Tabla 3.

*Clasificación de rocas que funcionan como reservorio de acuerdo a parámetros de Permeabilidad y Porosidad.*

Reservorios de Hidrocarburos					Estándar de Almacenamiento de CO <sub>2</sub>				
Grupo	Clase	Calidad	K	Φ	Grupo	Clase	Calidad	K (mD)	Φ (%)
1	I	Muy alta	≥ 1000	≥ 20	1	I	Alta	>500	>25
	II	Alta	500-1000	18-20		II	Preferida	>300	>20
	III	Promedio	100-500	14-18		III	Buena	50-250	15-20
2	IV	Reducida	10-100	8-14	2	IV	Comprometida	<200	<10
	V	Baja	1-10	2-8		V	Baja	<50	<15
	VI	Muy baja	<1	<2					

Adaptado de Shogenov *et al.* (2015), a la derecha reservorios de Hidrocarburos basado en Kharin (1965 y 1969) y a la derecha almacenamientos estándar de CO<sub>2</sub> modificado de Van der Meer (1993), Chadwick *et al.* (2006). Vangkilde & Kirk (2009), Tiab & Donaldson (2004) y Halland *et al.* (2013), todos citados por Shogenov *et al.* (2015).



*Figura 13.* Gráfica de los parámetros petrofísicos de permeabilidad y porosidad medidos en laboratorio ambos en escala logarítmica. B. Relación entre la porosidad (sin escala logarítmica) y la permeabilidad para establecer la calidad de reservorios de acuerdo a la Tabla 3 y a Shogenov *et al.* (2015).

No es necesario graficar a continuación el Estándar de Almacenamiento de CO<sub>2</sub>, pues la Tabla 3 establece una comparación y similitud entre los valores y clasificaciones de Reservorios de Hidrocarburos y del Estándar de Almacenamiento de este gas. Simplemente, como la muestra P2

fue muy alta en la parte de Reservorio de Hidrocarburos, en la otra clasificación su calidad es Alta; P1 es Moderada, en G-21 su calidad es comprometida, FR-1 y T2 su está calidad comprometida.

La permeabilidad y la porosidad no son los únicos parámetros que se pueden usar para establecer la influencia de diversos factores dentro de los espacios porales. Aunque son los básicos, existen por ejemplo el Coeficiente de resistencia inercial y el coeficiente de resistencia viscosa ( $\beta$  y  $\alpha$  respectivamente), que son indicadores de la relación de la porosidad, tortuosidad, permeabilidad, área de superficie específica, distribución de tamaño de grano, poros, y superficie rugosa (Jones *et al.*, 1987). La razón como ya se había explicado de la diferenciación de la resistencia inercial en dos parámetros ( $\beta$  y  $\alpha$ ), involucran principalmente el grado de homogeneidad o heterogeneidad de un reservorio.

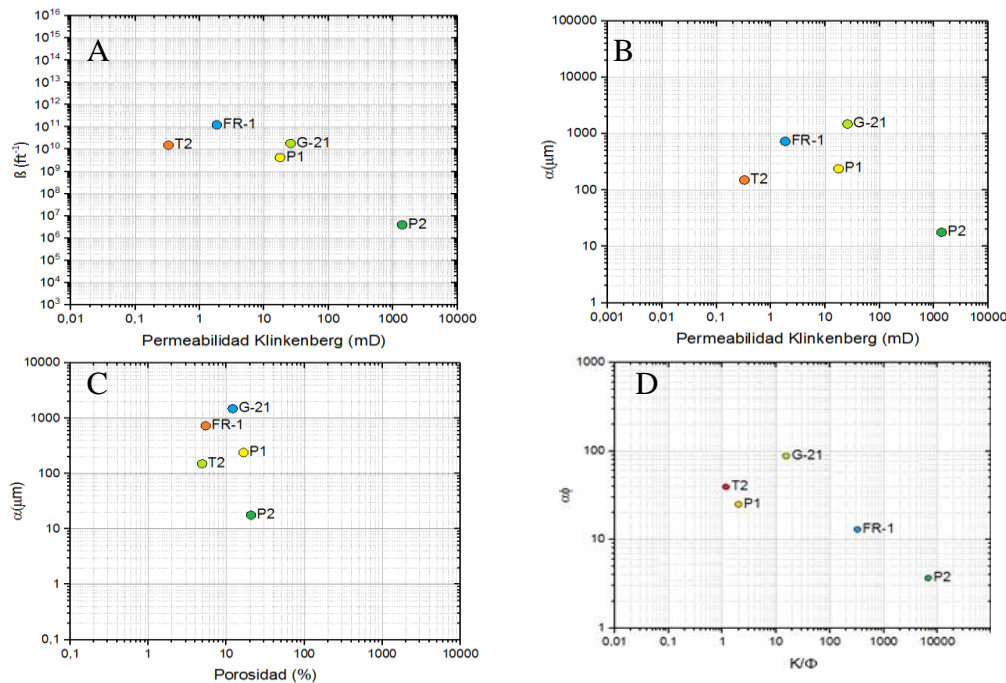


Figura 14. Gráficas de relación entre la permeabilidad del aire, la de Klinkenberg respecto a la porosidad y a los coeficientes de resistencias inercial y viscoso. D: La longitud característica en el número de Reynolds, modificado para tener en cuenta la corrección de velocidad debido a porosidad, que es  $\alpha\Phi$ , graficado contra  $K/\Phi$ ,  $K$ = es permeabilidad de Klinkenberg (Basado en gráficas de Jones *et al.* (1987)).

En la Figura 14 se grafican  $\alpha$  y  $\beta$  contra porosidad y permeabilidad que, de acuerdo a la literatura del Marco Teórico, es normal, que la resistencia inercial sea grande para valores altos de esta proporción y Jones *et al.* (1987) afirma que incluso a escala de plug, se presentan grandes afectaciones. Dicha influencia presenta al coeficiente inercial el cual está fuertemente influenciado por el grado de permeabilidad-heterogeneidad, y que la heterogeneidad puede ser la razón del porqué todas las correlaciones involucran que el Slipfactor ( $b$ ) exhiba mucha dispersión en sus datos (Fourar *et al.*, 2005; Jones *et al.*, 1987).

Es muy fácil empezar con la muestra P2, la cual sabemos que está impregnada de hidrocarburos, ésta como puede apreciar tiene valores de  $\alpha$  del orden de aproximadamente 18 ( $\mu\text{m}$ ), mientras que para el factor  $\beta$  los valores son cercanos a 4,000 millones ( $\text{ft}^{-1}$ ). Apreciando que es absurdamente mayor el  $\beta$  que el  $\alpha$ , representando entonces los enunciados que para altos valores de  $\alpha$  habrá mucha heterogeneidad y puede dar baja de productividad, mientras que P2 es su caso contrario, una roca que en reservorio tendría una homogeneidad considerable. El caso para P2 es diferencial respecto a los demás, los cuales en la Figura 14C-D no expone una clara relación entre la porosidad y el coeficiente  $\alpha$ , aunque, según Jones *et al.* (1987) la razón es que presenta muchos datos con alta dispersión, y con tan solo unas pocas muestras es difícil observar una tendencia, sin embargo, una dispersión refleja que a medida que  $\alpha\Phi$  disminuye con el incremento de la relación  $K/\Phi$ , se esperaría que la dispersión disminuyera con el aumento de  $K/\Phi$ . Cuando se graficó  $\alpha$  contra Porosidad (%) no se identificó una relación evidente, pero hay una tendencia (Figura 14D).

Se intentó identificar la relación de los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  respecto a la permeabilidad (Figura 14A-B), fue evidente la relación inversa entre  $\beta$  y la permeabilidad de Klinkenberg, usada en este caso de acuerdo a gráficas de Jones *et al.* (1987), en donde a mayor permeabilidad el coeficiente inercial era cada vez más bajo, la relación es evidente sólo una vez vista la gráfica y considerando

la dispersión alta que se dan en los casos de estos datos. Cuando se graficó  $\alpha$  contra Permeabilidad de Klinkenberg no se identificó una relación directa entre este factor y la permeabilidad para las muestras de estudio, sin embargo, hay una débil evidencia en cuanto la permeabilidad aumentaba, este factor en algunas muestras empezó a aumentar, con una alta dispersión; la muestra que no presenta este comportamiento es P2, la cual es friable, poco cementada y con calidad de reservorio definida como Muy Alta. En este sentido, las rocas que estaban más apretadas, según Jones *et al.* (1987) son más sensible al estrés neto, en este caso, las muestras bastante apretadas, es decir, de baja permeabilidad fueron consistentes con las gráficas, a nombrar, FR-1 y T2, mientras que G-21 presenta una calidad reducida de porosidad justa y permeabilidad moderada, su valor de  $\alpha$  es más grande que el de P1, reflejando existencia de fracturas o una posible heterogeneidad, en cuanto a su sección delgada, por ejemplo, observó muy poca porosidad.

Tanto coeficiente de resistencia inercial y coeficiente de resistencia viscoso son importantes en modelamientos de las rocas, en especial a escala plug, se generan por ejemplo, modelos simples de considerar que las propiedades de las rocas son estratos en ellas, con parámetros petrofísicos definidos y diferentes para cada una de las capas, a esto hace referencia los valores de estos coeficientes, que tanto cambian las propiedades como la permeabilidad en el volumen de roca en el modelo idealizado, siendo así identificado el contraste de permeabilidad (Fourar *et al.*, 2005).

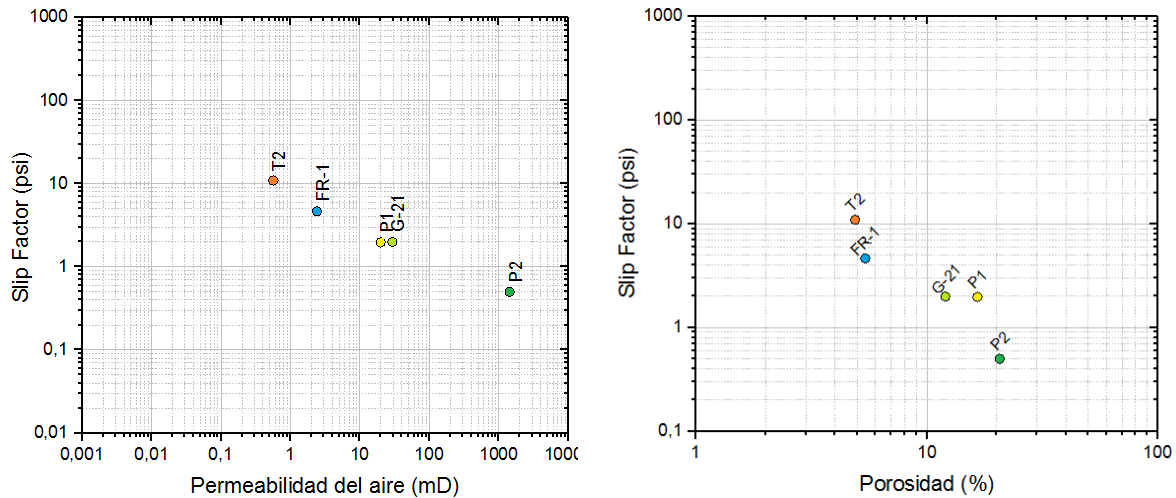


Figura 15. Relación entre Slipfactor y Permeabilidad del aire (Izquierda) y SlipFactor contra Porosidad (Derecha).

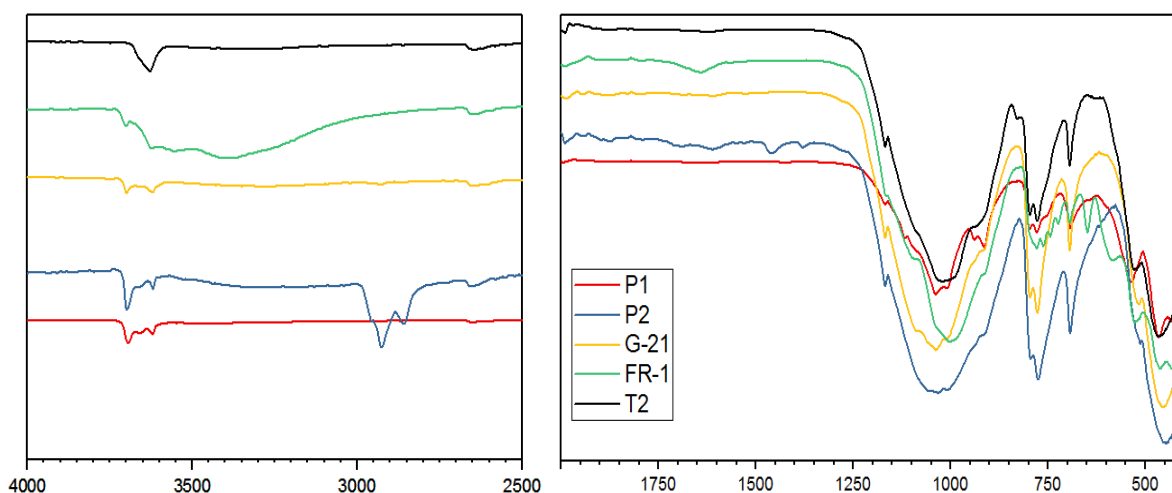
El Slipfactor como puede apreciar Figura 15 decrece con el incremento de la permeabilidad y porosidad. En un medio poroso lo anterior se presenta y puede ser afectado por la variación -como resalta Qingjie *et al.* (2002) de la función de distribución de los radios capilares. Tanto la permeabilidad como el Slipfactor dependen de la morfología del medio poroso, llegando a la relación de  $b \sim K^{-m}$ , donde  $b$  es el Slipfactor,  $K$  es permeabilidad absoluta y  $m$  es una constante que puede variar para diferente distribución de radios (Qingjie *et al.* 2002) Este factor, también es afectado en los procesos de flujo de gas-agua, en donde el Slipfactor del gas es perjudicado por la saturación de agua. Es general, el Slipfactor decrece con aumento de la saturación de agua, sin embargo, esto no es motivo de investigación en este trabajo.

En el marco teórico se expuso que el Slipfactor es una herramienta útil para permeabilidades bajas, aunque en la Figura 15 se aprecia claramente la relación directa entre este factor y la permeabilidad del aire de las muestras, es posible identificar que las muestras que tienen mejor representación lineal son precisamente las que están más apretadas o de más bajas

permeabilidades, como el caso de T2 y FR-1 en mejor proporción, y las que más se dispersan serían P1, G-21 y más dispersa aún, la muerta P2. Además, G-21 la cual tiene una porosidad menor pero mayor permeabilidad que P1, en su coeficiente de viscosidad ( $\alpha$ ) indica que su medio puede presentar bastante heterogeneidad, de acuerdo a también, la gráfica de Figura 14-B.

En la gráfica del Slipfactor contra porosidad es evidente la relación directa de las muestras en donde resalta que a mayor porosidad el Slipfactor se reduce. G-21 y P1 presentan una dispersión un poco distinta al comportamiento

#### 7.4 Espectroscopía Infrarroja con la Transformada de Fourier (FTIR)



*Figura 16.* Espectros Infrarrojos (MID-IR) con ATR de las muestras de este estudio mostrando las vibraciones entre 400-4000  $\text{cm}^{-1}$ . En las muestras se recortó la región 2400-1800  $\text{cm}^{-1}$  por ser una señal producto del diamante del equipo.

El espectro Infrarrojo Medio (MID-IR) de la muestra P1 se expone en la Figura 16 se destacan las vibraciones principales de tres partes, la región entre 3800 a 3000  $\text{cm}^{-1}$  que corresponde a la región de estiramiento de los hidroxilos o enlaces O-H, y que involucra también agua estructural en las moléculas. Seguido viene una región de ruido entre 2500 – 2000  $\text{cm}^{-1}$  el cual pertenece al equipo

y no a la muestra, y luego la parte de huella digital, donde vibran las moléculas como Si-O, Si-Al-O, entre otras. Señales en 3690, 3664 y 3620, se hace visible similitud con el espectro de la Caolinita, en esta región del espectro infrarrojo Gates *et al.* (2017). 1036, 1010 y 940  $\text{cm}^{-1}$  es atribuido a Caolinita, estas vibraciones pueden deberse a enlaces Si-O y Si-Al-O de la molécula. El Cuarzo se detecta en picos de 1136, 797, 780 y 694 de acuerdo a Signe Vahur (2018). Puede existir plagioclasa en señales de 537, 606 y 756  $\text{cm}^{-1}$  (Lafuente *et al.*, 2015). Aunque algunas señales pueden también darse para Micas.

La muestra P2 (Figura 16) presenta vibraciones en regiones de estiramiento de hidroxilos, la región de estiramiento de enlaces de carbono, y obviamente la huella digital. Se caracteriza por presentar unas cuatro señales y formas de picos atribuidos a Caolinita (Mejía *et al.*, 2012). Se destaca señales en 2954, 2924 y 2850 atribuidas a enlaces de carbono con hidrógenos y oxígenos, característica de hidrocarburos. Además, se destaca señales en donde vibra en forma deformacional el agua (1698, 1603  $\text{cm}^{-1}$ ) aunque esta parte es atribuida más a vibraciones del enlace con el carbono. El Cuarzo se detecta en la región huella digital en 1163, 1008, 795, 777 y 693. Puede existir Micas debido al pico en 1033 y 618  $\text{cm}^{-1}$

G-21 se muestra en el tercer espectro de la Figura 16, en la región de los estiramientos de los hidroxilos, se caracterizan tres picos relacionados a la Caolinita, además, en 1611  $\text{cm}^{-1}$  puede ser Micas, al igual que las dos anteriores muestras, Gates *et al.* (2017) establece que las formas y señales de los picos puede determinar el tipo de Cándida a la que pertenece, que en los tres espectros se correlacionó a Caolinita, quien también vibra en 1003, 912 y 454  $\text{cm}^{-1}$ . Illita se detecta en 1030 (Micas para evitar confusión), cerca de 600  $\text{cm}^{-1}$  pueden haber MnO.

El espectro de la muestra FR-1 analizado en un equipo FTIR se observa en la Figura 16. Presenta vibraciones en la región de estiramiento de los hidroxilos, que, en particular a las anteriores, esta

presenta moléculas de agua presentes en la estructura de los minerales arcillosos. Estos espectros son características de las Esmectitas y las Vermiculitas, aunque no se descarta la Clorita, debido a que presenta similitudes en esta región, esto se define por correlación de picos y espectros entre la base de datos RUFF de Lafuente *et al.* (2015), Gates *et al.* (2017) y Signe Vahur (2018). Se destaca una señal en  $3700\text{ cm}^{-1}$  atribuida a Caolinita, en  $1638$  puede haber vibraciones de Esmectita o Micas (Kuligiewiez *et al.*; Pironon *et al.*, 2003). En la región huella digital, se destaca la doble banda (aunque algunos dicen que no es doble banda) del Cuarzo en  $780$  y  $800$ , en el espectro se destaca señales en  $695$ ,  $1162$ ,  $1088$  vibraciones Si-O para el mismo mineral. La señal en  $756$  números de onda es atribuida a Micas,  $830\text{ cm}^{-1}$  puede representar Esmectita. Plagioclasa con una similitud de espectro en Albita se puede identificar en  $1097$ ,  $790$ ,  $723$ ,  $528$  y  $464$  números de onda (Signe Vahur, 2018). Mientras que  $586$  puede representar Microclina, aunque es atribuida es en  $580$  por Ramasamy *et al.*, 2009.

La muestra T2 es la última muestra y se observa su espectro FTIR en la Figura 16. Destaca presencia de arcillas por la región de estiramiento de hidroxilos y  $1625\text{ cm}^{-1}$ . En general, se detecta posible presencia de Micas, en  $3641$ ,  $1625$  y  $831$  números de onda (Esmectita también). El Cuarzo se identifica en  $1164$ ,  $1075$ ,  $800$ ,  $780$  y  $695\text{ cm}^{-1}$ . Un hombro en  $935$  puede deberse a Caolinita, detectada, además, en  $464$  y  $529$  números de onda. La señal en  $630$  puede estar asociada a Cuarzo, Micas o Plagioclasa. Otras técnicas deberán corroborar cada una de las señales presentadas y establecidas en esta sección. Esta es la primera técnica química, debido a la rapidez de su adquisición.

## 7.5 Espectroscopía Raman (Raman)

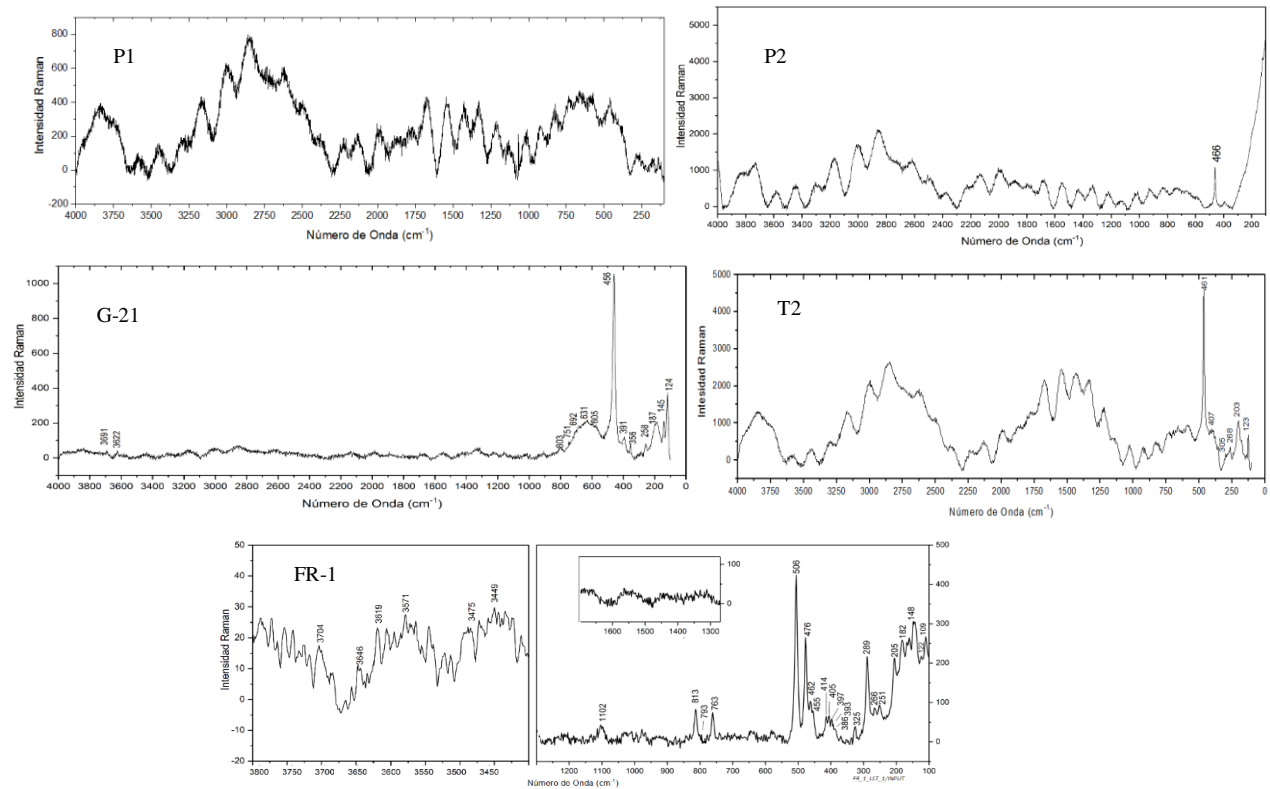


Figura 17. Espectros Raman de las cinco muestras de este estudio en conteos por grados de  $2\theta$ . S: esmectita, V: vermiculita, Chl: clorita.

Los espectros Raman se muestran en la Figura 17, estos se analizaron con un láser de 532 nm al 50%, con un acercamiento de 100X, cinco escaneos en 10 acumulaciones, entre el espectro 4000 a  $100\text{ cm}^{-1}$ . En verdad, los espectros Raman no presentaron buena información y rescatar de ellos resultó una tarea dispendiosa y de poca aportación al trabajo de caracterizar los minerales arcillosos. Se destaca, entonces, que la muestra FR-1 en donde a partir de Lafuente *et al* (2015) se establece que el Cuarzo se detecta en 122, 205, 461 y 813 números de onda. La plagioclasa se detecta en 1102, 506, 476. Wang *et al.* (2015) establece que un primer criterio en el análisis de los espectros Raman de filosilicatos o en general de los minerales de la arcilla, es distinguir que tipo de filosilicato son, es decir, distinguir entre dioctaédricos y trioctaédrico a partir de las posiciones

fuertes de picos Raman en modos Si-O-Si en el rango entre 800-600  $\text{cm}^{-1}$ , de acuerdo a ello, estos autores encontraron que vibraciones mayores a 700  $\text{cm}^{-1}$  fueron atribuidos a filosilicatos dioctaédricos y los menores 700  $\text{cm}^{-1}$  para grupos trioctaédricos. Por ende, el mineral arcilloso más representativo de la muestra debe ser dioctaédricos (763  $\text{cm}^{-1}$ ). En la misma muestra, se destaca presencia de minerales arcillosos por vibraciones en 3475 y 3600  $\text{cm}^{-1}$ . El espectro Raman es útil para determinar el contenido de agua dentro de las arcillas, soluciones altamente saturadas Ligny (2003). 3619 y 3619 son atribuidos a Caolinita. Puede que 1092 y 1034 sean atribuibles a Esmectita.

La muestra G-21, es otra muestra que su espectro es aceptable, se destacan señales de Cuarzo en 120, 258, 456, 692, y 808 números de onda. Es difícil distinguir entre minerales arcillosos dioctaédricos y trioctaédricos, donde quizás haya filosilicatos trioctaédricos. Caolinita se detecta de acuerdo a señales de Frost (1997) entre 120 y 145  $\text{cm}^{-1}$ , el mismo mineral se detecta en 3619 y 3691. Illita no es claramente detectable, pero Moncada & Bodnar (2012) atribuye 639 a Illita y G-21 presenta 630 números de onda. Plagioclasa se detectaría en 605 y 692 (Freeman *et al.*, 2008) o ser alguno de esos un mineral arcilloso trioctaédrico.

Las otras muestras, P2, P1 y T2, no se les fue posible analizar los espectros. P2 presenta hidrocarburos, P1 presenta posible presencia de cemento de carbonatos, mismo caso que puede presentar T2.

## 7.6 Difracción de Rayos X

Lo que empezó como el estudio de las arcillas de suelos ha sido extendido a muchas de las otras ramas de las geociencias, en especial, la caracterización de los minerales de la arcilla para la

industria del petróleo y de materiales. Los estudios de difracción de rayos X (DRX) tienen en cuenta el espaciado de las capas (Dontsonova *et al.*, 2004). La técnica del pulverizado de muestra para rayos X es una poderosa técnica que es comúnmente usada para estudiar la cristalinidad de los minerales (Theiss *et al.*, 2012). La difracción de rayos X necesita que las especies minerales cumplan la condición de tener una estructura cristalográfica definida, pues la información obtenida de la interacción de la frecuencia de rayos X y los cristales se basa en la difracción producida por un conjunto de átomos en un arreglo que está ordenado (Betancourth *et al.*, 2010).

Los especímenes seleccionados fueron molturados y homogenizados en un mortero ágata. Posteriormente, los especímenes seleccionados de la muestra fueron montados en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal. La toma se realizó en un difractograma de polvo marca Bruker modelo DB advance con geometría DaVinci, previo a esto, los especímenes fueron mezclados y homogenizados con una cantidad conocida de un estándar interno denominado “Aluminum oxide Corundum,  $\alpha$ -phase”.

En esta sección que expondrá los espectros de los rayos X o difractogramas de las muestras, en búsqueda de dar certeza a los análisis realizados por la espectroscopía Raman e Infrarroja. Esta técnica, además, corroborará estudios más específicos a la de los minerales arcillosos para intentar representar un análisis semicuantitativo en las muestras.

**7.6.1 Muestra FR-1.** La muestra FR-1 en el análisis de difracción de rayos X (DRX) genera los espectros del Cuarzo y el estándar de Corindón representativos en  $2\theta$  de 26.7 y 35.1, respectivamente. Se detecta presencia de Caolinita e Illita en 12.3 y 8.8 del eje de  $2\theta$ , esto se realizó mediante el análisis por similitud de espectros en el programa de computadora Diffract Evaluation de la marca Bruker, sin embargo, la señal de 6.2  $2\theta$  que no la correlacionó el programa fue atribuida por comparación con los espectros de Menking *et al.* (1993), Guarino *et al.*, (1997), y Christidis & Koutsopoulou (2013), los cuales dejan en duda sobre si 6.2  $2\theta$  haya presencia de Esmectita, Clorita e incluso con enunciados de Walker (1957) puede esta parte ser atribuida a Vermiculita, descartando con estos autores, la existencia de un interestratificado o capas mezcladas de minerales de arcilla.

La plagioclasa fue atribuida a señales de 13.9  $2\theta$  y unos tres picos siguientes entre 22 y 24.5 en  $2\theta$ . Esta plagioclasa con el software de análisis tuvo una mayor coincidencia con específicamente una plagioclasa albita (Figura 18).

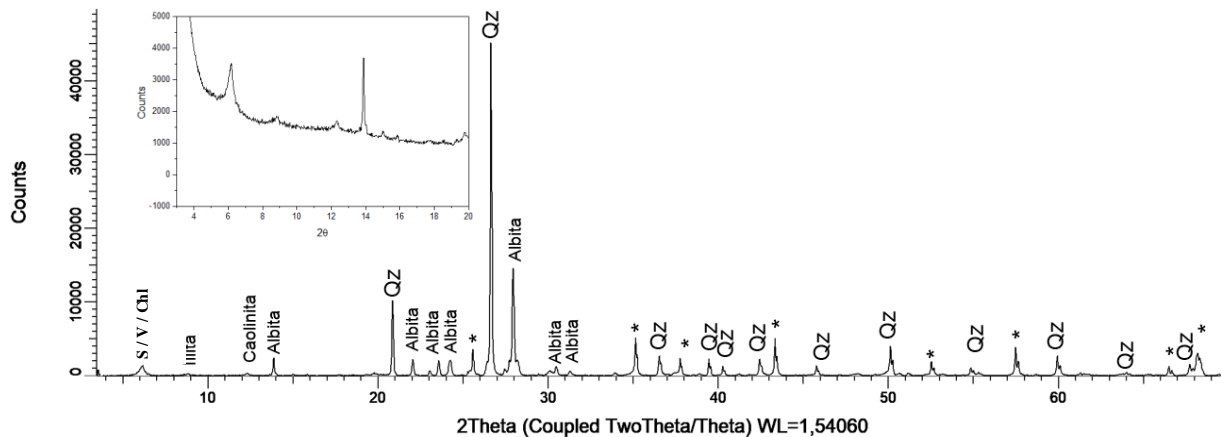


Figura 18. Difractograma del total de roca de la muestra FR-1, en conteos por grados de  $2\theta$ . S: esmectita, V: vermiculita, Chl: clorita.

En la Figura 19 se muestran los difractogramas de la fracción arcilla que se realizó a todas a la muestra FR-1. En general, la dificultad en el total de roca y su difracción, obligó a realizar otras tomas mejores por lo que los agregados orientados fueron usados y tratados, con el fin de establecer qué tipo de minerales de arcilla presenta esta roca. Dicho tratamiento manifiesta descartar la presencia de Clorita, logrando definir existencia de Esmectita y Vermiculita. El tratamiento de calentar la muestra (difractograma rojo en Figura 19 logra que el pico de  $14.13 \text{ \AA}$  se reduzca a  $11.87 \text{ \AA}$ , este cambio es más parecido al de la Vermiculita calcinada que el de la Esmectita bajo las mismas condiciones. Por otro lado, al someter al etilenglicol el pico  $14.13 \text{ \AA}$  ( $6.26 2\theta$ ) este no sufre el comportamiento de aumentar su distancia  $d$  y su señal dirigirse hacia la izquierda, comportamiento descrito por Campos *et. al.* (2009). Sin embargo, no se descarta un poco presencia de Esmectita, la cual está en muy poca cantidad y no representa el pico  $14.13 \text{ \AA}$ , sino un tenue aumento de la distancia  $d$  en  $5 2\theta$  en el tratamiento con etilenglicol.

Al tamaño de la fracción arcilla, se evidencia Cuarzo en  $20.8$  y  $26.5 2\theta$ ; albita y Micas en  $17.8$ ,  $19.7$ ,  $26.6$ ,  $27.7$  de  $2\theta$ . Las Micas anteriores, en  $10.01$ ,  $4.98$  y  $3.3 \text{ \AA}$  hacen alusión a la Illita. La Caolinita colapsa en  $11 2\theta$  ( $7.63 \text{ \AA}$ ) y  $25 2\theta$ , sin embargo, puede apreciar que, al calentar esta muestra, no todo es espectro se fue, por lo que sugiere la presencia de Clorita.

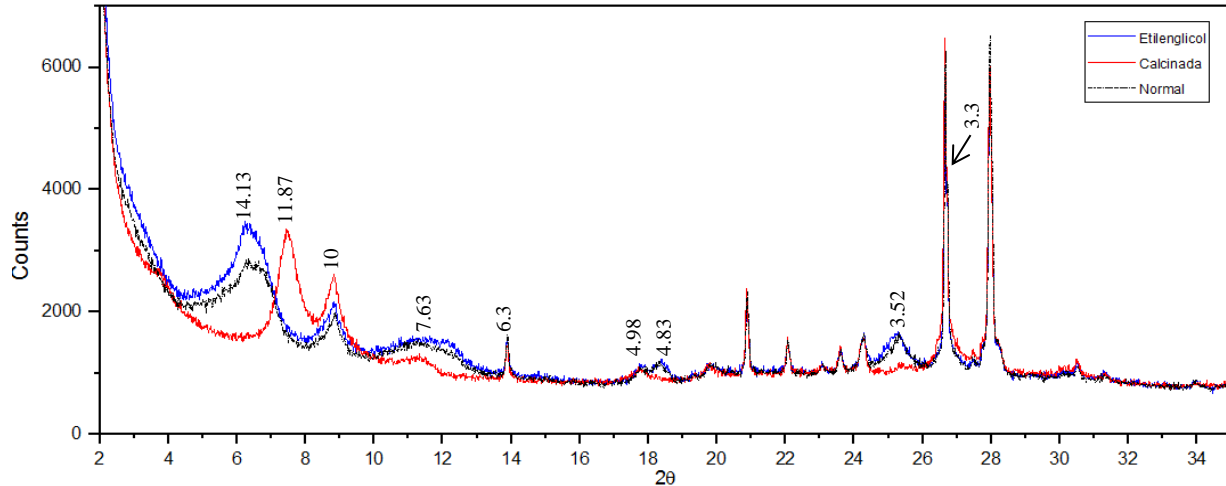


Figura 19. Difractogramas de la fracción arcilla en la muestra FR-1. Las muestras fueron realizadas en agregados orientados, tratadas en: etilenglicol (azul), otra calcinada a 500°C (rojo) y la otra secada normalmente (negro). Las etiquetas en la parte superior de las señales son el espaciamento  $d$  medido en Å.

**7.6.2 Muestra G-21.** El difractograma de la muestra G-21 (Figura 20) solo detecta señales atribuidas a Cuarzo en señales de 20.8, 26.7, 36.5 en  $2\theta$  y a Illita 8.8 en  $2\theta$ . Cabe resaltar que se ha hecho la evaluación con el mismo software que se han trabajado las muestras anteriores. Resaltar también, la dificultad debido a la presencia de Cuarzo, este y sus señales oculta la posibilidad de que haya una reflexión en otras especies, debido a su gran cantidad en la muestra (Justo y Morillo, 1999).

En torno al análisis de la fracción arcilla de la muestra G-21 que se muestra en la Figura 21, se destaca Cuarzo en 20.8 y 26.6  $2\theta$ . Micas se destacan las señales de 26.7, 17.8 y 8.9 en  $2\theta$ , la Mica indicaría también presencia de Illita, debido a que se encuentran a 9.97, 4.97 y 3.34 Å, señales que se le atribuyen. Por el lado de la Caolinita, se detectó como puede apreciar en el espectro orientado y tratado con temperatura de (500 °C) que este mineral colapsó en 12 y 25  $2\theta$ , es decir, en 7.22 y 3.56 Å.

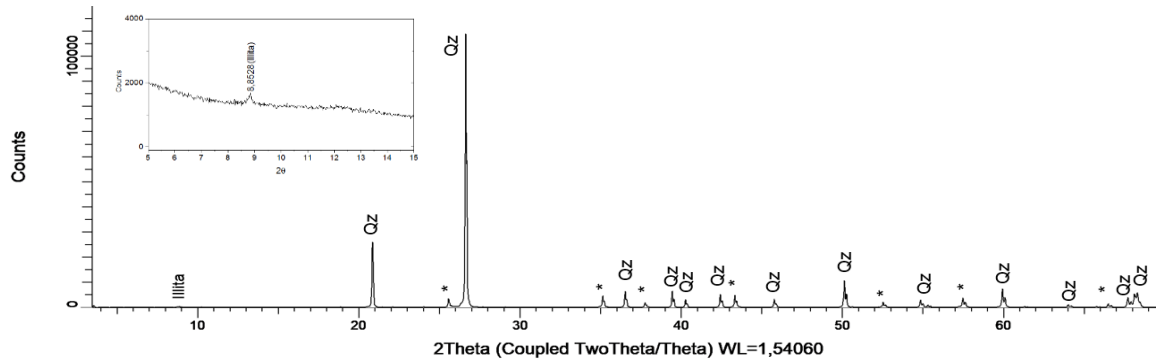


Figura 20. Difractograma de muestra total de G-21, la illita se determinó por relación al programa Difract Evaluation de Bruker, sin embargo, es aconsejable determinar que a este nivel de análisis la illita hace más representativo que haya micas. Cada etiqueta del eje vertical corresponde a 5000 conteos.

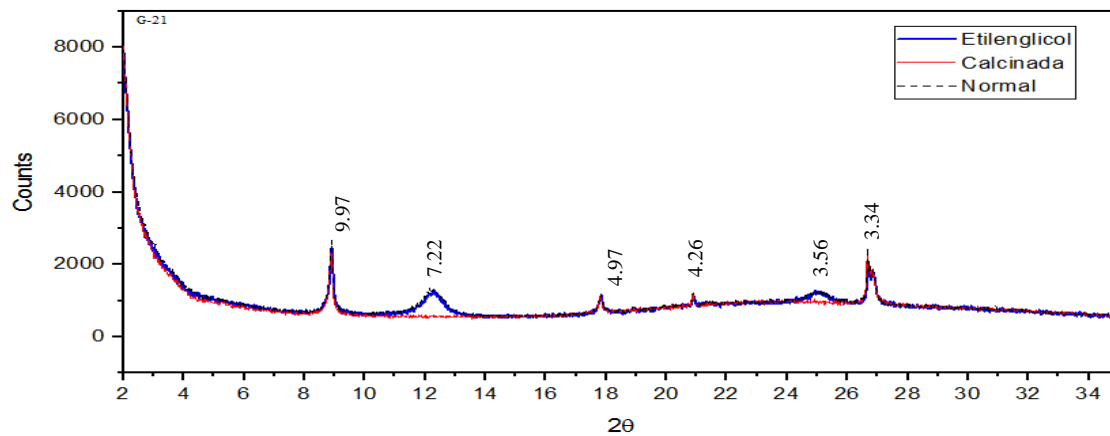
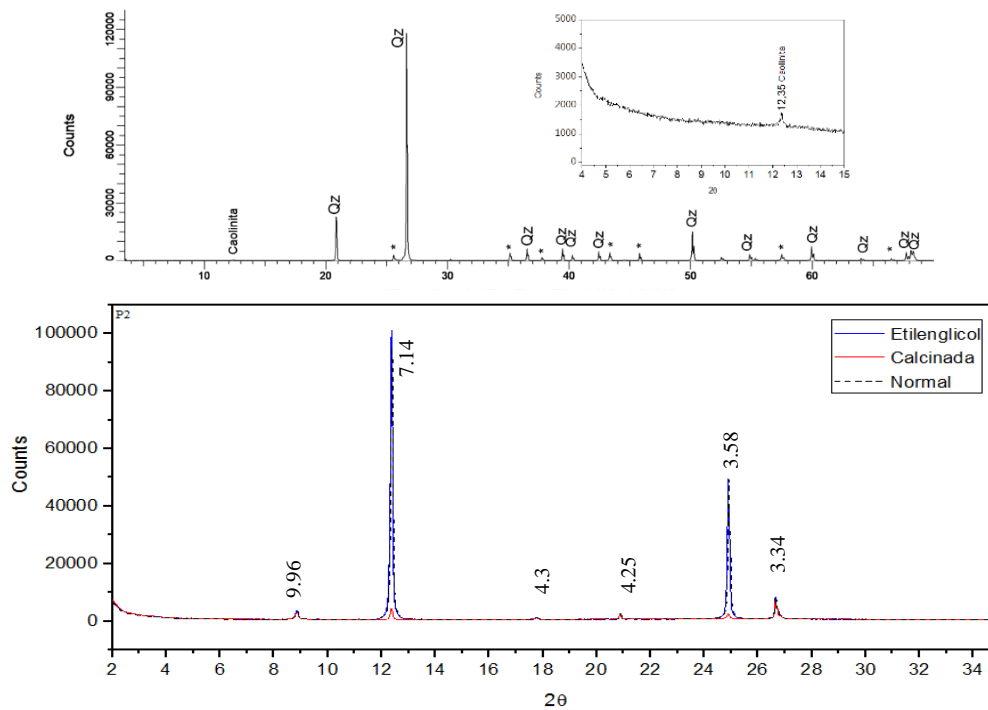


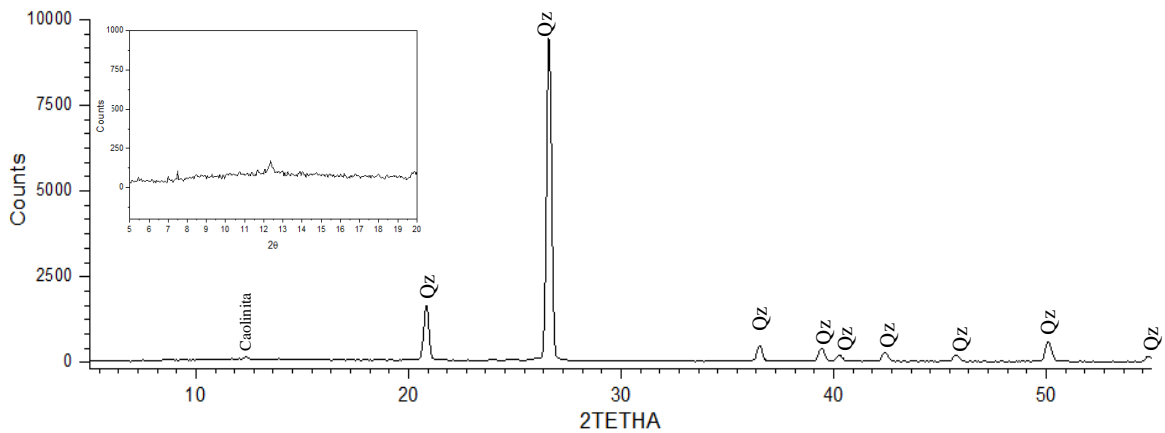
Figura 21. Difractograma de la fracción arcilla de la muestra G-21. Las muestras fueron realizadas en agregados orientados, tratadas en: etilenglicol (azul), otra calcinada a 500°C (rojo) y la otra secada normalmente (negro). Las etiquetas en la parte superior de las señales son el espaciamiento  $d$  medido en de las señales son el espaciamiento  $d$  medido en Å.

**7.6.3 Muestra P2.** En esta muestra fue detectada Caolinita en 12.4 de  $2\theta$ , el Cuarzo presenta señales expuestas en la Figura 22, característicamente se distinguen los picos en 20.8, 26.8, 50.2 de  $2\theta$  entre otras señales. Para la fracción arcilla de esta muestra (Figura 22) se resaltan unos picos altos en 12.4 y 24.9 en  $2\theta$ . Se destaca el Cuarzo en 20.8 y 26.6  $2\theta$ , las Micas de la fracción arcillosa se pueden detectar para las señales 8.8, 17.8 y 26.8  $2\theta$ , que son las etiquetas para 9.96, 4.97 y 3.34 Å. En señales de 12.4 y 24.9  $2\theta$  se detectó en el mismo software utilizado, la presencia de Caolinita, la cual, en el difractograma calcinado (rojo) este mineral colapsó, aunque debe haber una mezcla con otro mineral o que exista Clorita en la muestra y por eso no colapsó del todo las señales en 7.14 y 3.58 Å.



*Figura 22.* Difractograma del total de roca y fracción arcilla de la roca P2. Las muestras fueron realizadas en agregados orientados, tratadas en: etilenglicol (azul), otra calcinada a 500°C (rojo) y la otra secada normalmente (negro). Las etiquetas en la parte superior de las señales son el espaciamento  $d$  medido en Å

**7.6.4 Muestra P1.** La Figura 23 expone el difractograma de la muestra P1, esta fue realizada con un equipo de baja resolución, pero que para estos análisis es suficiente. Expone al Cuarzo para señales de 21 y 26.8  $2\theta$ . Es difícil observar otros minerales como plagioclasas, sin embargo, para la parte de las reflexiones de arcillas, se destaca la presencia de Caolinita en 12.3  $2\theta$ .



*Figura 23.* Difractograma de la muestra P1 del total de roca.

La Figura 24 expone los espectros de las fracciones arcillosas de la muestra P1. Se destaca principalmente la presencia principal de Caolinita, la cual colapsa al ser calcinada (espectro rojo) en los 12.5 y 25 de  $2\theta$ . En cuanto a las otras reflexiones observadas, se destacan micas en general y la Illita en 8.8 en  $2\theta$  (10, 5 y 3.3  $\text{\AA}$ ), el Cuarzo es también observado en la fracción arcilla en las señales características de 20.8 y 26.6 de  $2\theta$ . A diferencia de la fracción arcillosa de la muestra P2, la señal de 7.15 y 3.57  $\text{\AA}$  casi que totalmente, descartando la Clorita.

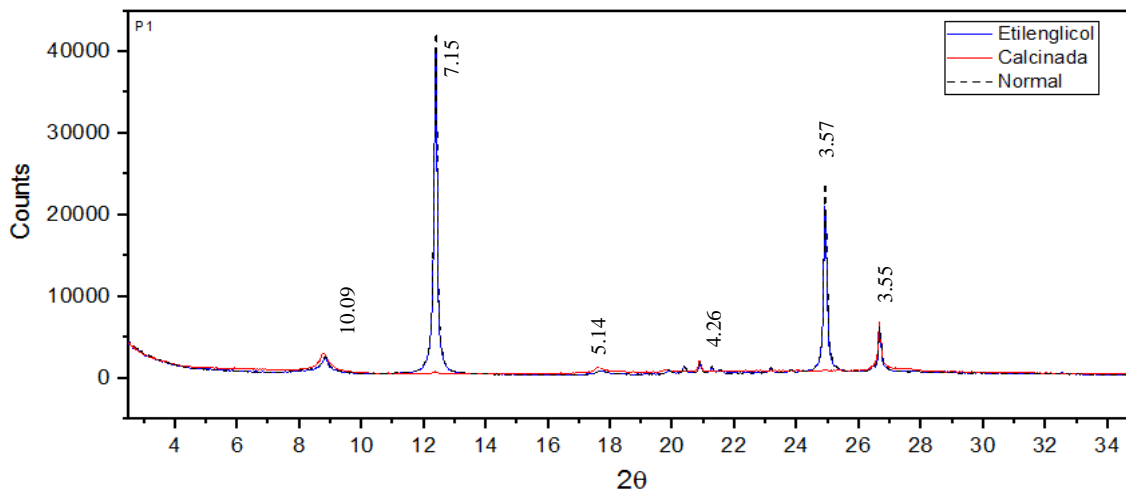


Figura 24. Diffractogramas de la fracción arcilla de la muestra P1. Las muestras fueron realizadas con los misma tratamientos que las anteriores.

**7.6.5 Muestra T2.** Esta presenta señales atribuidas por el software como Illita en 8.8 y 18.8 en  $2\theta$ . El Cuarzo tiene los mismos picos característicos de las muestras anteriores, sus más representativos son 20.8, 26.7 y 50.4 en  $2\theta$ . En los difractogramas de la fracción arcilla destacan la presencia de Micas, que en general, agrupa a todas las micas incluyendo a la Illita, estas reflexiones se encuentran en 8.8, 17.8 y 26.7 de  $2\theta$ ; es visible encontrar en menor medida a Caolinita, la cual en el difractograma calcinado (rojo) de la Figura 25, muestra colapsos de señales en 12.6, un poco de 21.5 y 25 de  $2\theta$  (4.16 Y 3.57 Å). El Cuarzo en la fracción inferior a 0.04 milímetros también se observa en señales de 26.5 y 20.8 de  $2\theta$ .

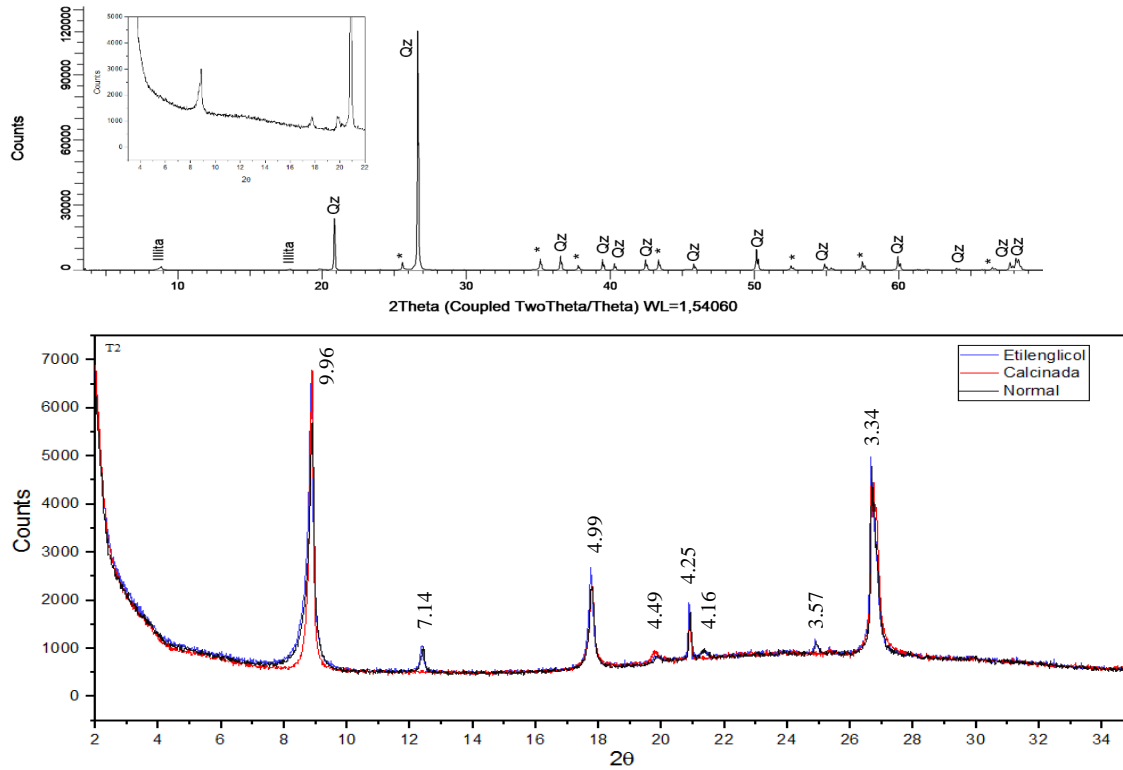


Figura 25. Superior se muestra difractograma de la muestra T2 en el total de roca. En la inferior, los difractogramas de la fracción arcilla. Las muestras fueron realizadas en agregados orientados, tratadas en: etilenglicol (azul), otra calcinada a 500°C (rojo) y la otra secada normalmente (negro). Las etiquetas en la parte superior de las señales son el espaciamiento  $d$  medido en Å.

## 7.7 Cuantificación de las Fases Minerales de Difracción de Rayos X

La cuantificación de las fases minerales a través de procesamiento Rietveld, se realizó en el Software TOPAS de la marca Bruker. En general, los errores calculados para las muestras fueron bajos, T2 tuvo un  $R_{wp}$  de 8.292, y para FR-1, G-21, P2 y P1, tuvieron errores  $R_{wp}$  de 8.807, 8.197, 8.292 y 9.159, respectivamente. Los anteriores se consideran errores aceptables.

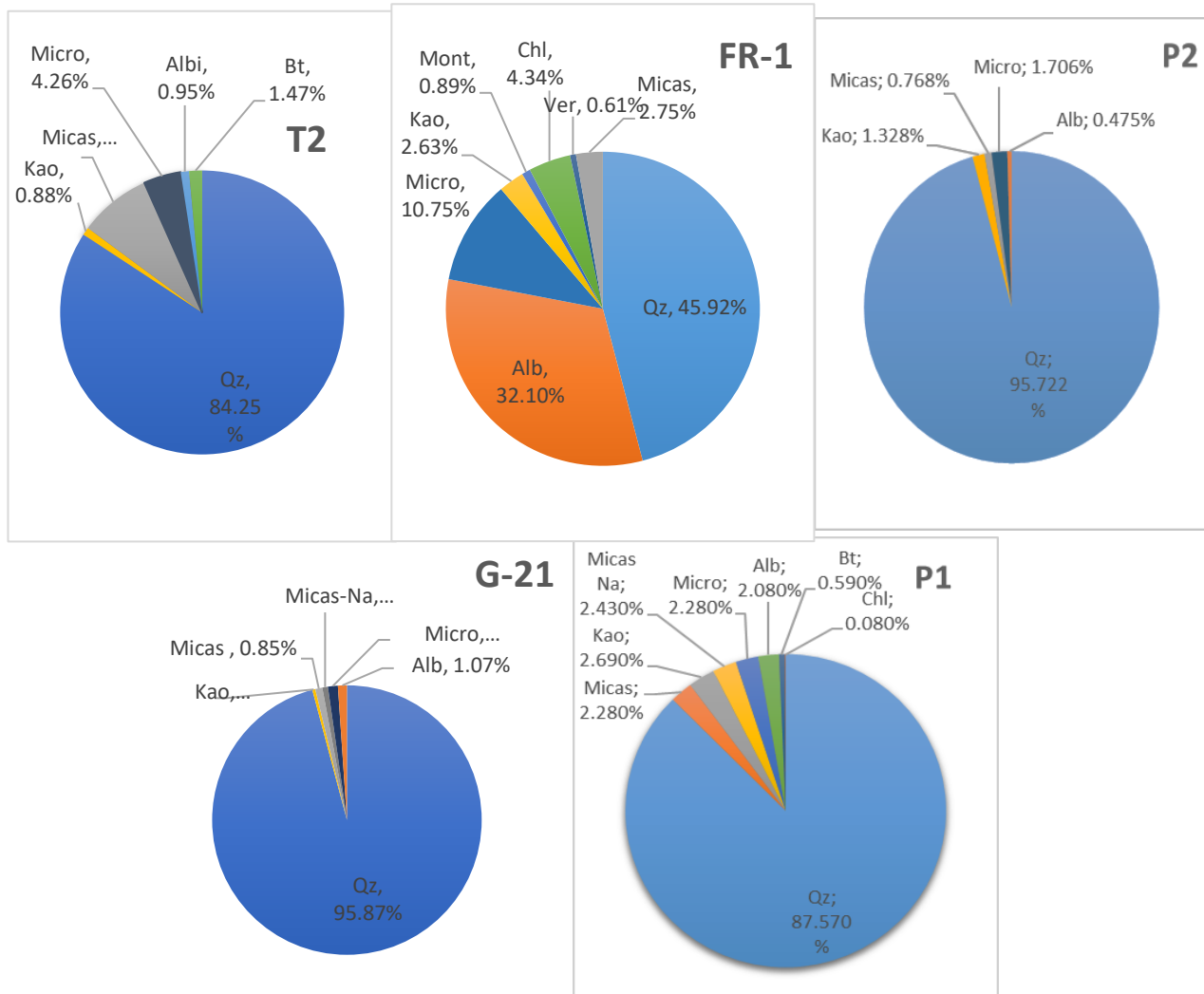


Figura 26. Cuantificación por el procedimiento Rietveld de las cinco muestras. por el procedimiento Rietveld de las cinco muestras.

En la mayoría de las muestras el Cuarzo supera los 85% del total de roca. En cuanto a minerales de la arcilla, en Caolinitas, la muestra G-21 presenta 0.36%, FR-1 con 2.63%, T2 con 0.88%, P2 con 1.33% y P1 2.7%. Solamente la muestra FR-1 presenta Clorita cuantificable en 4.34% del total de roca, igualmente solo fue cuantificable en esta misma muestra un poco de Montmorillonita en total de 0.31, en la misma muestra se cuantifica Vermiculita y un grupo grande de Micas. En

general, FTIR, Raman, DRX, y SEM ayudó a identificar los minerales que entran a la cuantificación y se obtienen los resultados en la Figura 26.

## 7.8 Microscopía Electrónica de Barrido

A continuación, se presentarán las micrografías analizadas en los equipos SEM. Estas están en recubrimiento en oro y grafito en algunas muestras, las características diferentes, es que el oro permite en parte que los picos de la materia orgánica se noten mejor sin sobreestimación del grafito en las muestras, mejora la calidad de las imágenes. Además, algunas de las muestras se procesaron en presión variable pues en oro tienden a cargarse más las imágenes.

**7.8.1 Muestra FR-1.** Las micrografías expuestas para la muestra FR-1 analizada en SEM se observan en la Figura 27A. Dicha muestra presenta un tamaño de grano entre [107-317]  $\mu\text{m}$ , y permite inferir un promedio de  $188 \pm 93$  (Intervalo de confianza 95% de 43). Las dimensiones del tamaño del poro oscilan entre [4 – 30.4  $\mu\text{m}$ ] y en promedio se puede inferir  $14.11 \pm 7.69$  (Intervalo de confianza 95% de 3.657).

La micrografía de la Figura 27B, se observa que la predominancia de los minerales de arcilla es en los poros y esta mayoría son del grupo de las Micas. Además, la Figura 27C, expone una micrografía con una morfología diferente a esta mica y su EDS evidencia presencia de Esmección, cuya morfología no es común como la reportada por la literatura, pero puede deberse a la interacción con la Illita. En trazas es posible observar óxidos de hierro como el espectro y la micrografía de la Figura 27D lo muestra, en esos agregados botroidales y el tono de grises, junto con las micas de tamaño de grano de aproximadamente  $2\mu\text{m}$ , definiéndolas como Illitas.

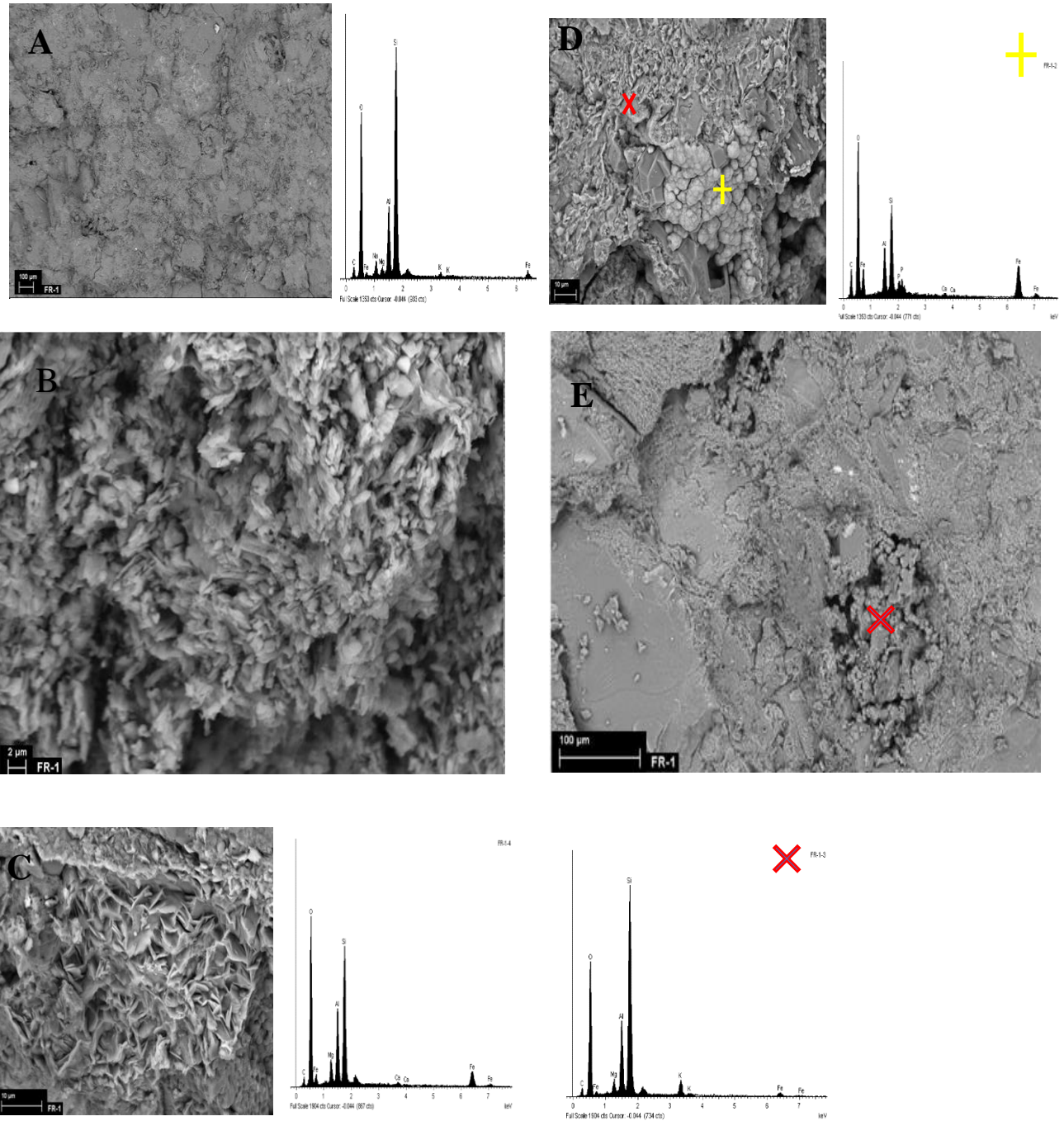


Figura 27. Micrografías analizadas en SEM de la muestra FR-1, con recubrimiento en oro.

**7.8.2 Muestra G-21.** Las micrografías de la muestra G-21 se conservan en la Figura 28. En general, se observa existencia de poros grandes y poros pequeños, la muestra presenta textura de apretada no tiene tanta alteración de minerales rígidos, y los minerales de arcilla se ubican por lo general dentro de los poros de la muestra, es visible, además, tonalidades claras que pueden indicar presencia óxidos de metales como de hierro. En cuanto al tamaño de los poros estos oscilan entre 2.5 a 120  $\mu\text{m}$ , con un promedio de  $12.3 \pm 9.9 \mu\text{m}$  (Intervalo de confianza 95% de 2.4) lo que en dimensiones de poros de tipo microporos. En cuanto al tamaño de los granos se calculó que oscilaban entre [25 – 440]  $\mu\text{m}$  y que en promedio eran de unos  $219 \pm 179 \mu\text{m}$  (Intervalo de confianza 95% de 97).

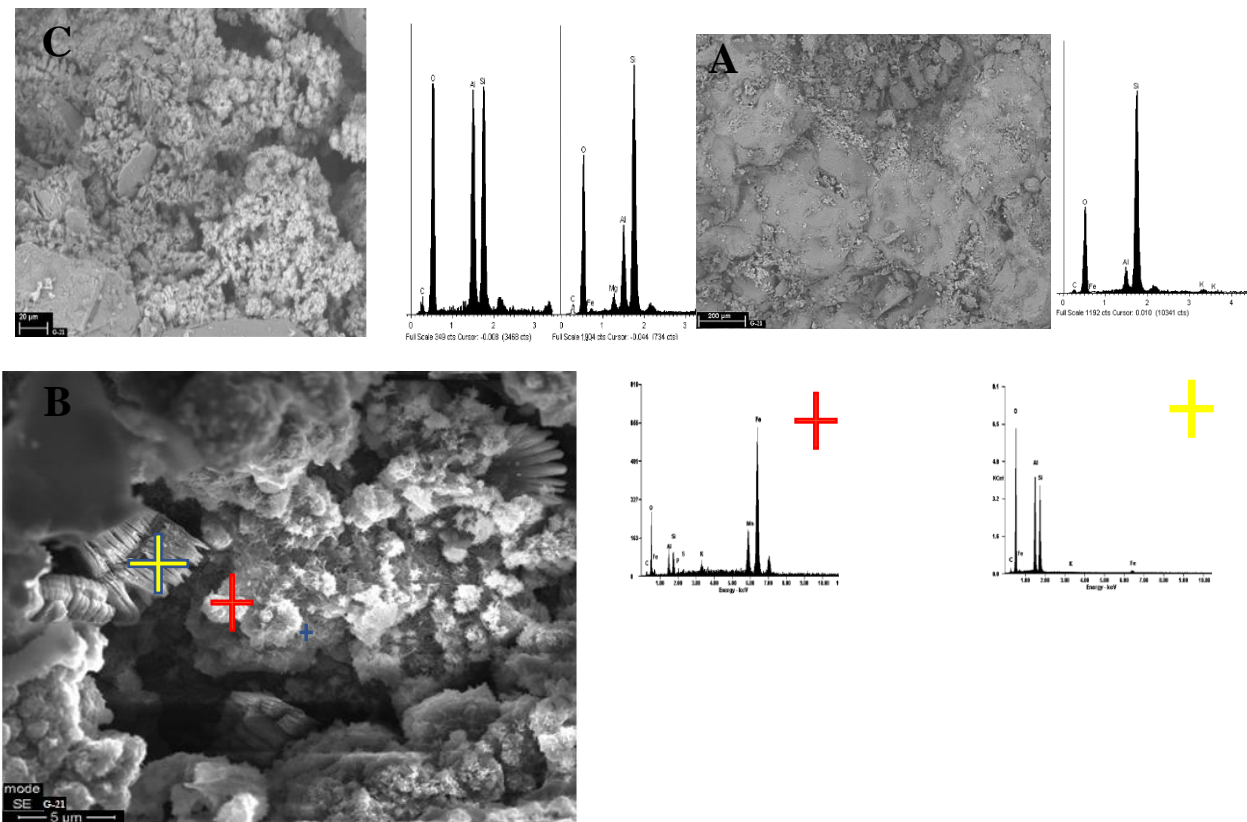


Figura 28. Micrografías de la muestra G-21 analizadas en SEM. A y C recubrimiento en oro, B recubrimiento grafito.

La Figura 28B-C presenta tres morfologías y tonalidades distintas de la escala tamaño arcilla, en la toma de los EDS a dos de las regiones observó presencia de Caolinita y de Micas, como puede apreciar en los espectros de la Figura 28C. En la mayor magnificación a una escala de 5  $\mu\text{m}$  (Figura 28B) se observa mejor la presencia de Caolinita agrupada en bloques de partículas discretas, como en forma de libro y en ocasiones con aspecto de morfología vermicular, cerca a esta se observa otras morfologías de barras pequeñas concéntricas con tonos claros, los EDS demostraron respectivamente que se trata de una Caolinita y de una Goethita.

**7.8.3 Muestra P1.** Las micrografías de la muestra P1 analizadas en SEM aparecen en la Figura 29, en la micrografía Figura 29A se expone el EDS de una región general de la muestra, aprecia gran cantidad de Si, Al y O, en menor proporción K y Mg. En tamaños de granos la muestra registró entre 45 y 264  $\mu\text{m}$  y con un promedio de  $124.4 \pm 40.88 \mu\text{m}$  (Intervalo de Confianza 95% de 10.256), en cuanto a tamaño de poros, la muestra presenta dimensiones de poros entre 15 y 125  $\mu\text{m}$ , con un promedio de  $31.108 \pm 12.57 \mu\text{m}$  (Intervalo de Confianza 95% de 3.056) que representa microporos. Por lo general, los minerales de arcilla se ubican principalmente entre los poros y atados a las paredes de los granos y los poros. Se observa Cuarzo microcristalino junto o entre las láminas de micas (Figura 29B).

En la micrografía de la Figura 29C se evidencia sobrecimiento de Cuarzo y entre un poro Illita fibrosa puenteando a dicho poro. En la muestra se destacó la Illita o en general micas en la escala arcilla (Figura 29B) y Caolinita (Figura 29D) demostrada cada uno con su espectro representativo.

En la Figura 29D se destaca la Illita puenteando un poro (*pore-bridging*) y este presume la posibilidad de que esta morfología proteja al poro de ser ocupado por otros minerales de la arcilla. En la misma figura también se presenta otra situación donde un poro está relleno por Micas y

Caolinita. Por último, en los granos rígidos fue posible detectar presencia de cemento silíceo (Figura 29D) la cual, es una película recubriendo los granos.

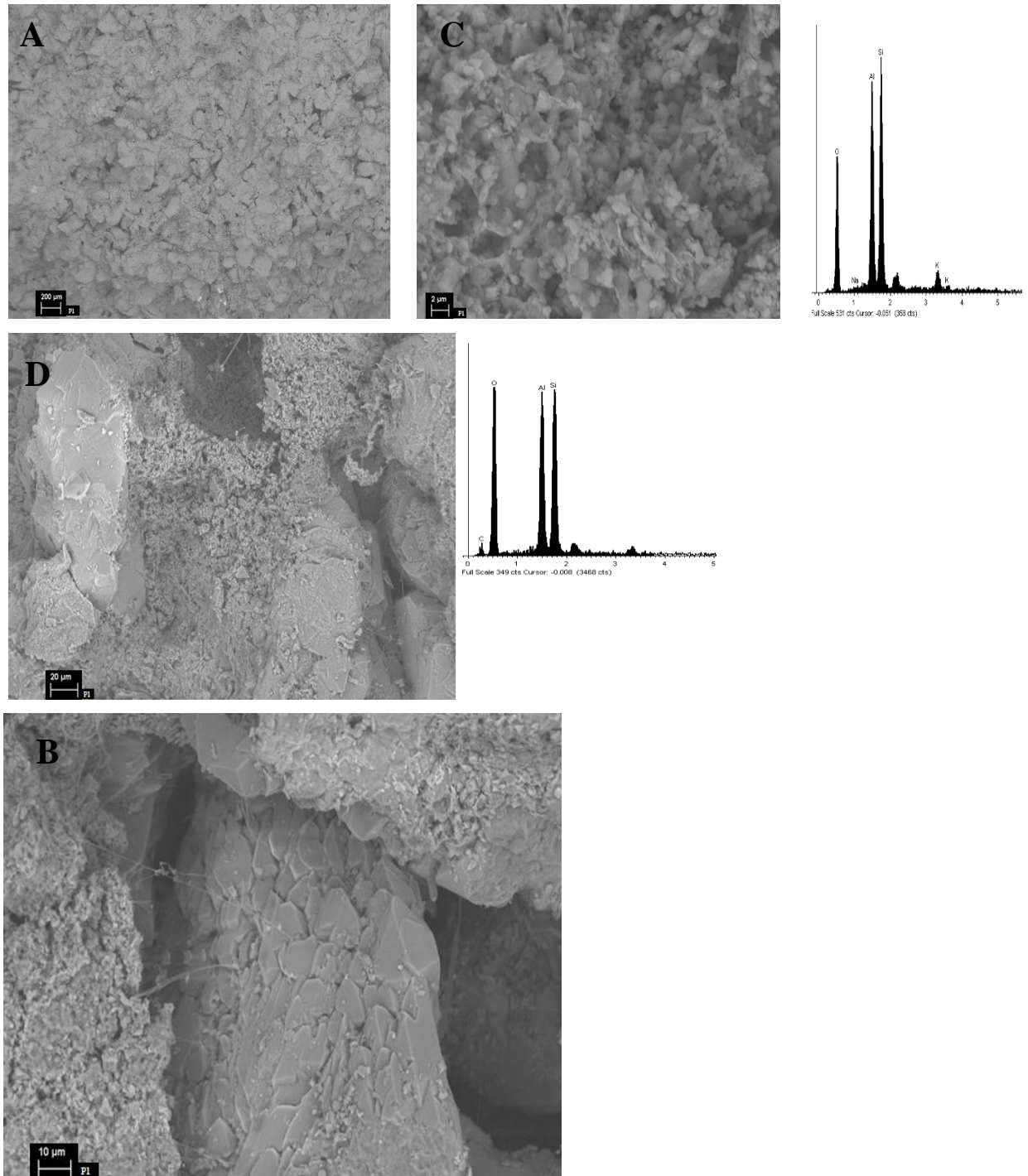


Figura 29. Micrografías de la muestra P1 analizadas en SEM. Recubrimiento en oro.

## ESTUDIO COMPARATIVO

**7.8.4 Muestra P2.** Las micrografías de la Muestra P2 analizada en SEM se observan en la Figura 30. Presenta un tamaño de grano entre [ 23 – 587]  $\mu\text{m}$  con un promedio de  $243\pm 138$   $\mu\text{m}$ , los granos se ven bien redondeados y subesféricos a esféricos, bien calibrada y sin cemento silíceo recubriendo a los granos. Presenta una buena porosidad, con un tamaño en la dimensión de los poros que oscila entre [18.6 – 157]  $\mu\text{m}$  y una media de  $66.4\pm 33.7$   $\mu\text{m}$  con un intervalo de confianza del 95% de 13.5. Lo anterior define que la predominancia de las dimensiones de los poros es el tipo mesoporo.

En lo referente a minerales de la arcilla, la Figura 30A muestra como poca densidad de minerales de arcilla taponan o se ubican entre los poros, recubriendo los mismo o los granos. La Figura 30B muestra como la predominancia de Caolinita de laminación dispersa entra al poro y se ubica de forma que se genere un relleno que permita microporosidad.

La micrografía de la Figura 30C, muestra presencia de Cuarzo microcristalino el cual se encuentra al borde los granos y en este caso logran taponar una parte de los poros. Es visible también la presencia de minerales arcillosos del grupo de las micas, posiblemente Illita, que además convive con Caolinita, la cual se aprecia con morfología de partículas discretas.

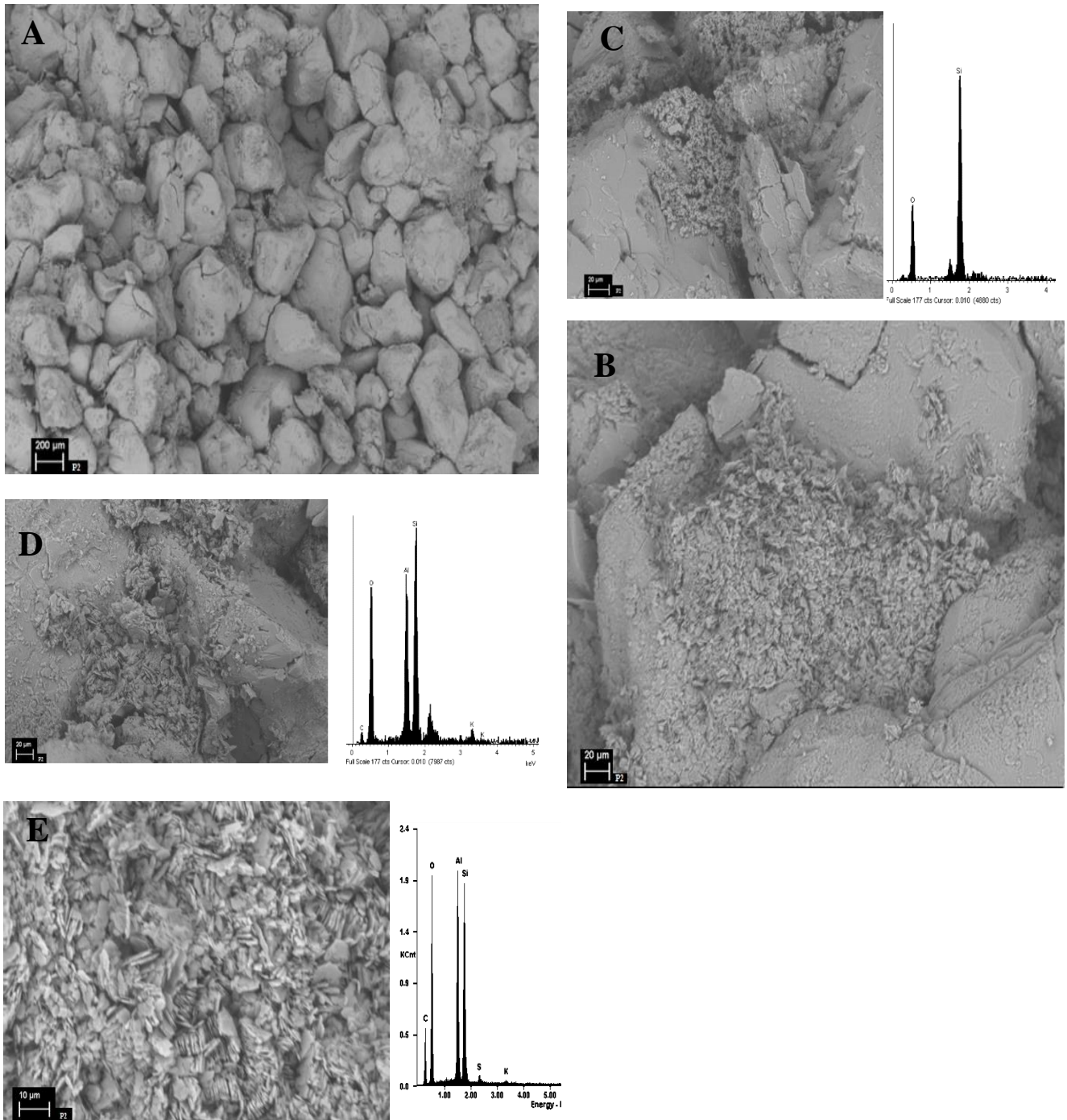


Figura 30. Micrografía analizada en SEM de la muestra P2.

## ESTUDIO COMPARATIVO

**7.8.5 Muestra T2.** Las micrografías de la muestra T2 analizadas en SEM se muestran en la Figura 31. El tamaño de grano de la muestra se estimó entre  $[159 - 1,176]$   $\mu\text{m}$  de media  $431 \pm 276$  con un intervalo de confianza del 95% de 140. La dimensión del tamaño del poro se estimó que van con poros de dimensiones entre  $[1.704 - 26]$   $\mu\text{m}$ , con un promedio de  $8.8 \pm 6$   $\mu\text{m}$  (Intervalo de Confianza del 95% de 2.15 que en general la define como microporos).

En minerales de arcilla, la muestra presenta bastante proporción de minerales de arcilla del grupo de las micas, posiblemente Illita, además, se destaca bastante presencia de Cuarzo microcristalino, que, aunque no es un mineral de arcilla, este se encuentra al tamaño de entre 4 y 1  $\mu\text{m}$  (Figura 31B). En la Figura 31C y D, se observa presencia de Cuarzo microcristalino y de Micas que pueden estar, por un lado, Cuarzo microcristalino a borde los granos rígidos y las Micas en la matriz, o pueden estar ambos en conjunto rellenando el poro, e incluso, la Micas de tamaño de grano a arcilla pueden taponar los espacio entre las Micas de mayor escala (Figura 31E).

En cuanto a morfología, las micas y el Cuarzo microcristalino rellenan los poros, es decir, en forma de pore-filling, aunque la Figura 31C da aspectos de incluso la Illita agregarse en forma de hojuelas o cornflake.

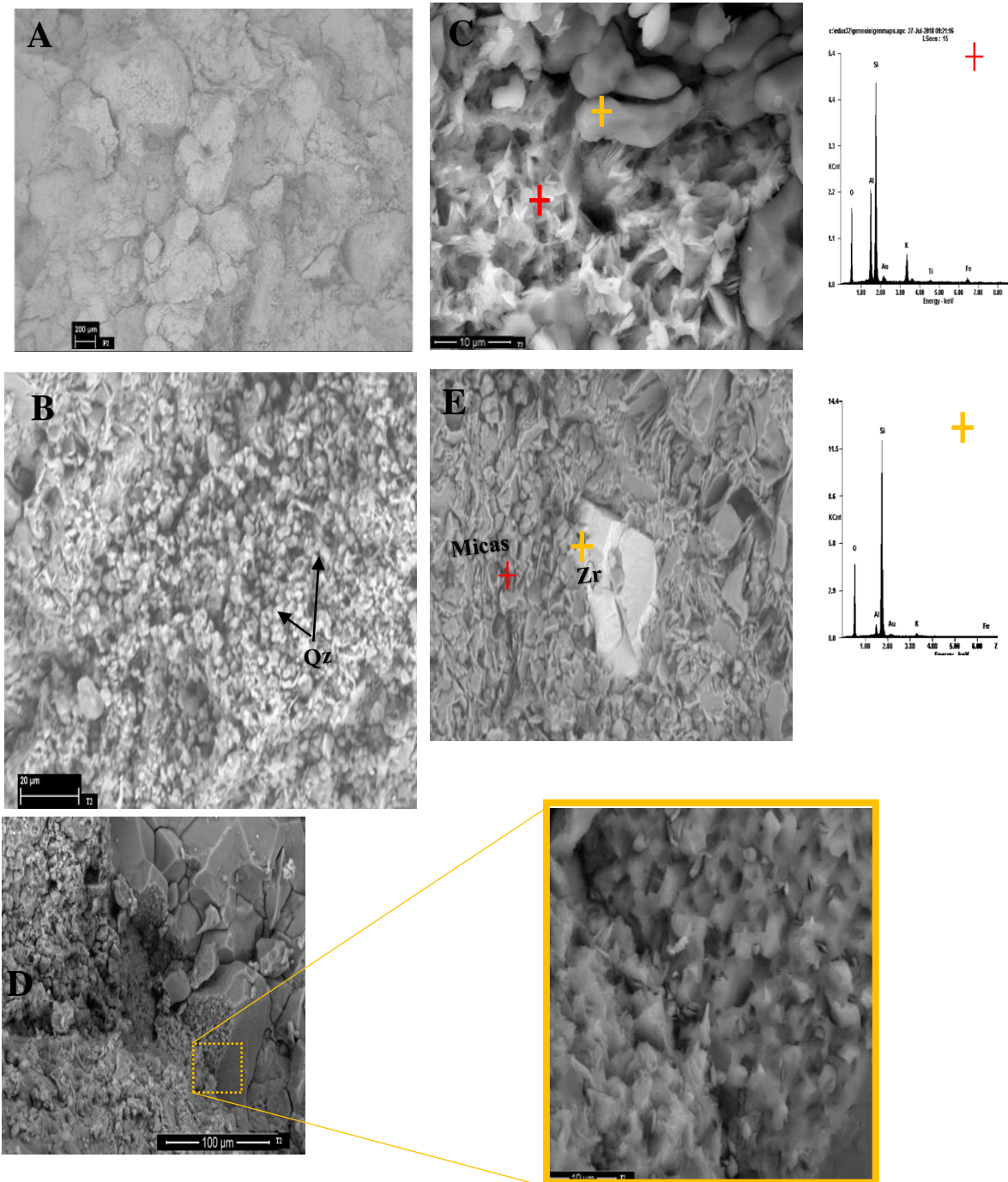


Figura 31. Micrografías de la muestra T2 analizadas en SEM, con recubrimiento en oro y C-D con recubrimiento en grafito. de Micas en general obtenido de la Cuantificación Rietveld de las muestras de estudio contra la Porosidad y Permeabilidad medidas en laboratorio.

## 8. Discusiones

Las cinco muestras de roca analizadas en los resultados a nivel de textura, composición mineralógica, espacio poral y propiedades petrofísicas, se centra ahora en ser discutidos encontrando relaciones respecto a la influencia de la mineralogía en sus propiedades, con un énfasis especial en minerales arcillosos, pues cabe resaltar, que estudiar una influencia respecto a la porosidad y permeabilidad de una roca, incluye muchos factores que se resumen a partir del calibrado, compactación, cementación y disolución, lo que viene a dar su firma en la mineralogía tanto en Cuarzo, feldespatos, los fragmentos líticos, minerales arcillosos y carbonatos.

### 8.1 Calidad de las rocas para Predecir Propiedades

Es importante resaltar como muchas de las firmas que esos procesos descritos en el párrafo anterior y las firmas mineralógicas y texturales que dejan, contrastan aceptablemente con la petrofísica obtenida. En este sentido, las muestras con más baja porosidad T2 y FR-1, 4.9 y 5.4%, respectivamente, en las micrografías de SEM se indicó que presentaban una dimensión media del poro de  $8.8 \pm 6 \mu\text{m}$  para T2 y de  $14.11 \pm 7.69 \mu\text{m}$  para FR-1, lo que da para ambos microporos y según Net & Limarino (2000) sus porosidades oscilarían entre 5 y 10% de porosidad de acuerdo al tamaño microporo. Por otro lado, G-21 la cual es microporo y su porosidad es 12% se empieza alejar de esta predicción, aunque está muy cerca. No obstante, el conteo realizado no aplica para P1 y P2, cuyas dimensiones de poro son microporo y mesoporo, respectivamente, es decir, sus

porosidades serían no mayores a 15%, sin embargo, P2 es de 20% y P1 es 16%. Lo anterior refleja que debe haber un factor mucho más influyente que esté afectando en la porosidad de estas dos muestras. Mismo problema se presenta respecto a la permeabilidad, la cual la única muestra que concuerda con la Tabla 4 es la muestra FR-1.

Tabla 4.

*Adaptación de la Tabla 3 incluyendo diámetros de poro según Choquette y Pray (1970) citados por Net & Limarino (2000).*

Reservorios de Hidrocarburos					Estándar de Almacenamiento de CO <sub>2</sub>					Choquette & Pray (1970)	
Grupo	Clase	Calidad	K	Φ	Grupo	Clase	Calidad	K (mD)	Φ (%)	Dimensión	Dimensión en μm
1	I	Muy alta	≥ 1000	≥ 20	1	I	Alta	>500	>25	Megaporo	>1000
	II	Alta	500-1000	18-20		II	Preferida	>300	>20		
	III	Promedio	100-500	14-18		III	Buena	50-250	15-20	Macroporo	250 - 1000
2	IV	Reducida	10-100	8-14	2	IV	Comprometida	<200	<10		
		Baja	1-10	2-8		V	Buena	<50	<15	Microporo	4 - 62
	VI	Muy baja	<1	<2		V	Baja	<10	<15	Criptoporo	<4

La porosidad y permeabilidad tanto del aire como la Klinkenberg, tuvieron relación directa entre dichos parámetros petrofísicos, sin embargo, hay situaciones en donde no se cumple tal condición, la razón puede ser una baja porosidad efectiva o densidad de gargantas porales, fenómeno que se puede observar entre G-21 y P1 en las gráficas Figura 13, en la cual G-21 con menor porosidad tiene una mayor permeabilidad que P1. Lo anterior se debe a los factores que influyen en la porosidad, entre ellos, el tamaño de los granos, la selección de los mismo, la arcillocidad, cemento, entre otras. De esta forma, si se analiza las secciones delgadas se observará un mayor tamaño de grano en G-21 que en P1, aspecto que cuando se realizó en conteos de las microfotografías de SEM, G-21 presenta una media de 219 μm y P1 una de 124 μm, además, las desviaciones típicas, la cual es una medida del grado de dispersión, es decir, del calibrado, expone que respectivamente sus valores son 176 y 41, es decir, que tanto el mayor tamaño de grano como

la amplia distribución no son resultados satisfactorios para explicar el fenómeno. Queda entonces, las posibilidades en el que la arcillosidad y la cementación, fracturas y alteraciones jueguen un papel más importante en estas muestras para que exhiban estos comportamientos. Ambas muestras presentan casi la misma arcillosidad, en G-21 predomina la Illita y en P1 predomina la Caolinita, sin embargo, hay casi la misma composición, además, es visible que en G-21 existen agregados de minerales arcillosos dentro de los espacios porosos y dentro de los cuales se observa microporosidad en una gran densidad de entre 4 a 12  $\mu\text{m}$ , esta microporosidad es perceptiblemente más grande que la de P1. En adición a lo anterior, hay que resaltar, aspectos en donde hay influencia de si existe presencia de arcilla antigénica o de arcilla detrítica y, sobrecrecimiento de Cuarzos, Cuarzo microcristalino o Cuarzo secundario, estos últimos son la misma connotación.

En el párrafo anterior se hacía alusión a la arcilla antigénica y a la detrítica, la primera se produce por los procesos diagenéticos y la segunda es sedimentada con el material original. La detrítica cierra los poros interparticulares bajo la compactación en el estado temprano de la diagénesis, y la antigénica bloquea los poros entre partículas e intrapartícula durante el proceso medio a final de la diagénesis (Zhao *et al.*, 2016). En las muestras G-21 y P1 es posible observar por micrografías de SEM que la G-21 presenta agregados de partículas discretas de Caolinita, Illita, Goethita y Cuarzo microcristalino, por otro lado, P1 presenta Caolinita desorientada, Micas e Illita que puentea (pore bridging) los poros, hay sobrecrecimiento de Cuarzo. Con estas descripciones se puede también ir entendiendo las razones del por qué G-21 exhibe mejor permeabilidad cuando su porosidad es menor a P1, es decir, sobrecrecimiento de Cuarzo, la Caolinita desorientada taponando poros y la Illita fibrosa puenteando los poros, resulta en afectaciones a las relaciones de porosidad-permeabilidad de P1, en donde, el puenteo de Illita afecta poco a la porosidad pero impacta bastante en la permeabilidad (AAPG Wiki, 2018)., la Caolinita desorientada afecta más

al poro que la agregada en bloques, y esto permite distinguir las razones del porqué G-21 con menor porosidad que P1, pero mejor permeabilidad que la segunda, y con Caolinita en bloques y con posible morfología vermicular aparte de buen tamaño de la porosidad interna de los agregados arcillosos, exhiba mejor permeabilidad con menor porosidad que la otra muestra.

La anterior distinción es fundamental con el fin de entender las gráficas obtenidas de Permeabilidad contra Porosidad (ver Figura 13), debido a que esta misma tendencia y comportamiento de datos se observa en las gráficas de la Figura 15 cuando se grafica Slipfactor contra permeabilidad y porosidad, es decir, se puede inferir que las mismas propiedades e influencia para permeabilidad y porosidad, tendrá influencia directa en lo que es la relación del Slipfactor con estas mismas propiedades petrofísicas. Por ende, las consideraciones que se tengan con tan solo Permeabilidad y Porosidad, serán análogas para Slipfactor.

Jones *et al.*(1987) afirmó que un alto valor de  $\alpha$  indicaba altos contrastes de permeabilidad dentro de una muestra de roca, si se lleva esto a este trabajo, se tiene la consideración de que en la Figura 14 hay exposición de que las muestras T2, FR-1, P1 y G-21 presentan un comportamiento con aumento de  $\alpha$  a medida que aumente la permeabilidad, y que P2 como caso contrario tiene una muy alta permeabilidad y un valor de  $\alpha$  muy bajo, en general, indica que la muestra P2 mantiene sus propiedades de permeabilidad más constantes en toda la roca que las otras muestras, además, presenta un factor  $\beta$  más bajo que las demás, lo que se puede significar que como es una muestra friable, esta presenta poca resistencia inercial y viscosa, ya que es fácil que colapse con la presión.

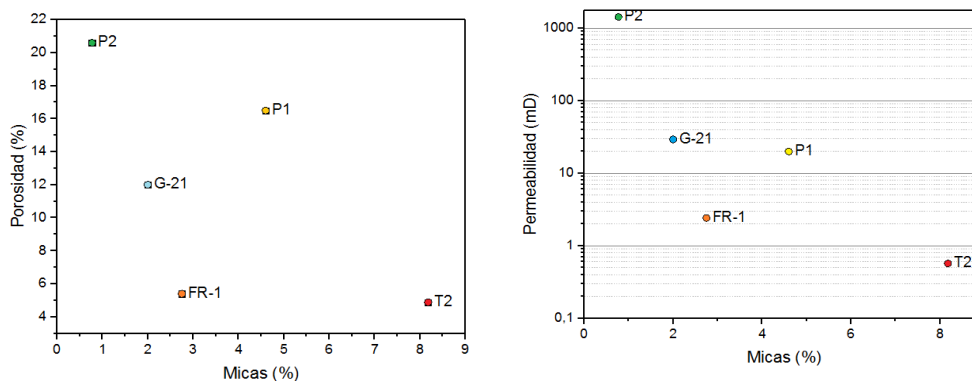
## 8.2 Influencia de la mineralogía en la relación Permeabilidad-Porosidad

En composición de Cuarzos, la mayoría de las muestras están entre 84 y 96%, a excepción de FR-1 la cual presenta 43% de Cuarzo, lo que en general, da aproximadamente 85% de granos rígidos sumando los feldespatos. Las dos mejores permeabilidades de las muestras (G-21 y P2) están caracterizadas porque el Cuarzo supera el 95% de la muestra, P1 aunque tiene una mejor porosidad que G-21, pero su permeabilidad es reducida, y esto lo puede explicar, por un lado, el contenido de Cuarzo de las muestras y por el otro, la cantidad de micas y minerales arcillosos que presenta, una proporción similar de minerales a la que tiene T2 y similitud de difractogramas de la muestra P2, sin embargo, T2 tiene un gran contenido de Micas, que incluye todos los miembros del grupo Micas y la Illita, denotando su tan baja permeabilidad y porosidad, y que su Illita aparece rellenando poros (pore-filling), debido a un matriz arcillosa en toda la roca, y gran cantidad de Micas más grandes puede ser de origen detrítico debido al aspecto dúctil entre los intersticios, pero un análisis más a fondo de minerales de arcilla se hará en la otra sección.

Retomando a la cantidad de granos rígidos, la cuantificación Rietveld demostró que para tener una porosidad y permeabilidad de calidad de por lo menos reducida, es necesario que la cantidad de granos rígidos supere el 90%, y en especial, que el Cuarzo sea mucho más superior que los otros granos rígidos, pues el caso de FR-1 en donde la proporción con el Cuarzo y plagioclasa es muy cercana, además, hay otros factores que influyen como la cantidad de Clorita que es la más alta de todas las muestras, contribuye que esta muestra tenga tan baja porosidad y permeabilidad.

### 8.3 Influencia de los minerales arcillosos en las Permeabilidad y Porosidad

En el párrafo anterior se expuso que micas y específicamente illita pueden provocar pérdidas de porosidad y permeabilidad, no obstante, hay todavía controversia respecto a su comportamiento intraporo, pues hay investigaciones que indican que tanto Illita como Interestratificados Illitoesmectita (I/S) dan pérdidas de relación permeabilidad-porosidad, hay otros quienes afirman que la Illita e interestratificado Illito-chlorita (I/C) previenen la precipitación de Cuarzo (Zhao *et al.*, 2016). En este trabajo, se detectó tanto en fracción arcilla como en SEM que todas las muestras presentaban un relleno del poro que incluía a minerales arcillosos del grupo de las Micas, y los resultados de la cuantificación Rietveld no demostró como se observa en la Figura 32 que el porcentaje de Micas tuviera relación directa con la porosidad, aunque las mejores porosidades sí estén por encima de las peores. En la misma imagen, se aprecia una leve relación entre el contenido de Micas y la permeabilidad de las muestras.



*Figura 32.* Porcentaje de Micas en general obtenido de la Cuantificación Rietveld de las muestras de estudio contra la Porosidad y Permeabilidad medidas en laboratorio.

Para corroborar la influencia, se pueden tomar las gráficas de los difractogramas de las fracciones arcillas (Ver Resultados sección Difracción de Rayos X) y por la cantidad de conteos

que obtuvieron los picos principales se establece que en las muestras con cantidad de Micas de la fracción arcilla (menores a  $3.9 \mu\text{m}$ ) se observó que, si existe una relación, en dicho análisis entre porosidad y contenido de Micas ( $< 3.9\mu\text{m}$ ) contrastando con resultados de Zhao *et al.* (2016). No obstante, este trabajo también pretende aclarar, que el caso entre las controversias de permeabilidad y porosidad entre G-21 y P1, indica que el origen autigénico-detrítico, en general, la morfología de las Micas de la fracción arcilla y en especial la Illita, influye mucho más la morfología y como se agregan entre los intersticios, pues cuando se hizo una relación de los conteos detectados para Micas de la fracción arcilla, P1 obtuvo menor cantidad de Micas que G-21, sin embargo, el caso ya fue explicado al comienzo de estas discusiones.

Se detectó Caolinita, la cual puede aparecer como desorientada, orientada en paquetes discretos y con una forma similar a la vermicular, y está cuantificable y detectable por la fracción arcilla en todas las muestras, sin embargo, en los difractogramas de la fracción arcilla, se encontró que la proporción de Caolinita supera las relaciones con los otros minerales arcillosos precisamente en las muestras con mayores porosidades, esto también podría ser relacionado con las permeabilidades, sin embargo, en este caso, en P1 influye más la morfología de otros minerales arcillosos como la Illita fibrosa puenteando poros. Además, en P1, con gran contenido superior de Caolinita por encima de Illita, la relación entre porosidad-permeabilidad y contenido de Caolinita, se ve ampliamente afectado.

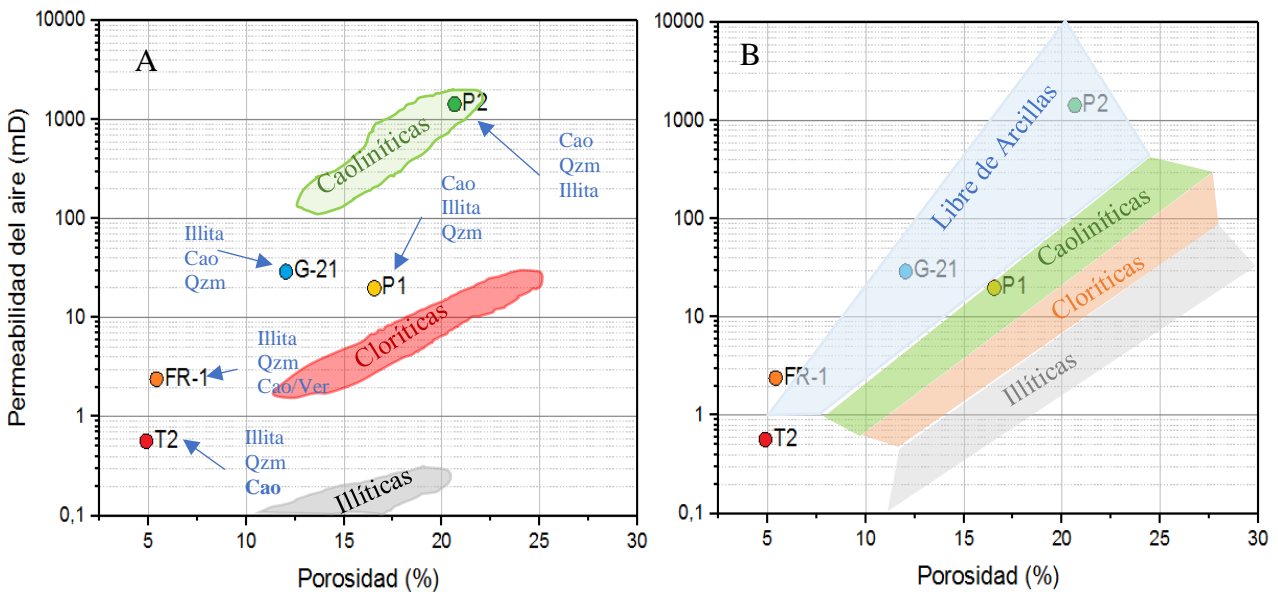


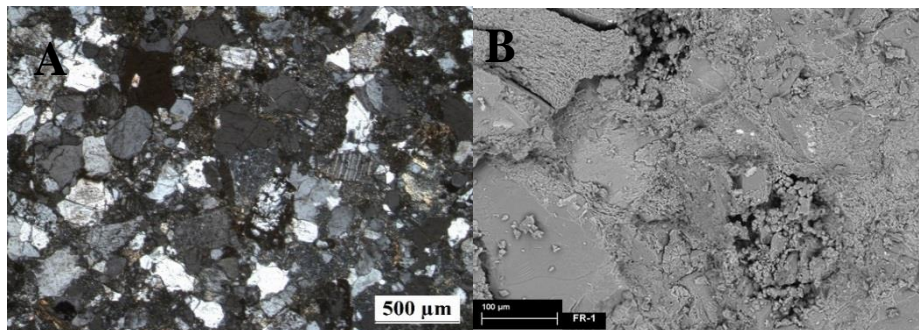
Figura 33. Gráficas de Permeabilidad de aire contra Porosidad, exponiendo regiones características para los minerales arcillosos. A propuesta de North (1985). B. Propuesta de Tiab & Donaldson (1996).

Respecto a North (1985) quien establece regiones específicas de prominencia de algún mineral arcilloso en una roca, P2 es la única que presenta correlación con lo establecido por este autor, visto en la Figura 33A, donde se está dentro de la región en posible para encontrar que la Caolinita sea el mineral arcilloso de mayor porcentaje en la muestra. Las otras muestras no caen en ninguna otra región, esto puede explicar debido a la composición de los tres principales minerales arcilloso de cada muestra cómo se observa en la misma figura, y que tanto en los cuantitativos como difractogramas de la fracción arcilla, es apreciable diversos fases minerales y gran aporte de Cuarzo microcristalino, que, en este caso, se asocia a todos esos Cuarzos menores a 3.9  $\mu\text{m}$ . Como puede observar, además, existe una proporción de Caolinita en las muestras con la porosidad, es decir, es un índice de aumento de la porosidad, cuando la Caolinita fue el mineral arcillosos principal de cada muestra, sus porosidades fueron mayores a las que no tenían al mineral como predominante, igualmente, cuando la Illita fue la de mayor proporción de minerales arcillosos de

la muestra, se asociaron con las tres peores porosidades, sin embargo, como ya se ha hecho hincapié, las permeabilidades no muestran una relación directa respecto a como lo hacen los minerales arcillosos con la porosidad, esto hace pensar, que influye más en la porosidad el tipo de mineral arcilloso y que en la permeabilidad lo es el agregado y morfología de la presentación de este mineral en la roca, es decir, que la porosidad está estrechamente relacionada con la capacidad de almacenamiento del yacimiento, mientras que la permeabilidad controla el proceso de filtración (Zhao *et al.*, 2015). En la Figura 33-B, se expone otra propuesta de regiones para los minerales de arcilla de acuerdo a la porosidad y permeabilidad, de acuerdo a ella, P2 pasa a ser una muestra siliciclástica libre de arcilla al igual que G-21, P1 ahora es una arenisca caoliníticas y FR-1 y T2 no hacen parte de ningún grupo. Esta última clasificación es considerada por este trabajo como menos fiable que la de la Figura 33A. La razón, son P1, P2 y G-21, por la primera, esta gráfica es certera, ya que tanto los difractogramas, la cuantificación y las micrografías SEM mostraron Caolinita en muy buenas proporciones en la muestra, sin embargo. Ahora, P2 es una controversia, porque lo cierto es que esta muestra está poco cementada y de aspecto de poca arcillosidad, empero, las micrografías SEM e incluso desde sección delgada, los minerales de arcilla se logran identificar y aún peor es el caso de G-21, la cual es una roca con bastante arcillosidad, por lo que, se propondría realizar unas modificaciones entre las gráficas de North (1985) y Tiab & Donaldson (1996).

Una importante correlación también se identificó en las muestras como se puede observar en las secciones delgadas (Figura 11), en la cual la alteración sericítica (sericitización) está jugando un papel muy importante en las relaciones de porosidad-permeabilidad. Se observó que las muestras con mayor alteración sericítica (T2 y FR-1) presentaban valores muy bajos de estas dos propiedades petrofísicas (Figura 34), y que G-21 presenta un poco de sericitización, mientras que

P1 y P2, presentan alteración en muy poco rango o minerales prácticamente inalterados. La sericitización es una alteración característica de los feldespatos, y forman entre ellos la Caolinita en alteraciones hidrotermales y Caolinita y Haloisita que se cree que son productos de meteorización pedoquímica (Besoain, 1985). Recuerde que la palabra pedoquímica, hace alusión al suelo, y no juzgue arbitrariamente este concepto, pues estamos haciendo un tratamiento a rocas de afloramiento. Como bien indica Besoain (1985) el producto más frecuente de la alteración del feldespato es la Sericita, la cual es una mica potásica cercana a la Muscovita, y esta Sericita puede generar también Illita, Montmorillonita, Caolinita (a veces antagónico con la montmorillonita). En rocas cristalinas, la alteración sericita o clorita de minerales rígidos promueve la porosidad de dichas rocas (Bengiolo, *et al.*, 2007), sin embargo, en areniscas, están asociadas como se pudo observar a bajas porosidades, las razones podrían ser que el origen de la alteración podría no ser hidrotermal sino por meteorización, además, en las medidas de permeabilidad y porosidad a rocas cristalinas, los resultados son extremadamente bajos en relación a las rocas clásticas y la generación de volumen puede ser positivo para rocas clásticas.



*Figura 34.* Micrografía en microscopio petrográfico en nicols cruzados de la muestra FR-1. B. Micrografía analizada en SEM de la muestra FR-1. Se expone el nivel de magnificación de las micrografías para observar la alteración a sericita de los feldespatos.

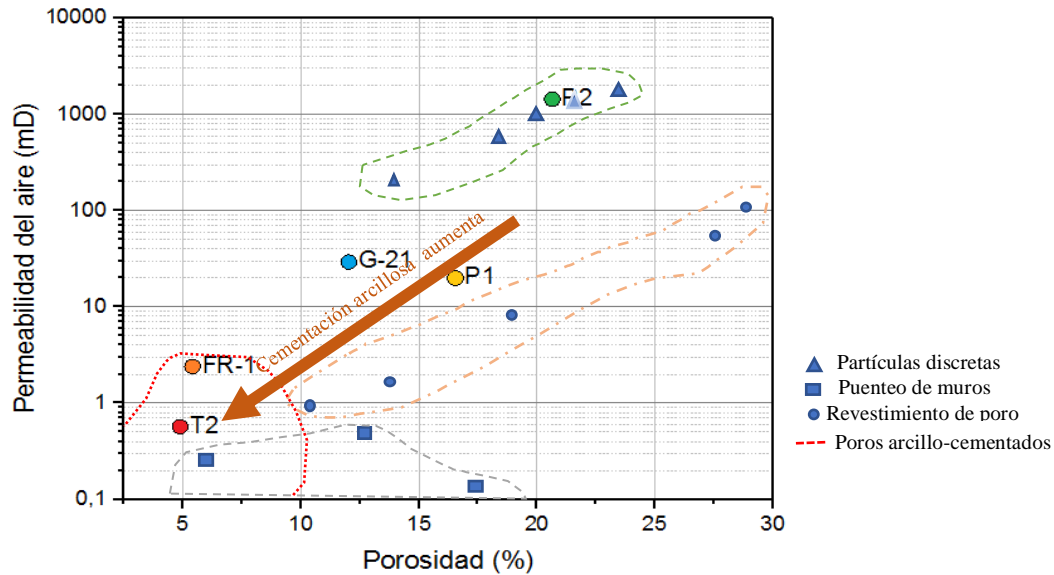


Figura 35. Esquema de las relaciones entre Permeabilidad contra Porosidad y la influencia de la morfología de los minerales arcillosos sobre ellas. Modelo tomado y adaptado de Nelson (2005), Lucía (2007) citados por Schön (2015).

Como se había ya discutido los minerales arcillosos no basta con solo identificar y caracterizar el tipo o grupo, sean Micas, Cándidas o Esmectitas o Cloritas, solamente cuando de correlación de propiedades petrofísicas se habla. Es fundamental caracterizar la morfología de algunos, en especial el de las Illitas, las cuales presentan comportamientos un poco distintos, en morfologías fibrosas, puentes entre los muros de los poros o en hojuelas de maíz relleno (cornflakes).

A partir de las morfologías propuestas en este trabajo, en donde claramente, se destacan minerales arcillosos antigénicos en P1, P2 y G-21; y aglomerados masivos relleno (matriz y cemento arcilloso) poros (infilling) como en T2 y FR-1, se obtiene Figura 34, en esta se observa como P2 hace parte de la morfología característica de las Caolinitas, sin embargo, G-21 y P1, las cuales tienen Caolinita no caen en el rango que establece Neasham (1977). Se aprecia que no existen muestras que estén en la región del revestimiento de poros característico de las cloritas ni

tampoco puenteo de las Illitas, y en el caso de FR-1 y G-21, la flecha marrona indica aumento de cementación por parte de arcillas, lo que indica que esa morfología masiva presente es debido a que son tan apretadas a nivel poroso, que la causa fue el cemento arcilloso, ya las implicaciones de diagénesis y alteraciones, así como otros eventos geológicos, no serán explicados en este trabajo.

Ante las gráficas anteriormente presentadas, se evidencia que existen algunas controversias entre diversos autores, a pesar de estos problemas, la realidad es que el comportamiento de los minerales de arcilla no son o puede ser del todo explicados en tan solo unas gráficas, el contexto de los minerales arcillosos es demasiado complejo, en especial, en el caso de las muestras de este estudio las cuales mostraron gran cantidad de diversos tipos en cada muestra y eso, que las muestras aquí presentadas no presentan interestratificados entre los minerales arcillosos, los que hubieran hecho más completo este estudio.

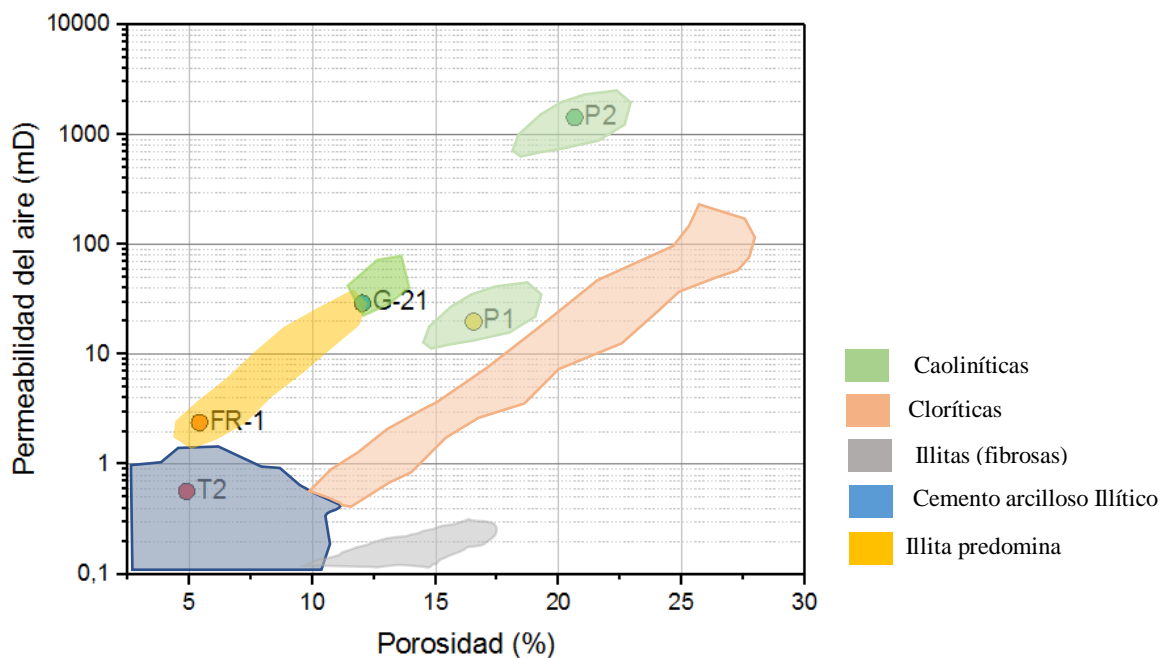


Figura 36. Propuesta para modificar regiones de influencia de minerales arcillosos sobre la Permeabilidad y Porosidad de las rocas siliciclásticas.

La propuesta de la Figura 36 es tan solo una simple nueva identificación de nuevas partes de la regiones, debido a que tiene muchas limitantes, una es la cantidad de muestras que solo fueron cinco, en general, tenga en cuenta que esta gráfica busca es ampliar la zona en donde las Caolinitas en areniscas predominan, establecer diferenciación entre la Illita fibrosa y el cemento arcilloso que en este estudio se correlacionó con Illita y, por último, una zona en donde la Illita predomina, pero no es posible correlacionar ya que, los autores de la Figura 33, no exponen información acerca de esa zona.

#### **8.4 Mecanismo de Daños a la Formación**

En una vista general, se recuerda que los mecanismos de daños a la formación son tres, el hinchamiento de esmectita, la migración de finos y la transformación en otras fases minerales. En operaciones de recobro o actividades en explotación de crudo, FR-1 podría presentar hinchamiento debido a presencia de esmectita como fue demostrado en sus difractogramas y sometido a etilenglicol. Las muestras G-21, P1 y P2, pueden presentar migración de finos, pues en general, son los minerales arcillosos antigénicos los que se frecuentan más en yacimientos y tienen facilidad para migrar, más que las arcillas detríticas, aunque estas últimas también pueden sufrir migración, pero quizás no en condiciones de reservorio (Wilson *et al.*, 2014). Además, no solo en daños a la formación es visible la acción de los minerales arcillosos, ya que Amorocho y Badillo (2014) afirman que la Caolinita hace que una roca sea poco hidratable, y eso le permite sufrir dispersión en las paredes de los muros de los pozos de petróleo y provoca derrumbes. En cuanto a daños a la formación, muestras como G-21, P1 y P2, con Caolinita antigénica, Morris & Shepperd (1982) concluyó que el movimiento físico de este mineral provoca agregados de cristales que afectan las

gargantas porales y el cual no es un fenómeno reversible. Ya los tratamiento y mecanismos para mitigar los impactos de años a la formación compete a la ingeniería del yacimiento.

En FR-1, la Esmectita no presenta la morfología característica y al estar próxima a agregados de minerales arcillosos micáceos como la Illita, este puede estar empezando a transformarse en un interestratificado, por ende, su daño a la formación es transformación en otras fases minerales.

## 9. Conclusiones

Este trabajo ha demostrado la gran influencia de los minerales arcillosos en las propiedades petrofísicas de las rocas siliciclásticas. En general, se debe a su pequeño tamaño y al área superficial específica, lo que las vuelve más propensas a interactuar con el medio y los fluidos dentro del mismo, es por esto, que la porosidad y la permeabilidad de las rocas se ve ampliamente afectadas. Se encontró relación directa entre la permeabilidad y porosidad de rocas siliciclásticas de sublitarenitas (P1), arcosa lítica (P2 y FR-1), litarenita feldespática (T2) y subarcosa (G-21) al graficarse sus propiedades mineralógicas. Igualmente, las propiedades petrofísicas se correlacionan, por lo que los estudios a los minerales arcillosos que se identificaron para concluir son importantes para establecer que como hubo relación entre los parámetros petrofísicos, de estos se puede sacar consideraciones entre las permeabilidades, el Slipfactor, la resistencia inercial, resistencia viscosa y la porosidad respecto a la mineralogía de las rocas.

Hubo controversias entre G-21 y P1, que demostraron el precepto de que no toda buena porosidad es una buena permeabilidad y se explicó la influencia de la mineralogía de arcillas, las

cuales en ocasiones prima en permeabilidad la morfología de los agregados arcillosos y en porosidad prima más el tipo de mineral arcilloso. Por este motivo, dos porosidades  $A > B$ , no siempre van a indicar que A tenga mejor permeabilidad que B. El caso específico de estas muestras influyó gracias y en parte a la Illita y la forma es como puentea los poros que por efecto embudo taponan más las gargantas y así impactar en la permeabilidad de la muestra. Igualmente, se encontró correlación con el contenido de Illita de las muestras y la pérdida de porosidad y permeabilidad, en especial, cuando se ubicaron hacia la zona de bastante cementación arcillosa de la Figura 35, además, se estableció que la proporción de los Caolinita, cuando supera a las de las otras minerales de arcilla, es asociado con buenas permeabilidad y medias a buenas porosidades, como los casos de P1 y P2. Por este lado de la mineralogía, la alteración de los feldespatos asociado en sección delgada y SEM a Sericita, se correlacionó con las muestras con peores calidades de almacenamiento de hidrocarburos.

En cuanto a calidad de almacenamiento de hidrocarburos propuesta por Shogenov *et al.* (2015) se determinó que P2 tiene una calidad calificada como muy alta, P1 es una calidad promedio, G-21 es una calidad reducida, FR-1 y T2 presentan una calidad muy baja. En cuanto a minerales arcillosos, la muestra P2 es una arenisca caoliníticas, en menor proporción también lo es P1, y G-21 ya empieza a existir bastante presencia de Micas (Illita), FR-1 predomina Illita y T2 está bastante cementada por arcillas tipo Micas (Illita).

Se encontró correlación entre el porcentaje de granos rígidos con la factibilidad de tener buenas o, por lo menos, calidades promedio, al menos con las muestras de este estudio. Eso es visible con los análisis cuantitativos que difieren en parte a los porcentajes de la clasificación de Folk (1954) en el triángulo para areniscas, debido a la alteración de los cristales de feldespato y el grado de cristalinidad de los mismos.

En cuanto a las técnicas para estudiar el fenómeno, FTIR, Difracción de Rayos X y SEM fueron fundamentales para estudiar la influencia de los minerales arcillosos, sin embargo, el propósito como tal de este análisis necesitó fundamentalmente la separación de la fracción arcillosa para la difracción de estas y tratarlas calentándolas, sometiéndolas a etilenglicol y orientado buscando la mejor detección y conteos en los picos de los difractogramas. FTRS (Raman) no pudo contribuir enormemente con el trabajo y es difícil su utilización para estudios de minerales arcillosos sin una separación de las fracciones.

## 10. Recomendaciones

- Para otros estudios, si se va a enfocar a el sector energético, que se realiza con núcleo de perforación, los cuales se acercarán más a las condiciones de yacimiento y el papel de los minerales arcilloso en estos y sin influencia de la meteorización o intemperismo, sería más óptimo hacia este enfoque.
- Se recomienda analizar las muestras con limpieza de las arcillas y sin la limpieza de las mismas, por las técnicas propuestas con el fin obtener mayor veracidad dentro de la influencia de los minerales arcillosos en las propiedades petrofísicas de rocas siliciclásticas.
- Se recomienda realizar un análisis con mayor cantidad de muestras, pero para ello, es inevitable reducir el volumen de técnicas utilizadas para el fenómeno de los minerales de arcilla, que se propone sea difracción de rayos X y la misma para la fracción arcilla.

- Completar los análisis hacia registros eléctricos de permeabilidad, porosidad y otras situaciones en donde los minerales arcillosos influyen.
- Completar las técnicas con análisis por Tomografía con el fin de establecer posibles fracturas en los núcleos y así tener mayor certeza de la calidad de las tomas de propiedades petrofísicas e incluso realizar ensayos petrofísicos y mineralógicos por esta técnica.
- Se recomienda el uso de MIP con el fin de establecer cual morfología de arcillas es predominante en las rocas.

### Referencias Bibliográficas

- AAPG Wiki (2018). *Sandstone permeability prediction from texture*. Tulsa, OK: the American Association of Petroleum Geologists. Recuperado de: [http://wiki.aapg.org/Sandstone\\_permeability\\_prediction\\_from\\_texture](http://wiki.aapg.org/Sandstone_permeability_prediction_from_texture)
- Adamu, M. (2010). Fourier Transform Infrared spectroscopic determinations of shale minerals in reservoir rocks. *Nigerian Journal of Basic and Applied Science*, 18 (1), pp. 6-18.
- American Petroleum Institute (1998). *Recommended Practice 40 (RP-40): Recommended practices for Core Analysis*.
- Amorocho, P., Badillo, J. (2012). influencia de la composición mineral de rocas arcillosas en la estabilidad de pozos petroleros. *Boletín de Geología*, 34 (1), pp. 81-88
- ANH (2008). Cordillera Oriental. Colombia Round 08. Disponible en: [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cordillera\\_Oriental.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cordillera_Oriental.pdf)
- ANH (2008b). Informe de Prospectividad Colombia *Round* Área Cordillera Oriental. Agencia Nacional de Hidrocarburos. Recuperado de: [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cordillera\\_Oriental.pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cordillera_Oriental.pdf)
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José de Costa Rica, Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

- Betancourth, D., Gómez, J., Mosquera, J., Tirado M. (2010). Análisis por difracción de rayos X de rocas provenientes de región esmeraldífera. *Scientia et Technican*, 1(44), pp. 257-260, doi: <http://dx.doi.org/10.22517/23447214.1871>
- Bidner, Martha S. (2001). *Propiedades de la roca y los fluidos en reservorios de petróleo*. Eudeba, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Billault, V., Beaufort, D., Baronnet, A., Lacharpagne, J. (2003). A nanopetrographic and textural study of grain-coating chlorites in sandstone reservoirs. *Clay Minerals*, 38, pp. 315-328, doi: 10.1180/0009855033830098
- Bongiolo, Everton M., Bongiolo, Daniela E., Sardini, Paul, Mexias, André S., Siitari-Kauppi, Marja, Gomes, Márcia E.B., & Formoso, Milton L.L.. (2007). Quantification of porosity evolution from unaltered to propylitic-altered granites: the <sup>14</sup>C-PMMA method applied on the hydrothermal system of Lavras do Sul, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79(3), pp. 503-517., <https://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652007000300011>
- Bravo, Y., Gómez, C., de Ramirez, I. (1980). Análisis de Espectroscopía Infrarroja de Algunas Arcillas Colombianas. *Rev. colomb. quím.*, 10(1), pp. 45-52.
- Camacho, L. F., Ebrath, M. D. (2014). Desarrollo de una metodología para la determinación experimental de permeabilidades relativas agua crudo en un campo colombiano (tesis de pregrado), Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Campos, A., Moreno, S., Molina, R. (2009). Characterization of vermiculite by XRD and Spectroscopic Techniques. *Earth Sc. Res. J.* 13(2), pp. 108-118.
- Christidis, G.E., Koutsopoulou, E. (2013). A simple approach to the identification of trioctahedral smectites by X-ray diffraction. *Clay Minerals*, 48, pp. 687-696, DOI10.1180/claymin.2013.048.5.22

- Cruz, L.E.; Caballero, V.M. (2007). *Guía de laboratorio de sedimentología para geólogos*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Díaz, E. J. Contreras, N. M. Pinto, J. E. Velandia, F. Morales, C. J. Hincapié, G. (2009). Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la mesa de los santos, Santander. *Boletín de Geología*, 31(1), pp. 61-70.
- Dontsonova M., K., L. Norton, D., Johnston, C.T., Bigham, J.M. (2004). Influence of Exchangeable Cations on Water Adsorption by Soil Clays. *Soil Soc. Am. J.*, 68, 1218-1227
- Duarte, P. y Ortiz, L. (2011). Reconstrucción de la Historia Diagenética de las Areniscas de la Formación Lisama en la Cuenca de Valle Medio del Magdalena (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Escobar M., Freddy (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos*. Recuperado de: <http://oilproduction.net/files/Libro%20Fundamentos%20de%20Ing%20de%20Yacimientos%20-%20Freddy%20Escobar.pdf>
- Espinel, V., Hurtado, J. (2010). Petrografía Y Análisis Facial De Las Rocas Calcáreas Aflorantes De La Sección Tunja –Villa De Leiva (Boyacá) (tesis de pregrado). Universidad de Caldas, Manizales.
- Figuroa G., N. (2013). relación entre las propiedades petrofísicas de la roca almacenadora en depósitos turbidíticos y la producción de hidrocarburos: análisis del sector central del campo Tajín de la cuenca de Chicontepec. (tesis de pregrado), Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Firoozabadi, A., & Katz, D. L. (1979). An Analysis of High-Velocity Gas Flow Through Porous Media. *Society of Petroleum Engineers*. 31(02), 211–216, doi:10.2118/6827-PA

- Flórez, F. y López, S. (2006). Estudio comparativo de los métodos convencionales de recobro aplicados en yacimientos que representan altas relaciones de movilidad (tesis de pregrado). Universidad Industria de Santander, Bucaramanga.
- Foster, M. (1954). The Relation Between Composition and Swelling in Clays. U.S. Geological Survey. *Clays and Clay Minerals*; 1954 v. 3; no. 1; pp. 205-220; doi: 10.1346/CCMN.1954.0030117
- Fourar, M. Lenormand, R. Karimi-Fard, M. (2005). Inertia effects in high-rate flow through heterogeneous porous media. *Transport in Porous Media*, (60), pp. 353-370, DOI 10.1007/s11242-004-6800-6
- Freeman, J.J., Wang, A., Keulebler, K., Jolliff, B.L., Haskin, L.A. (2008). Characterization of natural feldspars By Raman spectroscopy for future planetary exploration. *The Canadian Mineralogist*, 46, pp. 1477-1500, doi: 10.3749/canmin.46.6.1477
- Frost, R.L. (1997). The structure of the kaolinite minerals- FT-Raman study. *Clay Minerals*, 32, pp. 65-77
- Gates, W., Kropprodge, T., Madejova, J., Bergaya, F. (Ed.) (2017). Infrared and Raman Spectroscopies of Clay Minerals. *Development in clay science*, 8, pp. 1-627.
- Gaviria, S; Sarmiento, G; Sanchez, M. (2012). Minerales Arcillosos Marcadores de Procesos Termodinámicos en Niveles Lodolíticos del Cretáceo Inferior, Región de Ráquira, Boyacá, Cordillera Oriental de Colombia. *Geología Colombiana*, 37, pp. 63-74.
- Geoestudios (2006). Cartografía geológica Cuenca Cordillera Oriental – Sector de Soapaga. Contrato No. 085 Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH-. Recuperado de: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y->

Geofisica/Tesis/CARTOGRAFIA%20GEOLOGICA%20SOAPAGA-  
C.ORIENTAL%202005.pdf

- Ghanizabath A., Clarkson, C., Aquino, S., Ardakani, O., Sanei, H. (2015). Petrophysical and geomechanical characteristics of Canadian tight oil and liquid-rich gas reservoirs. I. Pore Network and Permeability Characterization of Berea. *Fuel*, 153, pp. 664-681
- Guarino, A., Wagner, G., Rosane A. S., Polivanov, H., & Menezes, S. (1997). Characterization of a brazilian smectite by solid state NMR and X-ray diffraction techniques. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 8(6), pp. 581-586, doi: <https://dx.doi.org/10.1590/S0103-50531997000600004>
- Hernández S., L. F. (2012). Análisis, integración de las propiedades petrofísicas de rocas por medio de registros eléctricos, descripción de corazonces y resultados de laboratorio básicas y especializados del Campo Escuela Colorado (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Jiang, S. (2012). Chapter 2. Clay Minerals from the Perspective of Oil and Gas Exploration. Valášková, M. (Ed.), *Clay Minerals in Nature- Their Characterization, Modification and Application*, (pp. 362) doi: <http://dx.doi.org/10.5772/47790>
- Jones, S. (1987). Using the inertial coefficient,  $\beta$ , to characterize heterogeneity in reservoir rock. *Society of Petroleum Engineers*, SPE 16949
- Jones, S., Aime, M. (1972). A rapid accurate unstrady- State Klinkenberg Permeameter. *Society of petroleum Engineers Journal SPE* (3535), doi: 10.2118/3535-PA
- Justo, J., Morillo G., E. (1999). Técnicas De Difracción De Rayos X Para La Identificación Cualitativa Y Cuantitativa De Minerales De La Arcilla. *Ciencia y Tecnología de Materiales* 2, pp. 77-86.

- Lafuente B, Downs R T, Yang H, Stone, N. (2015) The power of databases: the RRUFF project. In: Highlights in Mineralogical Crystallography, T Armbruster and R M Danisi, eds. Berlin, Germany, W. De Gruyter, pp. 1-3
- Lai, P., Krevor, S. (2014). Pore scale heterogeneity in the mineral distribution and surface area of Berea sandstone. *Energy Procedia*, (63), ISSN: 3582-3588
- Ligny, D., Guillaud, E., Gaihanou, H., Blanc, P. (2013). Raman spectroscopy of adsorbed water in clays: first attempt at band assignment. *Procedia Earth and Planetary Science*, 7 (2013), pp. 203-206
- MacLeod, N. (2002). Geometric morphometrics and geological shape-classification systems. *Earth-Science Reviews*, 59 (1-4), pp. 27-47.
- Mejía, E.J., Bolaños, J.O., Rodríguez, J.E. (2012). Uso de la Espectroscopia IR para estudiar la transformación térmica que experimenta una arcilla caolinítica. *Revista EIA*, (18), pp. 91-103
- Menking, K., Musler, H., Fitts, J., Bischoff, J., Anderson, R. (1993). Clay mineralogical analyses of the Owes Lake. United State Geological Survey, Core OL-92, Recuperado de: <https://pubs.usgs.gov/of/1993/of93-683/3-sed-min/2-clay/clay.html>
- Meza C., K. E. (2013). Parámetros petrofísicos compuestos en la caracterización de yacimientos. (Tesis de posgrado) Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria México D.F.
- Mojica, J. & Villaroel, C. (1984). Contribución al Conocimiento de las Unidades Paleozoicas del Área de Floresta (Cordillera Oriental Colombiana; Departamento de Boyacá) y en Especial al de la Formación Cucho. *Geología Colombiana*, (13), pp. 55-80.

- Moncada, D., Bodnar, R. (2012). Gangue mineral textures and fluid inclusion characteristics of the Santa Margarita Vein in the Guanajuato Mining District, Mexico. *Central European Journal of Geosciences*, 4 (2), pp- 300-309, doi: 10.2478/s13533-011-0057-8
- Moore, D. M. & Reynolds, R. C., Jr. (1997). X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, 2nd ed. xviii 378 pp. Oxford, New York.
- Morris, A., Shepperd, M. (1982). The Role of Clay Minerals in Influencing Porosity and Permeability Characteristics in the Bridport Sands of Wytch Farm, Dorset. *Clay Minerals*, 17, pp.41-54, doi: 10.1180/claymin.1982.017.1.05.
- Naranjo, C. E. (2010). Factibilidad de la Inyección de Agua en las Arenas Mugrosa del Campo Lisama (Tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Neasham, J. W. (1977). The morphology of dispersed clay in sandstone reservoirs and its effect on sandstone shaliness, pore space and fluid flow properties. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/6858-MS
- Nelson, S.A. (2015). Phyllosilicates (Micas, Chlorite, Talc, and Serpentine). New Orleans, LA. Universidad de Tulane. Página web de la Universidad de Tulane. Recuperado de: <https://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/phyllosilicates.htm>
- Net, L. I., & Limarino, C. O. (2000). Caracterización y origen de la porosidad en areniscas de la sección inferior del Grupo Paganzo (Carbonífero superior), Cuenca Paganzo, Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 7(1-2)
- Norman, R., Shrimanker, N., Archer, J.S. (1985) Estimation of Coefficient of Inertial Resistance in High rate Gas Wells. *SPE 14207*

- North, F.K. (1985). *Petroleum Geology*. Allen & Unwin, Winchester, Mass, ISBN –0-04-553003-3
- Ostrooumov, M. (2012) Espectroscopía Raman de Sílice natural en las impactitas: caso de estudio del cráter Chicxulub (México). *Ciencia Nicolaita*, (55).
- Pérez, J.L. y Martín, F. (1967). Estudio por espectroscopia de infrarrojo de las arcillas de algunos suelos de Andalucía Occidental. 11. Suelos de terrazas y margas del Triásico. *Análisis Edafológico y Agrobiológico*, (26), pp. 1183-1192
- Petrowiki (2015). *Corrections to core measurements of permeability*. Richardson, TX. Society OF Petroleum Engineers. Recuperado de: [http://petrowiki.org/Corrections\\_to\\_core\\_measurements\\_of\\_permeability](http://petrowiki.org/Corrections_to_core_measurements_of_permeability)
- Pironon, J., Pelletier, M., de Donato, P., & Mosser-Ruck, R. (2003). Characterization of smectite and illite by FTIR spectroscopy of interlayer NH<sup>+</sup><sub>4</sub> cations. *Clay Minerals*, 38(2), pp. 201-211.
- Plana, F., Traveria, A., Martínez, S. (1982). Preparación de Agregados Orientados de Arcilla Mediante Extensor. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* Vol. 21 (2), pp. 115-118.
- Pradana, R., Rossi, C. (2016). Relaciones porosidad-permeabilidad en carbonatos de la Fm Reocín (Cantabria). *Revista de la Sociedad Española de Mineralogía Macla*, no. 21, 2016.
- Qingjie, Liu; Baohua, Liu; Xianbing, Li; Shouguo; Yan (2002). The effect of water saturation on gas slip factor by pore scale network modeling. En Research Institute of Petroleum Exploration and Development PetroChina. SCA (53) Symposium of the Society of Core Analysts held in Monterey, California, USA, 22-25 September 2002

- Ramasamy, V., Rajkumar, P., Ponnusamy, V. (2009). Depth wise analysis of recently excavated Vellar river sediments through FTIR and XRD studies. *Indian J. Phys.* 83 (9), pp. 1295-1308.
- Ramírez R., W. (2010). Caracterización petrográfica y mineralógica preliminar de facies arenosas y lodosas de la formación Mugrosa (Pozos: 11, 21, 26 y 27) en el sector de Campo Escuela Colorado, Cuenca del Valle Medio de Magdalena, Departamento de Santander, Colombia (tesis de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Rojas, C.A. (2011). Modelamientos geoestadísticos de los depósitos fluviales de la Zona C- Formación Mugrosa en el área la Cira- Este del Campo La Cira (tesis de posgrado) Universidad Nacional de Colombia, Cap. IV. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4349/7/cesaraugustorojassuarez.2011.parte6.pdf>
- Romero, E.G., Suarez, M. (s.f.). Las arcillas propiedades y usos. Universidad complutense de Salamanca.
- Salgado, M. González, L. (2005). Estudio de la mojabilidad de las propiedades petrofísicas y operaciones de recobro secundario (tesis de pregrado). Universidad Industria de Santander, Bucaramanga
- Schlumberger (2017). Oilfield Glossary en español. Recuperado de: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es.aspx>
- Schön, Jürgen H. (2015). Chapter 2. Pore Space Propierties. *Development in Petroleum Sciencia*, 65, pp.21-84
- Shogenov, K., Shogenova, A., Vizika-Kavvadias, O., Nauroy, J.F. (2015). Reservoir quality and petrophysical properties of Cambrian sandstones and their changes during the

- experimental modelling of CO<sub>2</sub> storage in the Baltic Basin. *Estonian Journal of Earth Sciences*, 64 (3), 199–217
- Signe Vahur (2018). Database of ATR-FT-IR spectra of various materials. Universidad de Tartu.
- Soeder, D. J., & Chowdiah, P. (1990, December 1). Pore Geometry in High- and Low-Permeability Sandstones, Travis Peak Formation, East Texas. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/17729-PA
- Swapp, Susan (2017). *Science Education Resource Center. Carleton. Geochemical Instrumentation and Analysis. Scanning Electron Microscopy (SEM)*, recuperado de: [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/SEM.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html)
- Thair, A., Sarapää, O. (2008). Clay and clay mineralogy: physical – chemical properties and Industrial uses. GTK, Geological Survey of Finland, publicado el 30 de junio de 2008.
- Theiss, F.L., Ayako, G.A., Frost, R.L. (2013). Stichite: a review. *Clay Minerals*, 48, pp. 143-148, DOI: 10.1180/claymin.2013.048.4.10
- Thorez J. (1976). Practical identification of clay minerals. G. Lelotte (Ed). Dison, Belgique.
- Tiab, D. and Donaldson, E.C. (1996) *Petrophysics. Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Houston (TX), Gulf Publishing.
- Tiab, D., Donaldson, E. (2004). *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir and fluid transport properties*. Elsevier, 8va. Edc., ISBN 0-7506-7711-2
- Walker, B.G. (1957). On the differentiation of vermiculites and smectites in clays. C.S.I.R.O., División of Industrial Chemistry, Melbourne, Australia.
- Wang, A., Freeman, J. J., and Jolliff, B. L. (2015) Understanding the Raman spectral features of phyllosilicates. *J. Raman Spectrosc.*, 46: 829–845. doi: 10.1002/jrs.4680.

- Wang, F., Liao, Q., Xiang, G., & Pan, S. (2014). Thermal properties and FTIR spectra of K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O iron borophosphate glasses. *Journal Of Molecular Structure*, 1060, pp. 176-181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molstruc.2013.12.049>
- Wilson, M.J.; Wilson, L. y Patey, I (2014). The influence of a individual clay minerals on formation damage of reservoir sandstones: a critical review with som new insight. *Clay Minerals*, vol. 43, pp. 147-164, DOI: 10.11/claymin.2014.049.2.02
- Worden, R.; Morad, S. (2003) Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution. *Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Public.*, 34, pp. 3-41
- Zhao, H., Ning, Z., Zhao, T., Zhang, R., Wang, Q. Effects of mineralogy on petrophysical propierties and permeability estimation of the Upper Triasic Yanchang tight oil sandstone in ordos basin, Northern China. *Fuel*, 186, pp. 328-338.