



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 1

Neiva, 20 agosto 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Neiva

El (Los) suscrito(s):

María Camila Hoyos Betancourt, con C.C. No. 1083917815,

Ángela Brighth Caicedo Canchón, con C.C. No.1075303873.

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado "MICROTERMOMETRÍA DE LA FORMACIÓN CABALLOS COMO ROCA ALMACÉN DE LA SUBCUENCA DE NEIVA" presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos.

Autorizamos al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

MARÍA CAMILA HOYOS BETANCOURT

ÁNGELA BRIGITH CAICEDO CANCHÓN



TÍTULO: MICROTERMOMETRÍA DE LA FORMACIÓN CABALLOS COMO ROCA ALMACÉN DE LA SUBCUENCA DE NEIVA

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Hoyos Betancourt	María Camila
Caicedo Canchón	Ángela Brighith

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero Y Segundo Apellido	Primero Y Segundo Nombre
Muñoz Quijano	Ingrid Natalia
Loaiza Garcia	Diego German

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero De Petróleos

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Petróleos

CIUDAD: NEIVA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2019

NÚMERO DE PÁGINAS: 92

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas Fotografías Grabaciones en discos Ilustraciones en general Grabados
Láminas Litografías Mapas Música impresa Planos Retratos Sin ilustraciones Tablas
o Cuadros

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

Español - Inglés

1. MICROTERMOMETRÍA - MICROTHERMOMETRY
2. TEMPERATURA DE HOMOGENIZACIÓN – HOMOGENIZATION TEMPERATURE
3. INCLUSIONES FLUIDAS – FLUIDS INCLUSIONS
4. SALINIDAD – SALINITY
5. DENSIDAD – DENSITY
6. FORMACIÓN CABALLOS – CABALLOS FORMATION



RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La Formación Caballos contiene las principales rocas productoras de hidrocarburos del sistema petrolífero, así, con este proyecto se pretende estudiar por medio de una técnica analítica la Formación Caballos como roca almacén, dicha técnica se denomina Microtermometría de Inclusiones fluidas, la cual permite reconocer temperaturas de formación, determinar algunas variables fisicoquímicas básicas, temperatura de homogenización, densidad y salinidad del fluido en el momento de su atrapamiento o procesos térmicos posteriores, aportando evidencias sobre la historia de distintos eventos en diversos ambientes geológicos en la evolución de la cuenca sedimentaria.

Con los datos obtenidos de Microtermometría se llegó a estimar los valores de la temperatura de homogenización y salinidad, se realizaron los gráficos de histogramas de frecuencias de salinidades (S), los histogramas de frecuencias de temperaturas de homogenización (TH), y los gráficos de salinidad vs temperaturas de homogenización (S vs Th), evidenciando que las inclusiones fluidas halladas en las diferentes muestras analizadas poseen salinidades que varían desde 19.13% a 33.25% eq. en peso NaCl, densidades similares encontradas en los intervalos de 1.08 a 1.15 g/cc y temperaturas de homogenización entre 99.50°C y 187.20°C.

Las temperaturas de homogenización obtenidas en las inclusiones fluidas, indican que en el momento de entrapamiento de las mismas, la roca se encontraba en la ventana de generación de hidrocarburos medianos – livianos, que con procesos diagenéticos posteriores alcanzaron las características actuales de los hidrocarburos de la formación caballos, tal y como se evidencia en muchos de los campos petrolíferos presentes en la zona del Valle Superior del Magdalena.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The Caballos Formation extends along the upper Magdalena Valley basin and is characterized by containing the main hydrocarbon producing rocks of the petroleum system, thus, with this project it is intended to study by means of an analytical technique the Caballos Formation as a reservoir rock, this technique is called Microthermometry of fluid inclusions, which allows to recognize formation temperatures, to determine some basic physicochemical variables, temperature of homogenization, density and salinity of the fluid at the moment of its entrapment, providing evidences on the history of different events in various geological environments throughout the evolution of the sedimentary basin.

With the data obtained from Microthermometry the values of the temperature of homogenization and salinity were estimated, the histograms of salinity frequencies (S), the histograms of homogenization temperature (Th), and graphs of salinity vs. homogenization temperature (S vs. Th), evidencing that the fluid inclusions found in the different samples analyzed have salinities that vary from 19.13% to 33.25% eq. in weight NaCl, similar densities found in the intervals of 1.08 to 1.15 g/cc and homogenization temperatures between 99.50°C and 187.20°C.

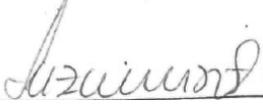
The homogenization temperature obtained in the fluid inclusions indicate that at the time of entrapment of the same, the rock was in the hydrocarbons generation windows of medium-low, which with later diagenetic process reached the current characteristics of the hydrocarbons of the Caballos formation, as evidenced in many of the oil fields present in the area of the Upper Magdalena Valley.



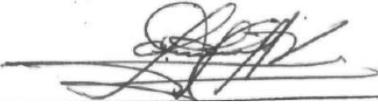
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Jurado: LUZ MARINA BOTERO ROJAS

Firma: 

Nombre Jurado: ISAURO TRUJILLO VASQUEZ

Firma: 



UNIVERSIDAD
SURCOLOMBIANA



**MICROTERMOMETRÍA DE LA FORMACIÓN CABALLOS COMO ROCA
ALMACÉN EN LA SUBCUENCA DE NEIVA**

María Camila Hoyos Betancourt
Ángela Brighth Caicedo Canchón
2019

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
PROGRAMA PETRÓLEOS

Dedicatoria

A Dios y a la Virgencita por permitirme culminar uno de los ciclos más significativos y con mayores experiencias de aprendizaje; a mis padres Gloria Inés y Wilberth, por el apoyo y amor incondicional que siempre me han demostrado, porque esto no hubiese sido posible sin ustedes; a mis abuelitos Leonel, Ana Rosa y Gloria María por darme siempre las fuerzas para no desfallecer en los momentos más críticos; a mis hermanitas, María Del Mar y María José por darle esa chispa de alegría a mi vida y a mi hermano Wilber Fernando, que nos cuida desde el cielo.

María Camila Hoyos Betancourt

A Dios, a mis abuelos, mi madre, mis hermanos, mi tía y demás personas que se cruzaron en mi camino y contribuyeron para que uno de mis sueños se hiciera realidad, este triunfo es más de ustedes que mío.

Ángela Brighth Caicedo Canchón

Agradecimientos

Brindamos nuestro más sincero agradecimiento, por ofrecernos su apoyo incondicional, sin el cual este proyecto no hubiese sido posible realizar a:

- PhD. INGRID NATALIA MUÑOZ QUIJANO, Geóloga y directora. Gracias por la paciencia y el amor que nos dedicó tanto a nosotras como al presente proyecto, por enseñarnos el valor de la constancia y la satisfacción de un trabajo realizado con honestidad y responsabilidad, sin su confianza este proyecto no hubiese sido posible.
- DIEGO GERMAN LOAIZA GARCIA, Geólogo y codirector. Gracias por su aporte en este proyecto.
- Al equipo de laboratoristas de la Universidad de Caldas y en especial énfasis al Geólogo Carlos Betancur, por su gran disposición y carisma durante nuestra estadía en Manizales.
- A nuestra alma mater la Universidad Surcolombiana, por permitirnos gozar de las mejores academias del país, así como desarrollar la iniciación de nuestros proyectos de vida en sus aulas.

RESUMEN

En la industria del petróleo, las propiedades geoquímicas son utilizadas para entender el origen, la migración, acumulación y alteración de los hidrocarburos y en términos generales, la evolución de la cuenca que los contiene. Uno de los parámetros más importantes para entender dicha evolución, es la temperatura de formación del sistema petrolífero.

La Formación Caballos se extiende a lo largo de la cuenca del Valle Superior del Magdalena y se caracteriza por contener las principales rocas productoras de hidrocarburos del sistema petrolífero, así, con este proyecto se pretende estudiar por medio de una técnica analítica la Formación Caballos como roca almacén, dicha técnica se denomina Microtermometría de Inclusiones fluidas, la cual permite reconocer temperaturas de formación, determinar algunas variables fisicoquímicas básicas, temperatura de homogenización, densidad y salinidad del fluido en el momento de su atrapamiento o procesos térmicos posteriores, aportando evidencias sobre la historia de distintos eventos en diversos ambientes geológicos en la evolución de la cuenca sedimentaria.

Con los datos obtenidos de Microtermometría se llegó a estimar los valores de la temperatura de homogenización y salinidad, se realizaron los gráficos de histogramas de frecuencias de salinidades (S), los histogramas de frecuencias de temperaturas de homogenización (TH), y los gráficos de salinidad vs temperaturas de homogenización (S vs Th), evidenciando que las inclusiones fluidas halladas en las diferentes muestras analizadas poseen salinidades que varían desde 19.13% a 33.25% eq. en peso NaCl, densidades similares encontradas en los intervalos de 1.08 a 1.15 g/cc y temperaturas de homogenización entre 99.50°C y 187.20°C.

Las temperaturas de homogenización obtenidas en las inclusiones fluidas, indican que en el momento de entrampamiento de las mismas, la roca se encontraba en la ventana de generación de hidrocarburos medianos – livianos, que con procesos diagenéticos posteriores alcanzaron las características actuales de los hidrocarburos de la formación caballos, tal y como se evidencia en muchos de los campos petrolíferos presentes en la zona del Valle Superior del Magdalena.

ABSTRACT

In the petroleum industry, geochemical properties are used to understand the origin, migration, accumulation and alteration of hydrocarbons and, in general terms, the evolution of the basin that contains those fluids. One of the most important parameters to understand this evolution is the formation temperature of the petroleum system.

The Caballos Formation extends along the upper Magdalena Valley basin and is characterized by containing the main hydrocarbon producing rocks of the petroleum system, thus, with this project it is intended to study by means of an analytical technique the Caballos Formation as a reservoir rock, this technique is called Microthermometry of fluid inclusions, which allows to recognize formation temperatures, to determine some basic physicochemical variables, temperature of homogenization, density and salinity of the fluid at the moment of its entrapment, providing evidences on the history of different events in various geological environments throughout the evolution of the sedimentary basin.

With the data obtained from Microthermometry the values of the temperature of homogenization and salinity were estimated, the histograms of salinity frequencies (S), the histograms of homogenization temperature (Th), and graphs of salinity vs. homogenization temperature (S vs. Th), evidencing that the fluid inclusions found in the different samples analyzed have salinities that vary from 19.13% to 33.25% eq. in weight NaCl, similar densities found in the intervals of 1.08 to 1.15 g/cc and homogenization temperatures between 99.50°C and 187.20°C.

The homogenization temperature obtained in the fluid inclusions indicate that at the time of entrapment of the same, the rock was in the hydrocarbons generation windows of medium-low, which with later diagenetic process reached the current characteristics of the hydrocarbons of the Caballos formation, as evidenced in many of the oil fields present in the area of the Upper Magdalena Valley.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo General	2
1.1.2. Objetivos Específicos	2
1.2. Justificación	3
1.3. Área de investigación	3
1.4. Estado del arte	4
1.5. Metodología	8
1.6. Métodos	9
1.6.1. Análisis Petrográficos	9
1.6.2. Microtermometría	11
1.7. Fundamentos teóricos	12
1.7.1. Petrografía convencional	12
1.7.2. Inclusiones Fluidas	20
2. MARCO GEOLÓGICO	33
2.1. Generalidades	34
2.2. Geología del petróleo	35
2.3. Geología Estructural	38
2.4. Estratigrafía de la Formación Caballos (Kc)	39
3. PETROGRAFÍA	43
3.1. Macroscópica	43
3.2. Microscópica	47
4. INCLUSIONES FLUIDAS	51
4.1. Características Generales	51
4.2. Microtermometría	54
5. RESULTADOS	57
5.1. Petrografía	57
5.2. Microtermometría de las Inclusiones Fluidas	62
5.3. Salinidad y temperatura	68
6. DISCUSIÓN	70
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS	79

Lista de tablas

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la localización de las zonas de estudio.	33
Tabla 2. Caracterización de las muestras de mano sector BOA.	43
Tabla 3. Caracterización de las muestras de mano sector CUCHARO.	44
Tabla 4. Caracterización de las muestras de mano sector NAZARETH.	44
Tabla 5. Caracterización de las secciones, sector BOA.	47
Tabla 6. Caracterización de las secciones, sector CUCHARO.	48
Tabla 7. Caracterización de las secciones, sector NAZARETH.	48
Tabla 8. Datos microtermométricos principales de las IFs en cuarzo.	62
Tabla 9. Datos microtermométricos principales de las IFs en cuarzo	69
Tabla 10. Datos comparativos microtermométricos principales de las IFs en el sector BOA.	71
Tabla 11. Datos comparativos microtermométricos principales de las IFs en el sector CUCHARO	71
Tabla 12. Datos comparativos microtermométricos principales de las IFs en el sector NAZARETH	71

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de las zonas de interés, comprendidas en las planchas 323 y 345 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (Nuñez, et al; 1998).....	4
Figura 2. Microscopio de luz transmitida y polarizada OLYMPUS BX5	11
Figura 3. Composición de las rocas sedimentarias detríticas. Modificado de Chen, et al; 2009..	14
Figura 4. Escala de Granulometría para Rocas Clásticas según Wenworth (Riga, 2006).	15
Figura 5. Esquema de tipos de selección. Modificado de Simpson, 1993.....	16
Figura 6. Carta comparativa de Esfericidad y Redondez. Modificado de Powers, 1953.	17
Figura 7. Clasificación de las rocas sedimentarias clásticas, según Pettijohn. Modificado de Pettijohn, 1957.	19
Figura 8. Clasificación de las rocas sedimentarias clásticas, según Folk. Modificado de Folk, 1954.	20
Figura 9. Mecanismo de captura de fluidos: Fluido aprisionado. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.....	23
Figura 10. Mecanismo de captura de fluidos: Fluido aprisionado. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.....	23
Figura 11. Mecanismo de captura de fluidos: Fluido aprisionado. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.....	23
Figura 12. Mecanismo de captura de Fluidos: Inclusiones de tamaños varios. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.	24
Figura 13. Cicatrización de una fractura en un cristal de cuarzo que da lugar a la formación de inclusiones secundarias. Si este proceso ocurre al tiempo que desciende la temperatura, las inclusiones individuales pueden tener relaciones gas-líquido variable. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.....	24
Figura 14. Localización geográfica de las zonas de estudio.	33
Figura 15. Mapa de clasificación de las cuencas sedimentarias de Colombia (Pardo y Martínez, 2007)	35
Figura 16. Geología general de la subcuenca de Neiva (Nuñez, et al; 1998).	36
Figura 17. Sección transversal esquemática de las subcuencas Girardot y Neiva. Tomado de: Cuencas Sedimentarias Colombianas, Modificado de ANH, 2007.	39
Figura 18. Formación Caballos, sección estratigráfica generalizada quebrada Sardinata – Vereda Nazareth (Nuñez, et al; 1998).	42

Figura 19. Cuarzo-arenitas del sector BOA. A) Caracterización textural BM1. B) Caracterización textural BM2. C) Caracterización textural BM3. D) Caracterización textural BM4.....	45
Figura 20. Cuarzo-arenitas del sector CUCHARO. A) Caracterización textural CM1. B) Caracterización textural CM2. C) Caracterización textural CM3. D) Caracterización textural CM4.	46
Figura 21. Cuarzo-arenitas del sector NAZARETH. A) Caracterización textural NM1. B) Caracterización textural NM2.....	46
Figura 22. Cuarzo-arenitas del sector BOA, de calibrado moderado, que presentan cristales subangulares y porosidades primarias y secundarias. A) Muestra BM1. B) Muestra BM2. C) Muestra BM3. D) Muetsra BM4.....	49
Figura 23. Cuarzo-arenitas del sector CUCHARO, de calibrado moderado, que presentan cristales subangulares - subredondeados y porosidades primarias y secundarias. A) Muestra CM1. B) Muestra CM2. C) Muestra CM3. D) Muestra CM4.	50
Figura 24. Cuarzo-arenitas del sector NAZARETH de calibrado moderado, que presentan cristales subangulares – subredondeados, notoria presencia de meteorizaciób y porosidades primarias y secundarias. A) Muestra NM1. B) Muestra NM2.....	50
Figura 25. Microfotografías del sector BOA: (A) IFs de BM1, secundarias, presentes en fracturas y morfológicamente con formas esferoidales. (B) IFs primarias de BM2 y morfológicamente con formas esferoidales. (C) IFs de BM3, primarias que siguen el patrón de cristalización y morfológicamente con formas esferoidales. (D) IFs primarias de BM4.	53
Figura 26. Microfotografías del sector CUCHARO: (A) Muestra CM1 con aspecto turbio debido a la cantidad de IFs, de tipología primaria y morfológicamente con formas esferoidales a ovaladas. (B) IFs primarias de CM2 y morfológicamente con formas esferoidales a ovaladas.	53
Figura 27. Microfotografías del sector NAZARETH: (A) NM1 con aspecto turbio debido a la cantidad de IFs, de tipología primaria y morfológicamente con formas esferoidales a ovaladas. (B) IFs secundarias de la muestra NM2, presentes en fracturas y morfológicamente con formas esferoidales.	54
Figura 28. Microfotografías de las muestras durante el desarrollo del proceso Microtermométrico. A) Muestra ejemplo (BM3) con IF a temperatura ambiente (Ta). B) Muestra ejemplo (BM3) con IF, completamente congelada, correspondiente a la Temperatura de nuclearización. C) Muestra ejemplo (BM3) con aparición de primera burbuja, correspondiente a Tm. D) Muestra ejemplo (BM3) donde se observa evaporación total del líquido (sin burbuja), corresponde a Th.	56
Figura 29. Diagrama de torta de la comparación porcentual de los tipos de calibrado presentes en las muestras de mano analizadas.....	58
Figura 30. Diagrama de barras comparativo de la redondez y la esfericidad según Wandel para los sectores estudiados.....	58

Figura 31. Diagrama de barras comparativo de la redondez y la esfericidad según Wandel para los sectores estudiados.....	59
Figura 32. Principales constituyentes del sector BOA. Principales constituyentes de las muestras analizadas.....	60
Figura 33. Principales constituyentes del sector CUCHARO. Principales constituyentes de las muestras analizadas.....	61
Figura 34. Principales constituyentes del sector NAZARETH. Principales constituyentes de las muestras analizadas.....	61
Figura 35. Gráficos comparativos de las temperaturas de homogenización para cada muestra de: (A) Sector BOA, (B) Sector CUCHARO y (C) Sector NAZARETH.	63
Figura 36. Histogramas de frecuencias para las temperaturas de homogenización de: (A) Sector BOA, (B) Sector CUCHARO y (C) Sector NAZARETH.....	65
Figura 37. Histogramas de frecuencias para las temperaturas de fusión del hielo de: (A) Sector BOA, (B) Sector CUCHARO y (C) Sector NAZARETH.....	66
Figura 38. Gráfico de covarianza $T_m - T_h$, que muestra las diferencias entre los sectores analizados.....	66
Figura 39. Valores microtermométricos de los sectores analizados: (A) Distribución de frecuencia de T_h ; (B) Distribución de frecuencia de T_m	68
Figura 40. Gráfico de covarianza $T_h - \text{Salinidad}$ que muestra la diferencia en % eq. W_t entre los sectores analizados.....	69
Figura 41. Condiciones de generación de petróleo y gas en función de la profundidad, relacionadas con los estadios de diagénesis, la reflectancia de la vitrinita (R_0) y la temperatura (T). La línea interrumpida roja corresponde al rango en el que se encuentra la Formación Caballos (Tissot, et al; 1974).	72
Figura 42. Gráfico analogía de los análisis microtermométricos con la tipología de yacimiento T_h vs. Salinidad que muestra la ubicación de los datos microtermométricos dentro de los depósitos mineralógicos existentes (Sociedad, et al; 2010).....	74

1. INTRODUCCIÓN

La Cuenca del Valle Superior del Magdalena (VSM) es una cuenca sedimentaria madura, donde se presenta un sistema petrolífero, en el que la roca fuente está conformada por el Grupo Villeta, la roca reservorio por la Formación Caballos y el grupo Guadalupe y la Roca Sello por la Formación Caballos y el Grupo Villeta; con una extensión promedio de roca generadora de 200 metros, una extensión de cocina de 3192 Km² y un potencial de recursos en un área del 90% de 22.20 BBP (García, *et al.*, 2009). La formación Caballos es una de las rocas almacén más importantes en el sistema petrolífero del Valle Superior del Magdalena y su estudio el objeto del presente avance del proyecto del método utilizado para la investigación.

Para el reconocimiento y posterior clasificación de las rocas de la formación en cuestión, se utilizan técnicas macroscópicas y microscópicas basadas en las clasificaciones de rocas siliciclásticas, determinando también parámetros como porosidad, ambiente de formación, diagénesis y meteorización.

Para el análisis de Microtermometría se realiza un estudio de las inclusiones fluidas, que permiten registrar información de fluidos que no se degradan, devolatilizan ni se contaminan durante o después del entrapamiento, documentando diferente información que en conjunto permite determinar ambientes de formación, origen de los fluidos, grado de maduración, procesos de formación, migración, salinidad y entrapamiento. De esta forma se obtiene una visión en conjunto de los eventos térmicos a los que estuvo sometida

la roca estudiada, los fluidos migratorios, el agua de formación y la evolución del sistema petrolífero.

1.1.Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Realizar Microtermometría de las rocas de la Formación Caballos, que permita entender la migración de fluidos, su historia térmica y la composición de los fluidos que han atravesado la formación en su evolución térmica, para entender a más profundidad el sistema petrolífero que forma y sus potencialidades.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Verificar antecedentes de estudios sobre Microtermometría en rocas siliciclásticas, que se hubiesen realizado en el país y que puedan servir para caracterizar yacimientos de hidrocarburos análogos en la región de la subcuenca de Neiva.
- Realizar estudios diagenéticos, que incluyan: petrografía y análisis de inclusiones fluidas, para analizar a detalle las características fundamentales de las rocas de la Formación Caballos en el área de estudio.
- Reconocer las características de entrapamiento de los fluidos migratorios y de formación en las Rocas de la formación Caballos que afloran en las zonas de estudio.
- Motivar a la industria petrolera a profundizar en el conocimiento de estudios diagenéticos en las formaciones productoras, para entender mejor el sistema

petrolífero y por ende su potencialidad en el reconocimiento de nuevas reservas de hidrocarburos.

1.2. Justificación

Las limitadas reservas petrolíferas de Colombia, pueden hacer que el país pierda su autosuficiencia energética en menos de 10 años, según estudios de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH., 2012), lo cual hace sea indispensable desarrollar investigaciones enfocadas al mejoramiento y optimización de la explotación, además de encontrar nuevos campos de exploración de hidrocarburos y potencializar los existentes; para ello es fundamental fortalecer los proyectos de exploración que permitan tener un mejor conocimiento de las cuencas petrolíferas de Colombia y sus sistemas petrolíferos, en consecuencia se hace necesaria la utilización de métodos que permitan conocer las diferentes propiedades de dichos sistemas desde su formación permitiendo un profundo conocimiento geológico de las zonas de interés, facilitando así el entendimiento de los distintos fenómenos encontrados en el subsuelo.

1.3. Área de investigación

El área del proyecto se centra en tres zonas ubicadas en la subcuenca de Neiva del Valle Superior del Magdalena (VSM); sector Falla de la Boa, sector Cucharo y sector vereda Nazareth, comprendidos en las planchas 323 y 345 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (*Fig. 1*).

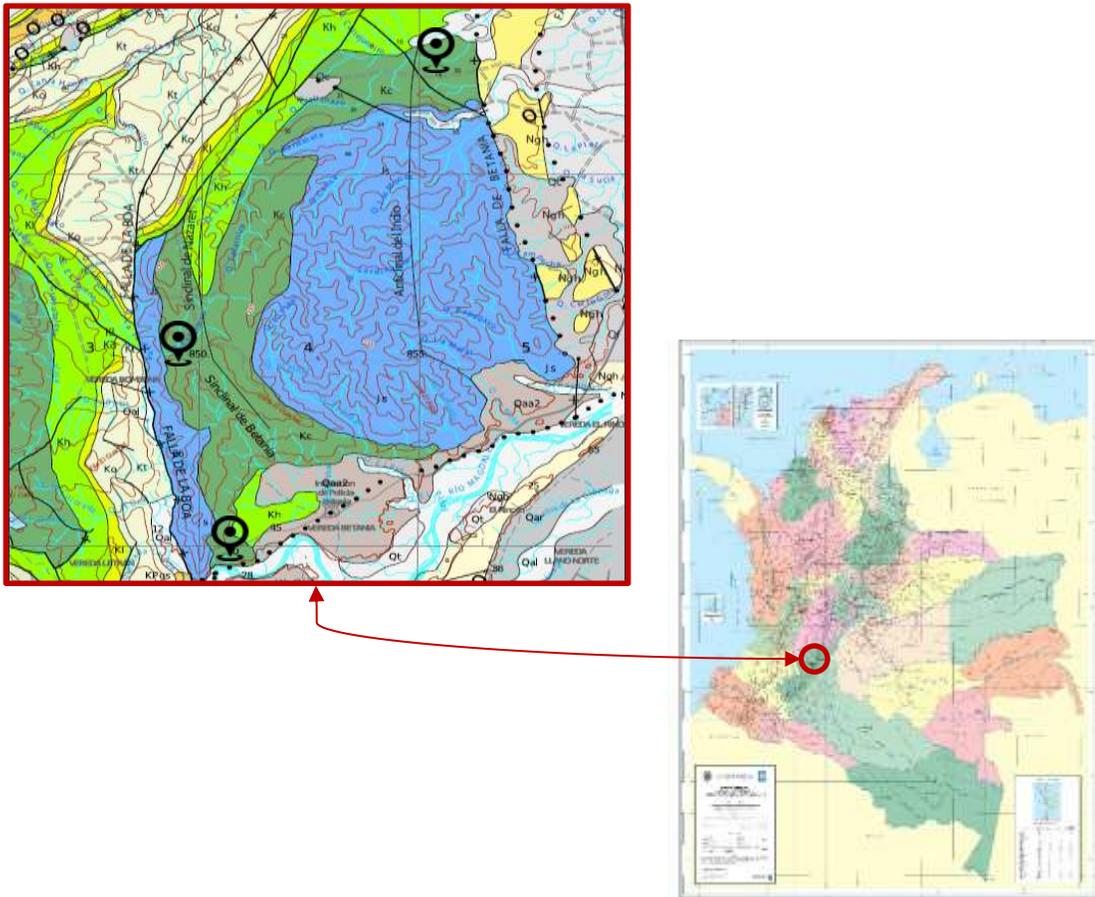


Figura 1. Ubicación geográfica de las zonas de interés, comprendidas en las planchas 323 y 345 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (Nuñez, et al; 1998)

1.4. Estado del arte

La cuenca del VSM ha sido objeto de múltiples estudios y proyectos de investigación, así, de interés para las zonas en cuestión se recopiló información oficial producida tanto por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) como por entidades públicas como la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) y la Universidad Industrial de Santander (UIS) y estudios privados llevados a cabo por compañías petroleras.

Si bien existen diferentes investigaciones en el campo de la geología, estratigrafía, y petrografía que han analizado las rocas de la Formación Caballos del VSM o sus diferentes nomenclaturas (De Porta, 1965) (Franco, *et al*; 1990); para los intereses propios del presente trabajo se consideran los estudios en las zonas y cercanos o similares que estén relacionados con la implementación de la Microtermometría de las rocas en cuestión, que permitan entender la migración de fluidos, su historia térmica y la composición de los fluidos que han atravesado la formación en su evolución y diagénesis, para entender a más profundidad el sistema petrolífero que forma y sus potencialidades.

El primero de ellos es el trabajo de Grado de la Universidad Nacional de Colombia por Maria Elena Montaña Quintero (Montaña, 2015), dirigido por el MSc. Juan Carlos Molano, resaltando que sin importar que la zona de interés no es consecuente con la zona en cuestión dicho trabajo realiza a caracterización de la formación Loma Gorda por técnicas petrográficas y de Microtermometría, calificándola como un prospecto potencial para yacimientos no convencionales de hidrocarburos, en donde las características del ambiente sedimentario son óptimas para la formación de rocas generadoras de hidrocarburos ya que, las temperaturas de entrapamiento se encontraron dentro del rango de la ventana de generación de hidrocarburos con aceites medianos – ligeros, con características frágiles a la roca que la harían útil para fracturamiento hidráulico.

El segundo trabajo se enfoca en la formación de interés del presente trabajo, este fue desarrollado como trabajo de grado de la Universidad Surcolombiana por Luz Alexis Palencia Barona y Mario Fernando Chávarro Hernández (Chavarro y Palencia, 2013), dirigido por el MSc. Roberto Vargas Cuervo, en dicho documento se encuentra de una manera clara y concisa, la información sobre la estratigrafía de la subcuenca Neiva, incluyendo la descripción de las diferentes formaciones productoras del área. También está incluido un marco general, estratigráfico y estructural de los diferentes campos petroleros del área de estudio, que son; Brisas, Santa Clara y Dina Terciarios, por lo tanto, la información suministrada permite avanzar más en el conocimiento petrofísico de los campos petroleros y tener un estudio más detallado de las formaciones productoras pertenecientes a la Subcuenca Neiva. Además, permite complementar la información petrofísica existente en los campos del Huila, en especial la Subcuenca Neiva.

Gaona y Sánchez en su proyecto Caracterización diagenética y petrofísica de las rocas carbonatadas fms. hondita-lomagorda, sector cueva del tigre, municipio de Yaguará – Huila, con potencial para yacimientos de hidrocarburos desarrollado en área del Valle Superior del Magdalena (VSM), específicamente en el sector comprendido entre la Cueva del Tigre y la quebrada el Ocal; realizaron un análisis tanto macro como microscópicamente mediante el uso de secciones delgadas pulidas y la implementación de la catodolumiscencia, clasificando las rocas que

cumplen con características favorables para generación y almacenamiento de Hidrocarburos (Gaona y Sánchez, 2018).

K. R. Randive mediante su trabajo de pos grado en el departamento de geología de la universidad de Nagpur en India, realizaron un estudio detallado sobre la metodología a implementar en el método de la microtermometría (Randive, *et al*; 2014), en el que esbozan de manera detallada el estudio y prospectos de resultados del análisis de las inclusiones fluidas por medio de la técnica ya mencionada.

En el año 2008 el INGEOMINAS y la ANH iniciaron el proyecto conjunto “Actualización del Mapa Geotérmico de Colombia”, cuya primera versión fue elaborada por INGEOMINAS en el año 2000, con el objetivo de promover la investigación del flujo de calor terrestre y de generar un mapa basado en información actualizada y medida (Alfaro, *et al*; 2009); para el Valles Superior del Magdalena (VSM) establecieron como gradiente mínimo de temperatura 11.2 °C/Km y como máximo gradiente de temperatura 59.4 °C/Km.

Por último, en toda la cuenca del VSM, varían la cantidad de estudios realizados por parte de la industria petrolera, servicio geológico nacional, la agencia nacional de hidrocarburos y diferente Universidades en el marco de la geología económica, que han determinado desde los sistemas petrolíferos (Córdoba, *et al*; 1994) hasta estudios geoquímicos, estratigráficos y geodinámicas (ANH, 2009).

1.5. Metodología

El desarrollo del trabajo de grado se basó en una metodología práctico – investigativa, dividida en seis fases:

- 1) Primera fase (F1): Documentación y análisis bibliográfico y cartográfico preliminares y detallados. Es así como, se efectuó una consulta de libros, artículos, planos, trabajos de grado, Documentación del alma mater la Universidad Surcolombiana, Ecopetrol (ECP), la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), el Servicio Geológico Colombiano (SGC), informes de consultoría y páginas Web, cuya temática se refería a las características geológicas de las areniscas de la formación caballos en la subcuenca de Neiva. Posteriormente en el análisis cartográfico se trabajó las planchas 323 y 345 del Agustín Codazzi (Nuñez, *et al*; 1998)
- 2) Segunda fase (F2): Reconocimiento de campo y recolección de muestras de mano. Para ello se trabajó en la zona para recolección de muestras un total de 15 días, donde se realizó el reconocimiento geológico de las rocas de interés y los reconocimientos de campo específicos, utilizado el método geológico establecido.
- 3) Tercera fase (F3): Se llevó a cabo el trabajo de laboratorio mediante el análisis y la descripción macroscópica de muestras de mano. Corresponde a las actividades mediante las cuales se realizó una descripción macroscópica de las muestras recolectadas en campo y se realizó una base con datos específicos de cada una de ellas.

- 4) Cuarta (F4): Trabajo de laboratorio descripción petrográfica y Microtermometría. Se realizaron análisis petrográficos y de Microtermometría de secciones delgadas doblemente pulidas obtenidas a partir de rocas del muestreo sistemático con el fin de determinar las principales características mineralógicas, petrográficas y térmicas de las rocas de la Formación Caballos en la zona de estudio.
- 5) Quinta fase (F5): Trabajo de Oficina e interpretación de datos. Con base en la información obtenida en la fase anterior se procesaron los análisis y se interpretaron los datos resultantes.
- 6) Sexta fase (F6): Síntesis, integración, evaluación e interpretación de resultados correspondientes a las fases F1, F2, F3, F4, y F5. Se realizó una interpretación y evaluación de toda la información geológica, estratigráfica, estructural y térmica, dentro del marco de la caracterización de las rocas la Formación Caballos en la zona de estudio.

1.6. Métodos

1.6.1. Análisis Petrográficos

Para obtener una idea general de la composición de las muestras de rocas obtenidas se llevó a cabo una caracterización tanto Textural como Composicional.

1.6.1.1. Petrografía Macroscópica

Se recolectaron diez muestras y se realizó una descripción macroscópica de las mismas, sintetizando las características texturales más generales como lo son el color y la compactación, después las de mayor detalle; el tamaño de las partículas se describió utilizando la escala granulométrica para rocas clásticas según Wentworth (*Ver Fig. 4*), teniendo en cuenta que las rocas sedimentarias están constituidas por materiales de diferentes tamaños lo siguiente que se describió fue el calibrado, comparando la uniformidad en el tamaño de los granos de las diferentes muestras; siguiendo la escala de granulometría para rocas clásticas según Wenworth (*Ver Fig. 4*) se precisa la esfericidad y la redondez de los granos que componen las muestras, al determinar la presencia de diversos tamaños de sedimento. Para la descripción composicional se reconoce el tipo de cemento y el tipo de mineral, se determinaron porcentajes para los principales componentes observados y por medio del triángulo para la clasificación composicional de las areniscas (*Ver Fig. 7*) se estipuló el nombre de cada muestra de mano. Por medio de observación se identifican las estructuras sedimentarias presentes en las rocas y por último y en base a las características determinadas se ubica el ambiente sedimentario correspondiente para cada una de las muestras.

1.6.1.2. Petrografía Microscópica

El análisis de petrografía consistió en la identificación microscópica de las muestras previamente preparadas (10 secciones gruesas con pulido doble de

100-1200 μm), para determinar los minerales presentes y sus características texturales y litológicas, tanto con luz polarizada como transmitida, para ello se utilizó un Microscopio de Luz Transmitida OLYMPUS BX51. (Ver figura 2).



Figura 2. Microscopio de luz transmitida y polarizada OLYMPUS BX5

1.6.2. Microtermometría

1.6.2.1. Análisis de las Inclusiones Fluidas (IF)

Se prepararon 10 secciones gruesas con pulido doble (100-1200 μm) y se analizaron para la inclusión de fluidos y Microtermometría. Las secciones fueron preparadas por MinerLab y las mediciones microtermométricas de las IFs se realizaron en la universidad de Caldas.

Las inclusiones se enfriaron y se calentaron a diferentes velocidades de acuerdo con la naturaleza de la muestra mediante la utilización de un microscopio Scope proporcionado por la Universidad de Caldas. Se registraron las temperaturas de los cambios de fase, incluida la temperatura de fusión (T_m)

la temperatura de nuclearización (T_n), y finalmente la temperatura de homogeneización (T_h).

Después de las mediciones, se realizaron cálculos termodinámicos para determinar la composición y la densidad de los fluidos atrapados en las inclusiones. Los cálculos emplearon el paquete de programas FLUIDS (Bakker 2001b, 2003), incluidos el programa BULK COMPOSITION y AQSO1.

Al principio, la salinidad de las IF se calculó con una composición para el sistema ($\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$), siguiendo a Bakker (Gasparrini y Bakker, 2006).

El programa AQSO1 se utiliza para convertir la salinidad de diferentes tipos de IFs en la ecuación wt Sistema\% NaCl (Bodnar, 1993), permitiendo realizar los cálculos termodinámicos.

1.7.Fundamentos teóricos

1.7.1. Petrografía convencional

Para la el reconocimiento y posterior clasificación de cada una de las muestras se utilizaron técnicas macroscópicas y microscópicas basadas en rocas sedimentarias clásticas, determinando de igual manera parámetros como porosidad, ambiente de formación, diagénesis y meteorización.

Las rocas sedimentarias clásticas son aquellas formadas por partículas minerales y fragmentos de rocas de varios tamaños producto de la meteorización y/o erosión de rocas preexistentes.

Los constituyentes de la roca (*Fig. 3*) son:

A. Alogénicos: Son aquellos transportados al sitio de depositación y son:

- Esqueleto de granos: Corresponde a aquellas partículas que se depositan posterior al transporte o que se presentan como el resultado de residuos después de la meteorización.

- Matriz: es aquel material intergranular, es decir, el material de tamaño más fino depositado entre los granos.

B. Autigénicos: Son aquellos precipitados en el sitio de depositación.

- Cemento: Hace referencia a los minerales que se precipitan después de la depositación, productos de los procesos diagenéticos.

C. Sistema Poroso: Comprende aquellos espacios, cavidades vacías y/o huecos en la roca, que se clasifican en:

- Primarios: Son aquellos que se generan en los primeros momentos después de la depositación.

- Secundarios: Son aquellos que son productos de la disolución de os minerales o fracturas durante la diagénesis.

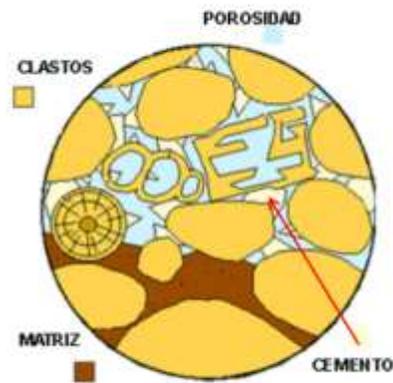


Figura 3. Composición de las rocas sedimentarias detríticas. Modificado de Chen, et al; 2009.

1.7.1.1. Características de las rocas sedimentarias clásticas

En general, las rocas sedimentarias clásticas se conforman por las siguientes características:

Características Primarias

A. Tamaño de grano

Las escalas utilizadas para definir los tamaños de granos en sedimentos y en rocas sedimentarias son escalas que son creadas por subdivisiones arbitrarias impuestas por la continuidad natural. La terminología más familiar (*Fig. 4*), que incluye tres clases mayores: Grava, arena y arcillas, con sus subdivisiones (Riga, 2006).

Wentworth Size Class		mm scale	phi scale
Boulder > 256 mm (-8 to -12 ϕ)	Pebbles	256 to 4	-8 to -2
	Gravel	4 to 2	-2 to -1
Very coarse and Coarse sand	Coarse sand	2 to 0.5	-1 to 1
	Medium sand	0.5 to 0.25	1 to 2
Fine and Very fine sand	Very fine sand	0.25 to 0.06	2 to 4
	Silt	0.06 to 0.004	4 to 8
Clay	< 0.004	> 8.00	

Figura 4. Escala de Granulometría para Rocas Clásticas según Wentworth (Riga, 2006).

B. Selección

El rango en el tamaño de grano en una roca clástica es conocido comúnmente como escogimiento. Este puede ser contabilizado por medio de un histograma de la distribución del tamaño de grano, sin embargo es más frecuente utilizar cartas visuales como las que se muestran a continuación (Ver Fig. 5) (Pettijohn, *et al*; 1957).

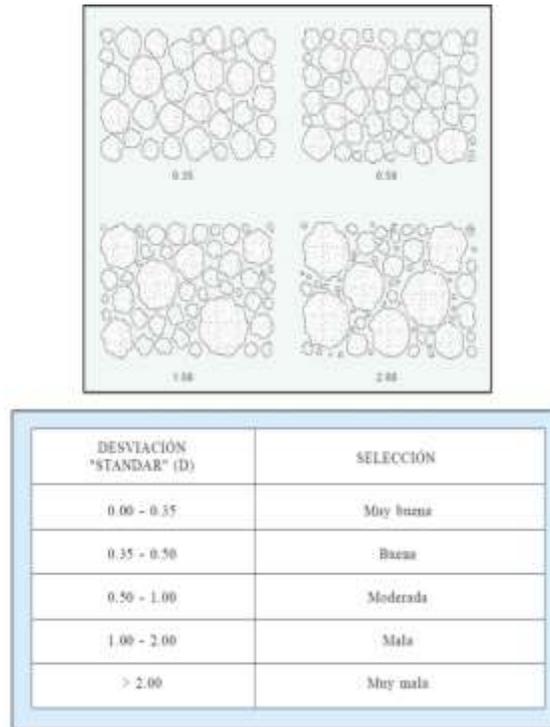


Figura 5. Esquema de tipos de selección. Modificado de Simpson, 1993.

C. Redondez y Esfericidad

La redondez es definida como el promedio de radios de curvatura en las esquinas. Obtener la redondez de esta manera es muy subjetivo y se tiende a cometer errores. Por esta razón la mayoría de los geólogos definen la redondez de los granos, en rocas o sedimentos, con las cartas comparativas como la mostrada en la (Ver Fig. 6) (Andrade, 2003).

La forma se refiere a los atributos envolventes de la morfología en tres dimensiones, por ejemplo, la variación de 3 ejes que definen la forma geométrica. La medida utilizada es la esfericidad, que se refiere a la

proximidad de la forma a la esfera, normalmente se usa una carta visual estimada como ayuda (Ver Fig. 6) (Carrillo, *et al.* 1993).

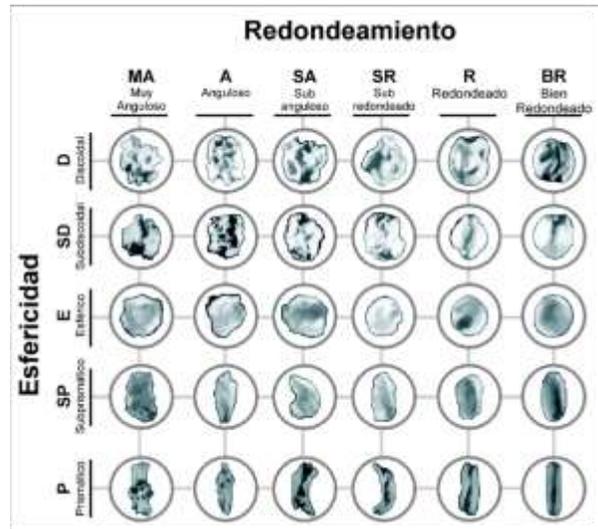


Figura 6. Carta comparativa de Esfericidad y Redondez. Modificado de Powers, 1953.

Mineralogía Detrítica

Los minerales formadores de la roca (framework grains) se encuentran conformados por:

- A. Cuarzo: Puede presentarse monocristalino o policristalino.
- B. Grupo de los Feldespatos: Que pueden ser Potásicos como la Ortosa, Microclino, Sanidina y Alcalinos como la Serie de las Plagioclasas.
- C. Fragmentos Líticos: Cualquier fragmento de roca preexistente, comúnmente: chert, fragmentos de roca ígnea, de roca metamórfica, de roca sedimentaria clástica y de roca sedimentaria carbonática (Carrillo, *et al.*; 1993).

Sistema Poroso

A. Clasificación del Sistema Poroso.

El sistema poroso se puede clasificar si la porosidad ocurre en el momento de la depositación (primaria) o posterior a ésta (secundaria) (González, 1996).

Como porosidad primaria, se tiene:

- Intergranular: Entre los granos en el momento de la depositación.
- Intragranular: Se puede dar dentro de fragmentos de rocas y fósiles.

La porosidad secundaria se origina por:

- Disolución de granos detríticos.
- Disolución de cemento autigénico.
- Fracturamiento.

Clasificación de Rocas Clásticas

Clasificación según Pettijohn, 1957

La clasificación de Pettijohn (*Ver Fig. 7*) se basa en los granos del esqueleto (cuarzo, feldespatos y fragmentos de rocas), considera arenas limpias (arenitas) si tienen menos del 15% de matriz y sucias (wackas) si tienen más de 15% de matriz. El lado horizontal del triángulo representa el rango de 0 -100% de feldespato (izquierda a derecha) y fragmento de roca

de derecha a izquierda. La línea vertical representa el rango de 0-100% del contenido de cuarzo (de abajo a arriba).

El siguiente triángulo es para clasificar las areniscas sucias (más de 15% de matriz), considerando matriz a todas las partículas menores de 30 micras, en vez de las 40 micras (1/256) de la escala de Wentworth. Si el porcentaje de matriz es mayor al 75% se considera la roca como lutita y no como arenisca (Pettijohn, *et al*; 1957).

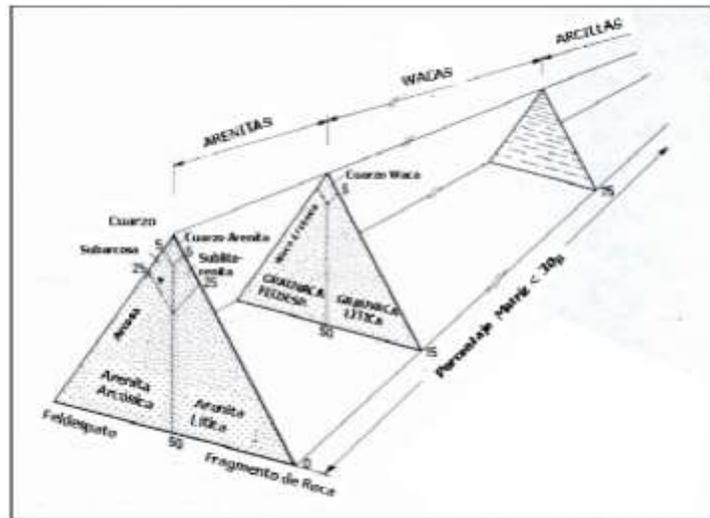


Figura 7. Clasificación de las rocas sedimentarias clásticas, según Pettijohn. Modificado de Pettijohn, 1957.

Clasificación Según Folk, 1954

Según la clasificación de Folk, 1954 (Ver Fig. 8) presenta la línea horizontal subdividida según la relación entre los feldspatos y los fragmentos de rocas (F/FR) y en la línea vertical se consideran los porcentajes de cuarzo de abajo hacia arriba en el porcentaje de 0 a 100%. Al igual que Pettijohn, también considera al chert como parte de los

fragmentos de rocas. Adicionalmente presenta otros triángulos para clasificar las rocas cuando el porcentaje de fragmentos de roca son mayores al 50%, así tiene: Triángulos con VRF, MRF SRF, llamándose las rocas volcanoarenita, filarenita y sedarenita, respectivamente. En el caso de esta última, tiene otra clasificación dependiendo de si predomina el chert, el carbonato o la arcilla. Una diferencia importante con Pettijohn es que Folk no toma en cuenta la matriz, ya que como se explicó anteriormente, se utiliza para clasificar la madurez textural de la roca y en su clasificación simplemente se excluye de la normalización (Orozco, *et al*; 2014).

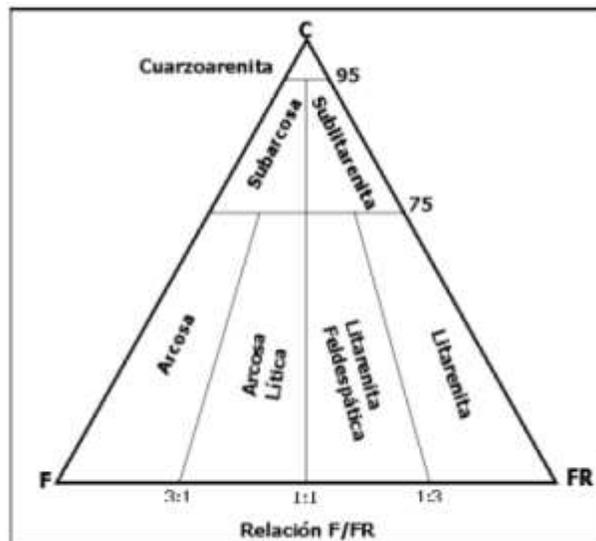


Figura 8. Clasificación de las rocas sedimentarias clásticas, según Folk. Modificado de Folk, 1954.

1.7.2. Inclusiones Fluidas

El origen de un mineral, es la consecuencia de una serie de procesos geológicos relacionados entre sí a lo largo del tiempo. En el curso de estos

fenómenos geológicos, tanto hidrotermales como magmáticos y metamórficos el papel de los fluidos es muy importante. Fluidos contemporáneos con la formación de las rocas o fluidos que intervienen posterior al origen y que se introducen por las fracturas (Mangas y Sierra, 1991).

Muestras de estos fluidos quedan atrapadas en pequeñas cavidades o lagunas de cristalización (la mayoría menores de $100\mu\text{m}$), que reciben el nombre de **inclusiones fluidas** (Mangas y Sierra, 1991). Por lo tanto, una inclusión fluida se forma cuando una cavidad o laguna de crecimiento de un mineral, se rellena por uno o varios fluidos en los cuales pueden además haber uno a más minerales sólidos y en consecuencia se pueden encontrar en una o más fases.

Clasificación de las inclusiones Fluidas

Los criterios que se utilizan normalmente para ello se basan en la composición, origen y/o proporción relativa de las fases presentes (Roedder 1971). Hoy en día, indistintamente cualquiera de estos criterios, pues resulta difícil, y a veces imposible, tener toda la información necesaria para encuadrar las inclusiones dentro de los tipos establecidos.

El criterio más ampliamente utilizado se basa en el origen. Las inclusiones fluidas pertenecen rara vez a una sola generación, ya que el atrapamiento de los diferentes fluidos puede tener lugar en el tiempo, con varios millones de años de separación y, por ello, las soluciones pueden mostrar

grandes diferencias de composición. Así, Roedder establece ciertos parámetros geométricos y morfológicos para distinguir la cronología de las inclusiones, si bien ninguno de ellos es definitivo. A partir de las observaciones microscópicas, se puede distinguir tres tipos genéticos de inclusiones: primarias, secundarias y pseudosecundarias.

A. Primarias: Cuando los cristales crecen o recristalizan en un medio fluido de naturaleza homogénea se forman irregularidades de crecimiento capaces de atrapar pequeñas porciones del fluido. El sellado de tales irregularidades da lugar a la formación de las inclusiones fluidas primarias, las cuales se localizan en el avance de las caras, aristas y vértices del cristal. Estas inclusiones son las más representativas de las condiciones termodinámicas presentes en el momento del atrapamiento, por ende al ser accidentes en el proceso de crecimiento, se distribuyen al azar.

En ese orden de ideas, Roedder esboza los mecanismos de captura de fluidos más comunes que se pueden presentar durante el crecimiento cristalino, así:

- Las capas sucesivas que forman el cristal no son estrictamente planas aunque el flujo de nutrientes sea uniforme. Normalmente se fijan sobre ellas gérmenes de tamaño diferente, formándose en la superficie vacíos y cavidades donde puede quedar aprisionado el fluido que rodea al cristal (*Ver Fig. 9*) (Mangas y Sierra, 1991).

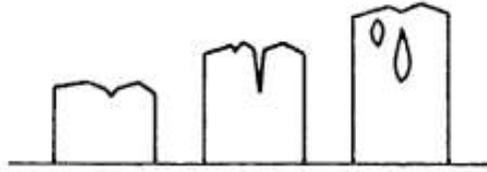


Figura 9. Mecanismo de captura de fluidos: Fluido aprisionado. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.

- La disolución parcial de un mineral precoz produce numerosos entrantes en la superficie cristalina. Cuando continúa el crecimiento, se pueden formar inclusiones grandes, o bandas de inclusiones pequeñas, en las irregularidades de la superficie (Ver Fig. 10) (Mangas y Sierra 1991).

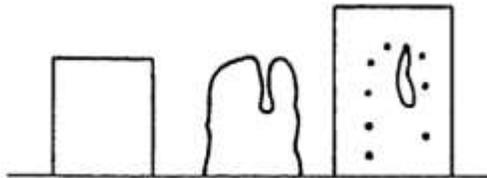


Figura 10. Mecanismo de captura de fluidos: Fluido aprisionado. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.

- Cuando algún objeto sólido se fija a la superficie de un cristal en vías de crecimiento, puede quedar englobado como inclusión sólida y capturar al mismo tiempo alguna inclusión fluida (Fig. 11) (Mangas y Sierra, 1991).

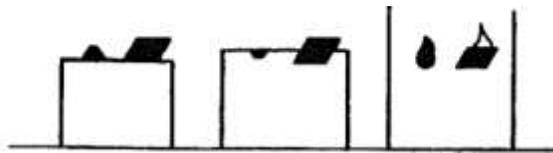


Figura 11. Mecanismo de captura de fluidos: Fluido aprisionado. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.

El crecimiento rápido de un mineral puede dar lugar a la formación de un cristal con bordes esqueléticos o dendríticos. Si a este episodio sucede otro de

crecimiento más lento, pueden quedar atrapadas en el cristal inclusiones de tamaño variado (*Ver Fig. 12*) (Mangas y Sierra, 1991).

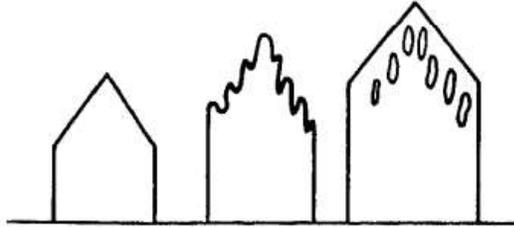


Figura 12. Mecanismo de captura de Fluidos: Inclusiones de tamaños varios. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.

B. Secundarias: Se incluyen aquí todas las inclusiones que se originan con posterioridad a la formación del cristal. Así pues, si un cristal se fractura en presencia de un fluido de solubilidad finita, el fluido penetra en la fractura y comienza una acción de disolución y recristalización del mineral, reduciendo la superficie y atrapando un conjunto de inclusiones secundarias (*Ver Fig. 13*) (Mangas y Sierra, 1991).

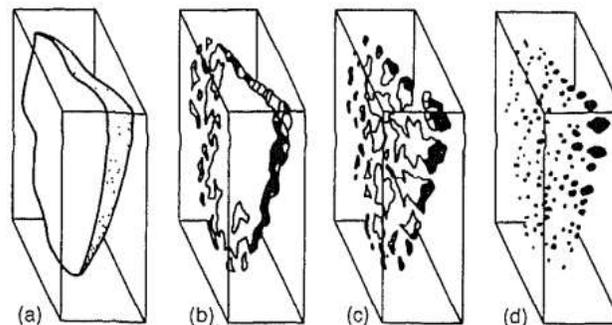


Figura 13. Cicatrización de una fractura en un cristal de cuarzo que da lugar a la formación de inclusiones secundarias. Si este proceso ocurre al tiempo que descende la temperatura, las inclusiones individuales pueden tener relaciones gas-líquido variable. Modificado de Mangas & Sierra, 1991.

El estudio de las inclusiones fluidas de diversas fracturas, ayudan a determinar y comparar los diferentes fluidos que han atravesado una roca, así como la cronología de los mismos.

Las inclusiones primarias reflejan el fluido presente durante el crecimiento del cristal, mientras que las inclusiones secundarias corresponden a soluciones posteriores posiblemente no relacionadas con los fluidos responsables del crecimiento (Goldstein y Reynolds, 1994).

Las características que permiten distinguir las inclusiones primarias de las secundarias son muy ambiguas. En general, las inclusiones primarias aparecen aisladas o se desarrollan a favor de los planos cristalográficos, mientras que las secundarias se disponen a lo largo de fracturas recrystalizadas (Roedder, 1971).

Cabe resaltar que el diámetro de las inclusiones fluidas no es diagnóstico para distinguir entre primarias y secundarias.

Morfología

La morfología de las inclusiones no tiene relación con el origen de las inclusiones, existen las siguientes formas:

- A. Forma suave (esféricas o elípticas).
- B. Forma irregular.
- C. Forma de cristal negativo (hueco con forma cristalina del mineral que contiene la inclusión fluida).

La presentación de datos de inclusiones fluidas se realiza mediante histogramas en los que se representan las temperaturas de homogenización medidas y mediante gráficos xy en los que se plotean la salinidad de las inclusiones versus la temperatura de homogenización. Como se indicó anteriormente la ebullición del fluido hidrotermal producirá el atrapamiento de fluidos en la línea de fase entre líquido y vapor, consecuentemente las evidencias de ebullición en inclusiones fluidas serán (Mangas y Sierra 1991):

- A. Coexistencia de inclusiones ricas en líquido y ricas en vapor en las cuales el atrapamiento fue contemporáneo (Cuidado: un mineral con microfracturas puede contener 2 tipos de inclusiones ricas en líquido y ricas en vapor, pero formadas en distintos períodos; en este caso no son evidencia de ebullición).
- B. La temperatura de homogenización es igual en ambos tipos de inclusiones.
- C. La salinidad debe corresponder entre ambos tipos de inclusiones.

Microtermometría

La Microtermometría se basa en la medida de las temperaturas a las que se producen los cambios de fases en las inclusiones cuando éstas se someten a un progresivo aumento de la temperatura entre - 180 y +600°C, entre ellos, la fusión de un líquido solidificado previamente, la fusión de fases sólidas (sales, hidratos, etc.) y la homogeneización de sistemas gas-líquido en una sola fase gaseosa o líquida. Las temperaturas de fusión dan valores indicativos sobre el mismo fluido

atrapado, mientras que las temperaturas de homogeneización permiten estimar su densidad, una vez que el mismo se conoce. Las temperaturas de homogeneización se consideran temperaturas de formación de las inclusiones siempre que la presión durante su captura no haya excedido la presión de vapor de equilibrio de la solución. En el caso contrario será necesario introducir correcciones de temperatura debidas a la presión (Mangas and Sierra, 1991).

Proceso de Enfriamiento: A temperatura ambiente, las diferentes inclusiones fluidas pueden presentar una fase líquida, una gaseosa y otra líquida, una fase gaseosa y dos líquidas, etc.; y en cualquiera de ellas es posible encontrar la presencia de fases sólidas.

En los procesos de enfriamiento, las inclusiones se congelan y se procede a su recalentamiento hasta temperatura ambiente mediante el simple contacto del aire atmosférico con la platina. Generalmente la congelación se produce bruscamente, observándose una pérdida de transparencia en el contenido de la inclusión, la cual adquiere un aspecto escarchado. Mientras que durante el calentamiento o bien se recupera la transparencia original instantáneamente o bien se observa una fusión lenta del contenido solidificado.

Durante el proceso, se producen ciertos cambios característicos que permiten identificar cualitativamente el componente principal de las fases gaseosas y líquidas. Los más comunes se indican a continuación:

A) Una Fase Fluida a Temperatura Ambiente (Mangas y Sierra, 1991):

- Si en el enfriamiento aparece una burbuja de gas y crece rápidamente, el fluido es probablemente rico en CO_2 . Esto se confirma si el líquido solidifica bruscamente entre -90 y -110°C , formándose muchos cristales de CO_2 , los cuales recrystalizan más tarde en un solo cristal. En el calentamiento posterior, alrededor de $-56,6^\circ\text{C}$, funde el sólido repentinamente. Si el sólido funde a una temperatura inferior, se debe sospechar que la fase fluida contiene componentes adicionales, tales como N_2 , CH_4 , H_2S y SO_2 .
- Si durante el enfriamiento nuclea una burbuja pequeña, que desaparece o contrae cuando se congela la inclusión a temperatura próxima a -30°C , se debe pensar que el fluido es rico en H_2O y que, a temperatura ambiente, se encuentra en condiciones metaestables.
- Si no se observa ningún cambio desde $+25^\circ\text{C}$ a -192°C , no se puede saber si el fluido atrapado en la inclusión es un gas de muy baja densidad, si se encuentra en condiciones metaestables, o si es un sólido, bien sea vidrio o cristal.

B) Dos Fases de Vapor y otra Líquida a Temperatura Ambiente (Mangas y Sierra, 1991):

- Si durante el enfriamiento, la burbuja de vapor se contrae entre -30 y -60°C , se trata de una inclusión rica en H_2O . Si la congelación se produce por debajo de -60°C , la inclusión fluida contiene muchas sales disueltas. Todas las inclusiones ricas en H_2O , exceptuando las de salinidad casi nula, congelan bruscamente en finos agregados, produciéndose la opacidad de la cavidad. Durante el calentamiento, la

fusión comienza con una compartimentación del contenido que, en ciertos casos es difícil de apreciar. Al aumentar la temperatura, el aspecto turbio desaparece, y los cristales de hielo se van fundiendo progresivamente con el aumento relativo de la fase líquida.

- Si congelación se produce entre -80 y -110°C con la expansión de la burbuja, los sólidos formados funden a -56°C , y las dos fases homogeneizan a una temperatura menor o igual a 31°C , entonces el fluido es rico en CO_2 .
- Si durante el enfriamiento de una inclusión bifásica aparece una burbuja de vapor en el fluido central, entonces el fluido exterior es rico en H_2O y el fluido central, es rico en CO_2 . La solidificación de la fase externa se presenta alrededor de -30°C y la interna entre -70° y -100°C .

C) Tres Fases Fluidas a Temperatura Ambiente (Mangas y Sierra, 1991):

- En este caso la inclusión puede contener un fluido rico en CO_2 , con dos fases, una líquida y otra gaseosa, y un fluido rico en H_2O . El comportamiento crioscópico es el mismo que en el último caso del apartado B).

Cualquiera de los tipos de inclusiones anteriores citadas puede contener fases sólidas a temperatura ambiente, ya sea como minerales precipitados de la solución madre, o como minerales atrapados del fluido mineralizador. Como las inclusiones fluidas son sistemas con tamaño de micras y con masas alrededor de 10^{-11} gramos, es común que se presenten procesos de metaestabilidad. Así, por ejemplo, el agua congela a temperatura próxima a -30°C y el CO_2 , con un punto

triple a $-56,6^{\circ}\text{C}$, no solidifica hasta temperaturas cercanas a -90°C . Las inclusiones acuosas presentan otros dos fenómenos de metaestabilidad que son bastante corrientes, por ejemplo, al enfriar una inclusión monofásica puede formarse una burbuja de vapor, o al congelar inclusiones bifásicas con una burbuja de vapor pequeña, ésta puede desaparecer y no nuclearse en el calentamiento posterior. También, se ha observado que el hielo puede ser metaestable hasta $6,5^{\circ}\text{C}$ (Roedder, 1962), y que en las inclusiones de tamaño pequeño, la temperatura del último cristal de hielo puede alcanzar los 20°C (Hollister, *et al*; 1981).

Igualmente, que las inclusiones acuosas son compuestos orgánicos e inorgánicos, es decir, los carbónicos y con metano pueden formar hidratos durante la congelación (Swanenberg, 1979).

Proceso de Calentamiento: Sorby, 1858, propuso que las burbujas de gas de las inclusiones fluidas son el resultado de una contracción diferencial del líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de atrapamiento hasta la temperatura ambiente, por lo que la temperatura de formación podía ser estimada por calentamiento progresivo de la muestra hasta que la burbuja de gas desapareciera. Con algunas limitaciones, esta hipótesis es la base de los procesos de calentamiento, ya que la evolución del fluido atrapado en las inclusiones durante el enfriamiento en condiciones naturales es el mismo, pero en sentido inverso, que la que tiene lugar durante el calentamiento experimental (Smith, 1953).

En ese proceso la **temperatura de homogeneización** es aquella en que dos fases distintas de una inclusión se transforman en una fase única. La temperatura de homogeneización permite determinar fácilmente, si el sistema químico es simple y la densidad del líquido atrapado en la inclusión. Para ello es preciso conocer la naturaleza del fluido, disponer de datos necesarios (valores experimentales o ecuaciones de estado) para la construcción de las gráficas de Presión, Volumen y Temperatura (PVT) correspondientes y aceptar que la masa y el volumen de la inclusión no varían ni durante el enfriamiento geológico ni por el calentamiento en el laboratorio (Mangas y Sierra, 1991).

Medidas Microtermométricas: Las realización de los respectivos procesos de enfriamiento y calentamiento (esbozados anteriormente) se aplican con el fin de medir los siguientes valores microtermométricos:

A) Proceso de Enfriamiento:

- **Temperatura de Congelación (T_n)** del hielo ($T_{n_{ice}}$) y el CO_2 sólido ($T_{n_{CO_2}}$),... etc. (Mangas y Sierra, 1991)
- **Temperatura de comienzo o eutéctica (T_e)**, generalmente difícil de apreciar, pero necesaria para conocer el punto eutéctico del sistema. (Mangas y Sierra, 1991)
- **Temperatura de Fusión Final (T_m)**. Estos valores permiten conocer con cierta aproximación la composición de los fluidos atrapados. (Mangas y Sierra, 1991)

B) Proceso de Calentamiento:

- **Temperatura de homogenización (T_h)**, En particular, de las fases ricas en CO_2 (T_{hCO_2}) y total de la inclusión (T_h). Estas medidas dan un valor indicativo, mínimo de la temperatura a la cual el fluido ha sido atrapado y permiten determinar la densidad de soluciones pertenecientes a sistemas simples. (Mangas y Sierra, 1991)

En cada inclusión se repite las experiencias de enfriamiento y calentamiento varias veces para obtener las temperaturas medias, a las cuales se aplica el factor de corrección T de la curva de calibración. En cada muestra se realiza un mínimo de varias decenas de medias para establecer los histogramas representativos.

2. MARCO GEOLÓGICO

El área de trabajo se encuentra dentro de la subcuenca de Neiva del VSM, tomando las planchas 323 y 345 (Nuñez, *et al*; 1998) se ubicaron los sectores con afloramientos de la formación Caballos y se reconocieron de esta forma rasgos geológicos y datos estructurales; asimismo se recogieron muestras de mano para su posterior análisis de laboratorio (Fig. 14).

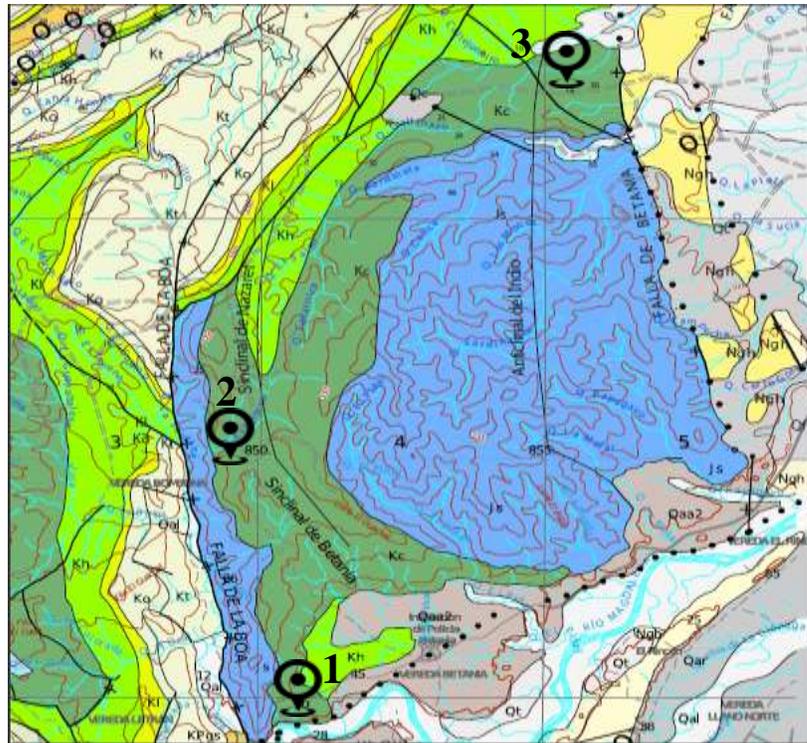


Figura 14. Localización geográfica de las zonas de estudio.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la localización de las zonas de estudio.

Sector	Localización
1. Boa	2.7382783 N; -75.4220203 E
2. Cucharo	2.8552730 N; -75.3754660 E
3. Nazareth	2.7655540 N; -75.4203700 E

La localización de las zonas de estudio están numeradas según la Figura 14, respecto a las planchas geológicas expuestas para su debida ubicación.

2.1. Generalidades

La Cuenca Valle Superior del Magdalena cuenta con una extensión de 21,513 km² (Fig. 15). Corresponde a una cuenca intramontana cuyos límites, tanto al este como al oeste, son los afloramientos del basamento precámbrico y jurásico de las cordilleras Oriental y Central. La secuencia cretácica está conformada por depósitos continentales y marinos. Dos niveles de rocas fuente ricas en materia orgánica del Albiano medio-Turoniano generan los hidrocarburos presentes en la cuenca. Importantes niveles de arenitas del Campaniano-Maastrichtiano representan un importante objetivo exploratorio. La secuencia cenozoica, depositada durante el evento de colisión que permanece hasta el presente es de afinidad totalmente continental y está compuesta por depósitos molásicos del Paleógeno y Neógeno (Mojica, *et al*; 1985). Los mayores campos de petróleo se encuentran asociados a cierres estructurales generados por pliegues por flexión de falla, pliegues por propagación de falla y anticlinales relacionados a fallas transcurrentes (ANH, 2010).

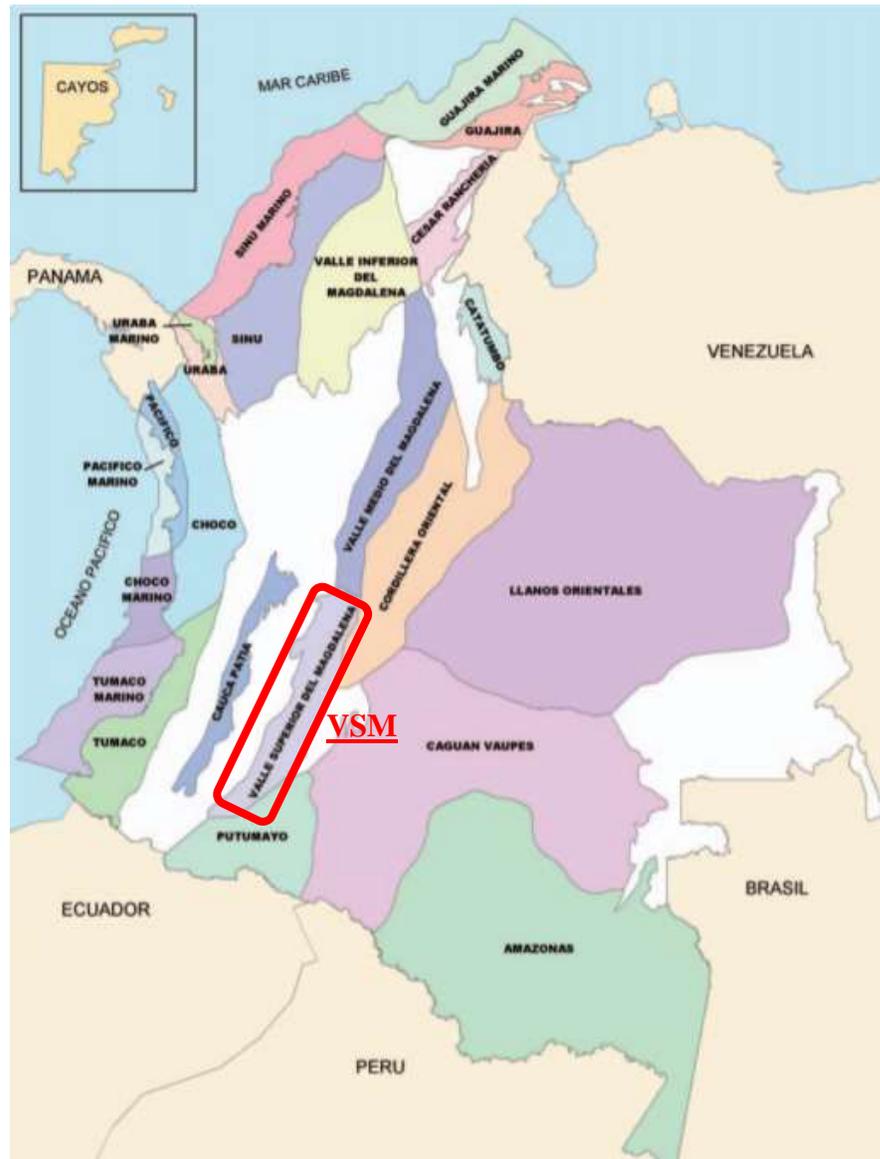


Figura 15. Mapa de clasificación de las cuencas sedimentarias de Colombia (Pardo y Martínez, 2007)

2.2. Geología del petróleo

La definición y clasificación del sistema petrolífero del Valle Superior del Magdalena se esboza de la siguiente manera:

Roca Generadora

La deposición de lutitas y calizas con alto contenido de materia orgánica en las formaciones La Luna, Bambucá y Tetuán (Fig. 16), se debe a dos eventos anóxicos mundiales en el Albiano medio. El Kerógeno predominante es tipo II, con reflectancia de vitrinita (Ro) entre 0,5 y 1,35. Temperatura máxima 450 °C y TOC > 5% (Alfaro, *et al*; 2009).

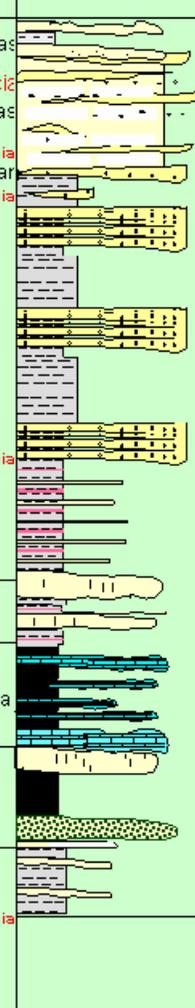
		GRUPO	FORMACION	AMBIENTE	LITOLOGIA		
CUATERNARIO							
Neógeno	Secuencia Sin-Orogénica	Plioceno-Holoceno	Gigante / Mesa (1000 mts)	Terrestre, Llanuras de Piedemonte.			
		Mioceno	Medio a Superior	Honda (2500 mts)		Terrestre, Llanuras Aluviales	
			Inferior	Barzalos (200 - 300 mts)		Terrestre, Lagunar	
Paleógeno	Secuencia Sin-Orogénica	Oligoceno	Doima Potrerillo	Terrestre, Ríos entrelazados.			
		Eoceno	Gualanday		Tesalia Bache Palermo		
			Paleoceno		Guadaluata	Teruel	
					Maastrichtiano	San Francisco	
		CRETÁCEO	Superior		Maastrichtiano	Monserrate (K1, K2, K3, K4)	Marino Intera Intamareal.
					Campaniano		
			Inferior		Secuencia Preorogénica	Santoniano	Villeta (700 - 1100 mts)
Albiano	Caballos (90 - 200 mts)			Superior Medio Inferior		Fluvial Salobre	
Aptiano	Yaví (385 mts)					Supra a intermareal Terrestre.	
Basamento	Jurásico	Saldaña (800 - 1500 mts)		Subaéreo Vulcanoclástico			
	Triásico	Intrusivo					
	Precámbrico	metamórfico					

Figura 16. Geología general de la subcuenca de Neiva (Nuñez, *et al*; 1998).

Migración

La migración comienza inmediatamente después del primer evento compresivo del Cretácico tardío y continúa hasta el presente. A lo largo de la cuenca se han documentado rutas de migración tanto horizontal como vertical. El principal transportador de hidrocarburos son las areniscas de la Formación Caballos y en menor escala las areniscas de la Formación Monserrate (ANH, 2010).

Roca Reservorio

Tres importantes unidades de areniscas están distribuidas en la cuenca: Las formaciones Caballos y Monserrate en el Cretácico y el Grupo Honda en el Mioceno. Existen además rocas calcáreas fracturadas que pueden presentar un alto potencial como reservorios. Las facies arenosas de la Formación Tetuán, las cuales producen actualmente petróleo, son un nuevo objetivo para la exploración (ANH, 2009).

Roca Sello

El sello superior y lateral está representado por un importante espesor de arcillolitas plásticas de la Formación Bambucá. La Formación Guaduala y el Grupo Honda son otros importantes sellos en la cuenca (ANH, 2009).

Prospección

Durante las últimas dos décadas, la cuenca ha sido explorada activamente en busca de hidrocarburos. Sin embargo, se cree que importantes

reservas de petróleo permanecen atrapadas en trampas estratigráficas. La adición de nuevas reservas estará vinculada al desarrollo de conceptos quizás no convencionales. Hasta la fecha, se han encontrado más de 546 reservas de MMBO en 28 campos petroleros (Pardo y Martínez, 2007) y una producción de 32 KBPD (ACP, 2014).

2.3. Geología Estructural

Trampas

Entre las trampas que se encuentran en la cuenca del Valle Superior del Magdalena se encuentran pliegues asociados a flexión de falla (fault-bend fold), anticlinales fallados, sub-cabalgamientos (sub-thrust and sub-basement closures), abanicos imbricados, retrocabalgamientos (back thrust) y anticlinales asociados a transurrencia (wrench related anticlines), las cuales están distribuidas a lo largo de la cuenca (*Fig. 17*). Adicionalmente, existe un potencial no explorado asociado a diferentes trampas de tipo estratigráfico (Pardo y Martínez, 2007).

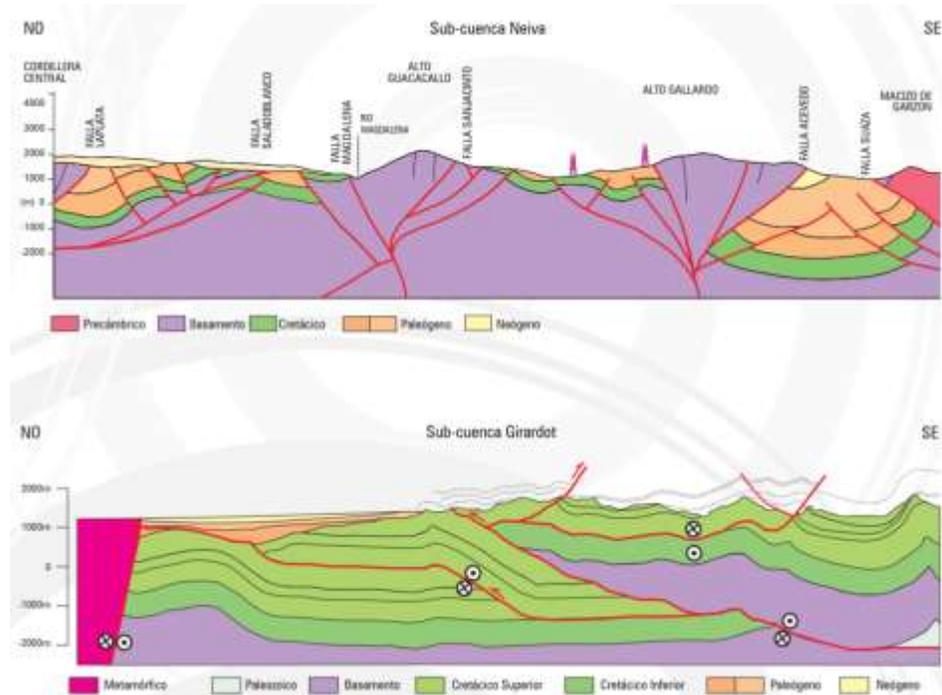


Figura 17. Sección transversal esquemática de las subcuencas Girardot y Neiva. Tomado de: Cuencas Sedimentarias Colombianas, Modificado de ANH, 2007.

2.4. Estratigrafía de la Formación Caballos (Kc)

En el Valle Superior del Magdalena la Formación Caballos se constituye por areniscas basales de edad Aptiano-Albiano con breves intercalaciones de lodolitas e intervalos calcáreos. A escala regional el tope de la Formación Caballos está definido como el tope de las primeras arenas por debajo de las margas, lodolitas y calizas de la Formación Villeta; este corresponde a un tope litológico que no tiene implicaciones temporales a escala regional (Carlos, *et al*; 1968).

Morfológicamente, la formación caballos forma cimas redondeadas, longitudinales, con contrapendiente abrupta y pendiente moderada coincidente con la dirección topográfica y estructural de los estratos, forma franjas anchas en la

Vereda Nazareth en dirección noreste y sureste, y constituye los flancos de una estructura sinclinal. Aflora en los sitios denominados cuchilla Upar y Mesa Alta, alrededor de una cima redondeada constituida por rocas intrusivas, en donde constituye el núcleo de un anticlinal.

A nivel operacional, la formación Caballos, perteneciente a la subcuena de Neiva, fue dividida en Caballos Inferior, Caballos Medio y Caballos Superior, sin embargo, Florez y Carrillo, definieron dichos sectores en Formación Alpujarra (Caballos Inferior), El Ocal (Caballos Medio) y Caballos (Caballos Superior) (Flórez y Carrillo, 1994)

La Formación Caballos Inferior se compone de una serie de secuencias arenosas retrogradacionales, siendo un depósito continental a la base con cuarzoarenitas y subarcosas de color blanco a gris claro, de grano fino a grueso, localmente conglomeráticas bien seleccionadas con pseudomatriz caolinítica. En la parte media y tope predominan lodolitas negras ricas en restos de plantas, que corresponden a depósitos en llanuras aluviales surcadas por canales sinuosos.

La formación Caballos Medio, fue depositada en un ambiente marino restringido (Litoral a Sublitoral) se caracteriza por tener intercalaciones de calizas lumaquelicas y dolomitas de color gris verdoso, algunas glauconitas y lodolitas de color gris a negro, ricas en materia orgánica. Tiene un espesor promedio de 120 pies (Chavarro y Palencia, 2013).

Finalmente, La Formación Caballos Superior, está constituida por cuarzoarenitas muy continuas de grano fino a grueso friables, muy bien a moderadamente seleccionadas, con laminación inclinada y paralela, que fueron originadas como depósitos de cordones de playa progradantes. Presentan intercalaciones de lodolitas e interlaminaciones de arena y lodo y arenitas calcáreas bioclásticas, que representan depósitos marinos marginales (estuarios) (Chavarro y Palencia, 2013).

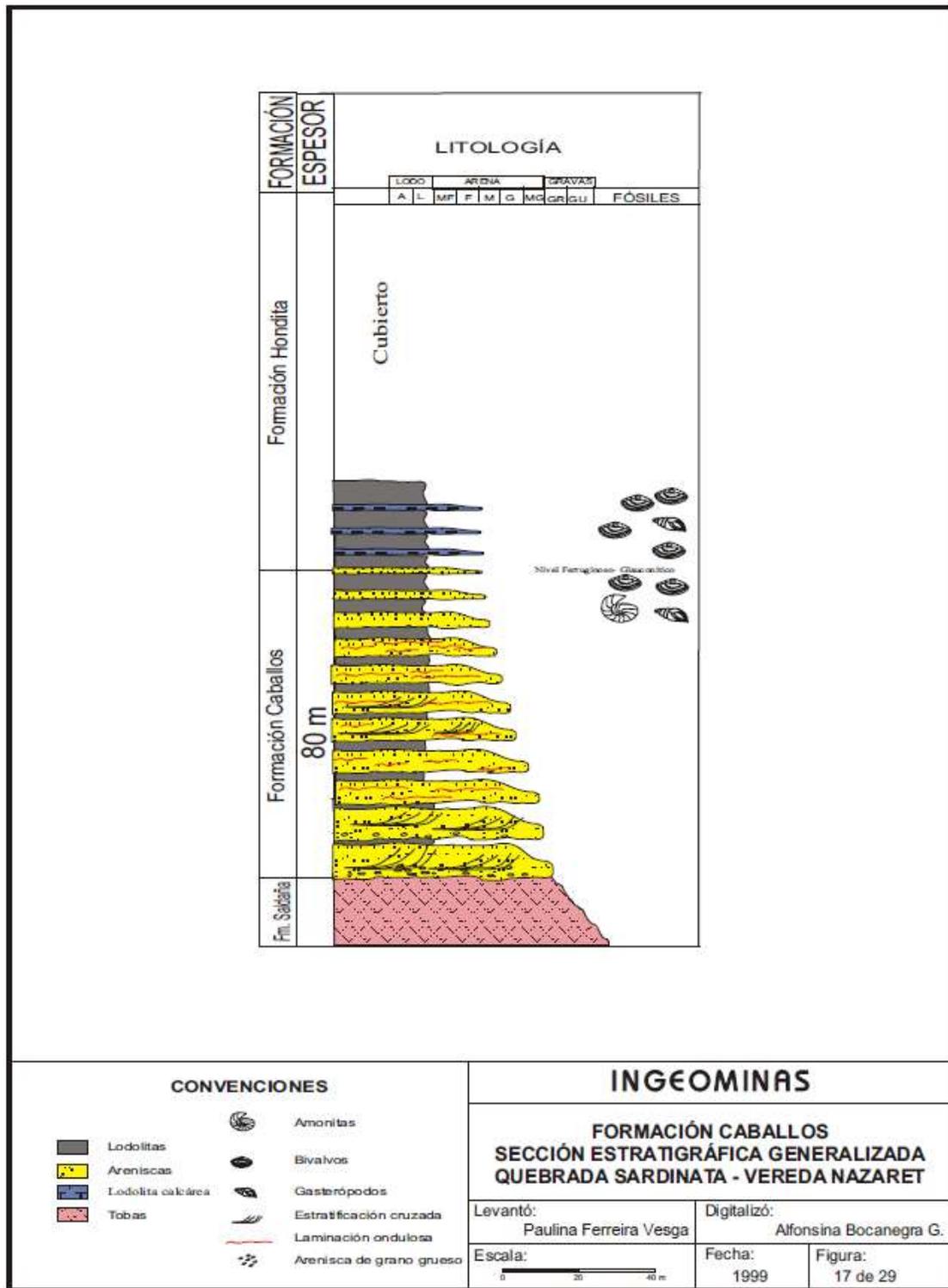


Figura 18. Formación Caballos, sección estratigráfica generalizada quebrada Sardinata – Vereda Nazareth (Nuñez, et al; 1998).

3. PETROGRAFÍA

3.1. Macroscópica

Se realizó una descripción macroscópica de las muestras recolectadas en campo teniendo en cuenta todos los fundamentos teóricos para su descripción textural y clasificación general. Las tablas 2, 3 y 4 muestran dicha información de manera detallada para los sectores Boa, Nazareth y Cucharó.

Tabla 2. Caracterización de las muestras de mano sector BOA.

SECTOR BOA	BM1 (Fig. 19A).	BM2 (Fig. 19B).	BM3 (Fig. 19C).	BM4 (Fig. 19D).
1. TEXTURA	Es dura, consolidada, clara	Es friable, cohesiva	Con partículas levemente friables, cohesiva	Con partículas levemente friables, cohesiva
2. TAMAÑO DE PARTÍCULAS	Arena de media a gruesa con presencia de limo a grueso a medio	Limo grueso a gránulos	De arena gruesa a gránulos	De arena gruesa a gránulos
3. CALIBRADO	Mal calibrado	Mal calibrado	Mal calibrado	Mal calibrado
4. ESFERICIDAD	Según Folk: Sub discoidal (2, 3)	Según Folk: Sub discoidal (2, 3) Sub prismático (-1, -4)	Según Folk: Sub discoidal prismáticos: (0, -1)	Según Folk: Sub discoidal prismáticos: (0, -1)
	Según Wandel: Sub discoidal (0.25, 0.49)	Según Wandel: Sub discoidal (0.25, 0.49) Sub prismático (0.12, 0.25)	Según Wandel: Sub discoidal prismáticos (0.12, 0.01)	Según Wandel: Sub discoidal prismáticos (0.12, 0.01)
5. REDONDEZ	Según Folk: Angulares (1, 2) Sub angulares (2, 3)	Según Folk: Sub redondeada (3, 4) Sub angular (2, 3)	Según Folk: Muy angular (0, 1) Angular (1, 2)	Según Folk: Muy angular (0, 1) Angular (1, 2)
	Según Wandel: Angulares (0.17, 0.25) Sub angular (0.25, 0.35)	Según Wandel: Sub redondeada (0.35, 0.49) Sub angular (0.25, 0.35)	Según Wandel: Muy angular (0.12, 0.17) Angular (0.17, 0.25)	Según Wandel: Muy angular (0.12, 0.17) Angular (0.17, 0.25)

Caracterización textural de las cuatro muestras de mano, recolectadas en el sector Boa, durante la fase de campo.

Tabla 3. Caracterización de las muestras de mano sector CUCHARO.

SECTOR CUCHARO	CM1 (Fig. 20A).	CM2 (Fig. 20B).	CM3 (Fig. 20C).	CM4 (Fig. 20D).
1. TEXTURA	Cohesiva, levemente friable	Cohesiva, levemente friable	Cohesiva, levemente friable	Cohesiva, levemente friable
2. TAMAÑO DE PARTÍCULAS	De Arena fina a media y de limo grueso a medio	Arena media a gruesa Arena fina a muy fina 2 % Limo grueso	De arena media a limo grueso	Arena muy fina a media Limo grueso
3 CALIBRADO	Moderadamente calibrada	Moderadamente calibrada	Moderadamente calibrada	Mal calibrado
4. ESFERICIDAD	Según Folk: Esféricas (3 , 6)	Según Folk: Prismático (0 , -1) Sub prismático (-1 , -4)	Según Folk: Esférico (3 , 6) Sub prismático (- 1 , -4)	Según Folk: Prismático (0 , -1) Sub prismático (-1 , -4)
	Según Wandel: Esféricas (0.49 , 1)	Según Wandel: Prismático (0.12 , 0.01) Sub prismático (0.12 , 0.25)	Según Wandel: Esférico (0.49 , 1) Sub prismático (0.12 , 0.25)	Según Wandel: Prismático (0.12 , 0.01) Sub prismático (0.12 , 0.25)
5. REDONDEZ	Según Folk: Sub redondeadas (3 , 4) Redondeadas (4 , 5)	Según Folk: Sub angular (2 , 3) Sub redondeadas (3 , 4)	Según Folk: Sub redondeadas (3 , 4) Redondeadas (4 , 5)	Según Folk: Sub redondeadas (3 , 4) Sub angular (2 , 3)
	Según Wandel: Sub redondeadas (0.35 , 0.49) Redondeadas (0.49 , 0.7)	Según Wandel: Sub angular (0.25 , 0.35) Sub redondeada (0.35 , 0.49)	Según Wandel: Sub redondeadas (0.35 , 0.49) Redondeadas (0.49 , 0.7)	Según Wandel: Sub redondeadas (0.35 , 0.49) Sub angular (0.25 , 0.35)

Caracterización textural de las cuatro muestras de mano, recolectadas en el sector Cucharó, durante la fase de campo.

Tabla 4. Caracterización de las muestras de mano sector NAZARETH.

SECTOR NAZARETH	NM1 (Fig. 21A).	NM2 (Fig. 21B).
1. TEXTURA	Cohesiva, levemente friable	Friable, dura donde el hierro ha entrado

2. TAMAÑO DE PARTÍCULAS	Arena fina a media	Arena muy fina a muy gruesa
3. CALIBRADO	Moderadamente calibrada	Mal calibrado
4. ESFERICIDAD	Según Folk: Sub prismático (-1 , -4)	Según Folk: Sub discoidal (2 , 3) Sub prismático (-1 , -4)
	Según Wandel: Sub prismático (0.12 , 0.25)	Según Wandel: Sub discoidal (0.25 , 0.49) Sub prismático (0.12 , 0.25)
5. REDONDEZ	Según Folk: Sub angulares (2 , 3) Sub redondeadas (3 , 4)	Según Folk: Sub redondeada (3 , 4) Sub angular (2 , 3)
	Según Wandel: Sub angular (0.25 , 0.35) Sub redondeadas (0.35 , 0.49)	Según Wandel: Sub redondeada (0.35 , 0.49) Sub angular (0.25 , 0.35)

Caracterización textural de las dos muestras de mano, recolectadas en el sector Nazareth, durante la fase de campo.

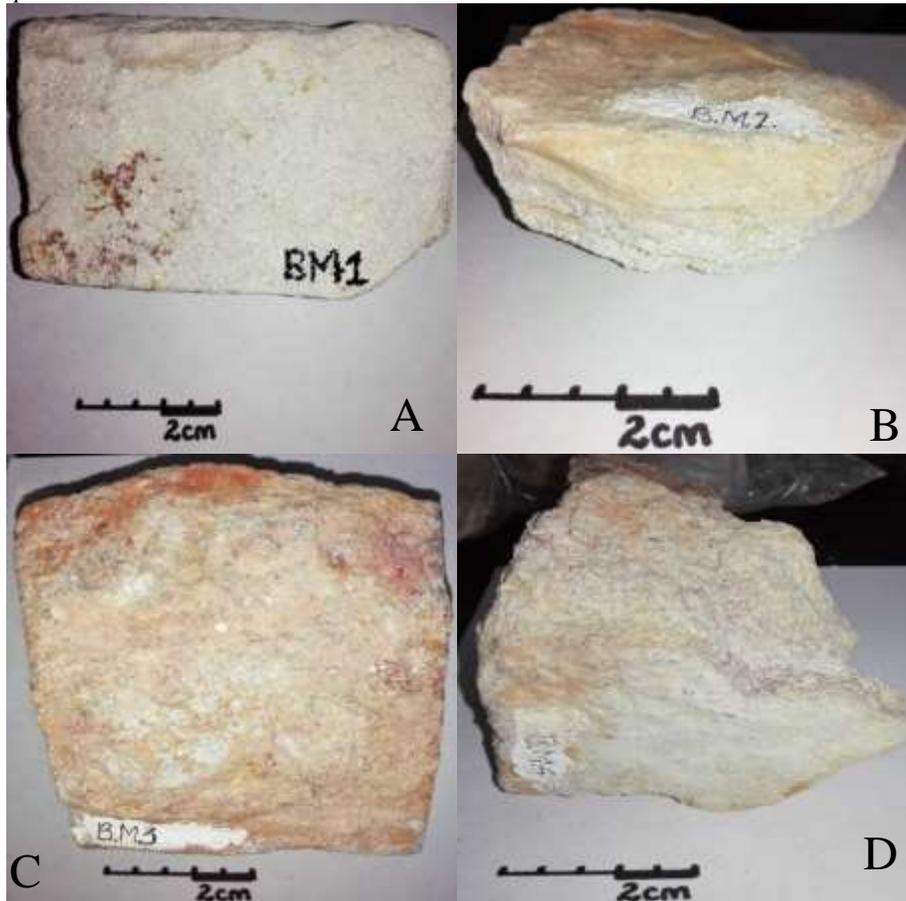


Figura 19. Cuarzo-arenitas del sector BOA. A) Caracterización textural BM1. B) Caracterización textural BM2. C) Caracterización textural BM3. D) Caracterización textural BM4.

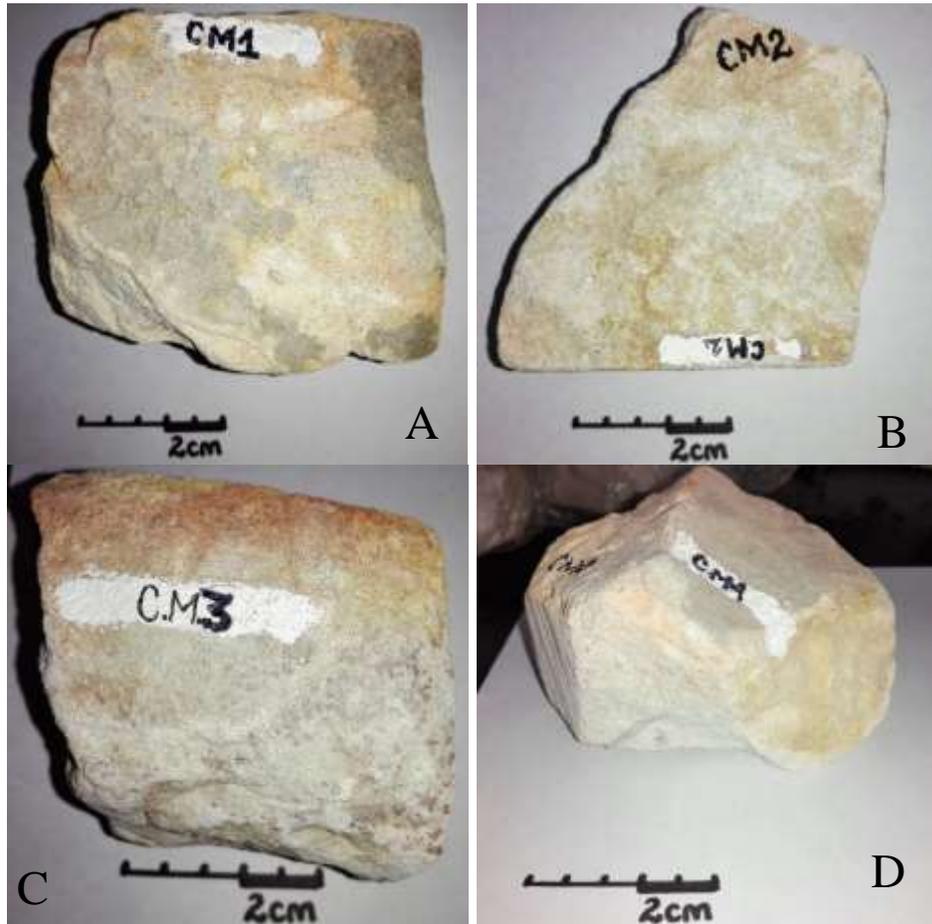


Figura 20. Cuarzo-arenitas del sector CUCHARO. A) Caracterización textural CM1. B) Caracterización textural CM2. C) Caracterización textural CM3. D) Caracterización textural CM4.



Figura 21. Cuarzo-arenitas del sector NAZARETH. A) Caracterización textural NM1. B) Caracterización textural NM2.

3.2. Microscópica

Se realizó una descripción microscópica durante la fase de laboratorio, de las muestras recolectadas en campo teniendo en cuenta todos los fundamentos teóricos para su descripción composicional y clasificación. Las tablas 5, 6 y 7 muestran dicha información de manera detallada para los sectores Boa, Nazareth y Cucharó.

Tabla 5. Caracterización de las secciones, sector BOA.

SECTOR BOA	BM1 (Fig. 22A).	BM2 (Fig. 22B).	BM3 (Fig. 22C).	BM4 (Fig. 22D).
1. POROSIDAD	Primaria: Intergranular Secundaria: Fracturas	Primaria: Intergranular Secundaria: Contacto en estructura sedimentaria	Primaria: Intergranular Secundaria: Fracturas	Primaria: Intergranular Secundaria: Fracturas
2. COMPOSICIÓN	Cemento silíceo y mayoritariamente cuarzo y no contiene líticos, contiene arcilla (porcentaje menor al cuarzo), presenta leve oxidación, partículas ferruginosas.	Cemento silíceo, contiene cuarzo, limo y arcilla, no contiene líticos ni feldespatos, oxidación muy leve	Cemento silíceo, cuarzo, arcilla, limo, no contiene líticos ni feldespatos, partes ferruginosas	Cemento silíceo, cuarzo, arcilla, limo, no contiene líticos ni feldespatos, con una notable oxidación
3. ESTRUCTURA SEDIMENTARIA	Presenta laminación cruzada (No en toda la muestra)	Laminación paralela (Períodos de depositación cortos, los sedimentos depositados van de finos a gruesos.	No identificada	No identificada
4. NOMBRE	85 % - Cuarzo 10 % - Limo 5 % - Arcilla Cuarzoarenita	85 % - Cuarzo 8 % - Arcilla 7 % - Limo Cuarzoarenita	80 % - Cuarzo 15 % - Arcilla 5 % - Limo Cuarzoarenita	80 % - Cuarzo 17 % - Arcilla 3 % - Limo Cuarzoarenita
5. AMBIENTE	cordones de playa progradantes	cordones de playa progradantes	cordones de playa progradantes	cordones de playa progradantes

Caracterización microscópica de las cuatro muestras de mano, recolectadas en el sector Boa, durante la fase de laboratorio.

Tabla 6. Caracterización de las secciones, sector CUCHARO.

SECTOR CUCHARO	CM1 (Fig. 23A).	CM2 (Fig. 23B).	CM3 (Fig. 23C).	CM4 (Fig. 23D).
1. POROSIDAD	Primaria: Intergranular Secundaria: Fracturas	Primaria: Intergranular	Primaria: Intergranular Secundaria: Fracturas	Primaria: Intergranular Secundaria: Fracturas
2. COMPOSICIÓN	Cemento silíceo, cuarzo, limo, arcilla, no contiene líticos ni feldespatos	Cemento silíceo, cuarzo, limo y arcilla, no contiene líticos ni feldespatos	Cemento silíceo, cuarzo, limo y arcilla. Con una notable oxidación	Cemento silíceo, cuarzo, limo y arcilla, no contiene líticos
3. ESTRUCTURA SEDIMENTARIA	No identificada	No identificada	No identificada	No identificada
4. NOMBRE	80 % - Cuarzo 15 % - Limo 5 % - Arcilla Cuarzoarenita	80 % - Cuarzo 15 % - Limo 5 % - Arcilla Cuarzoarenita	85 % - Cuarzo 12 % - Limo 3 % - Arcilla Cuarzoarenita	85 % - Cuarzo 13 % - Limo 2 % - Arcilla Cuarzoarenita
5. AMBIENTE	cordones de playa progradantes	cordones de playa progradantes	cordones de playa progradantes	cordones de playa progradantes

Caracterización microscópica de las cuatro muestras de mano, recolectadas en el sector Cucharo, durante la fase de laboratorio.

Tabla 7. Caracterización de las secciones, sector NAZARETH.

SECTOR NAZARETH	NM1 (Fig. 24A).	NM2 (Fig. 24B).
1. POROSIDAD	Primaria: Intergranular Secundaria: Fracturas y meteorización	Primaria: Intergranular Secundaria: Contacto en estructura sedimentaria
2. COMPOSICIÓN	Cemento silíceo, cuarzo, limo, arcilla, no líticos y tampoco feldespatos	Cemento silíceo, contiene cuarzo, limo, no contiene líticos ni feldespatos.
3. ESTRUCTURA SEDIMENTARIA	No identificada	Presenta tal grado de meteorización que el óxido se acumula en forma de lentes
4. PORCENTAJE	90 % - Cuarzo 10 % - Limo, Arcilla y óxido Cuarzoarenita	90 % - Cuarzo 10 % - Limo, Arcilla y óxido Cuarzoarenita
5. AMBIENTE	De transgresión	De transgresión

Caracterización microscópica de las dos muestras de mano, recolectadas en el sector Nazareth, durante la fase de laboratorio.

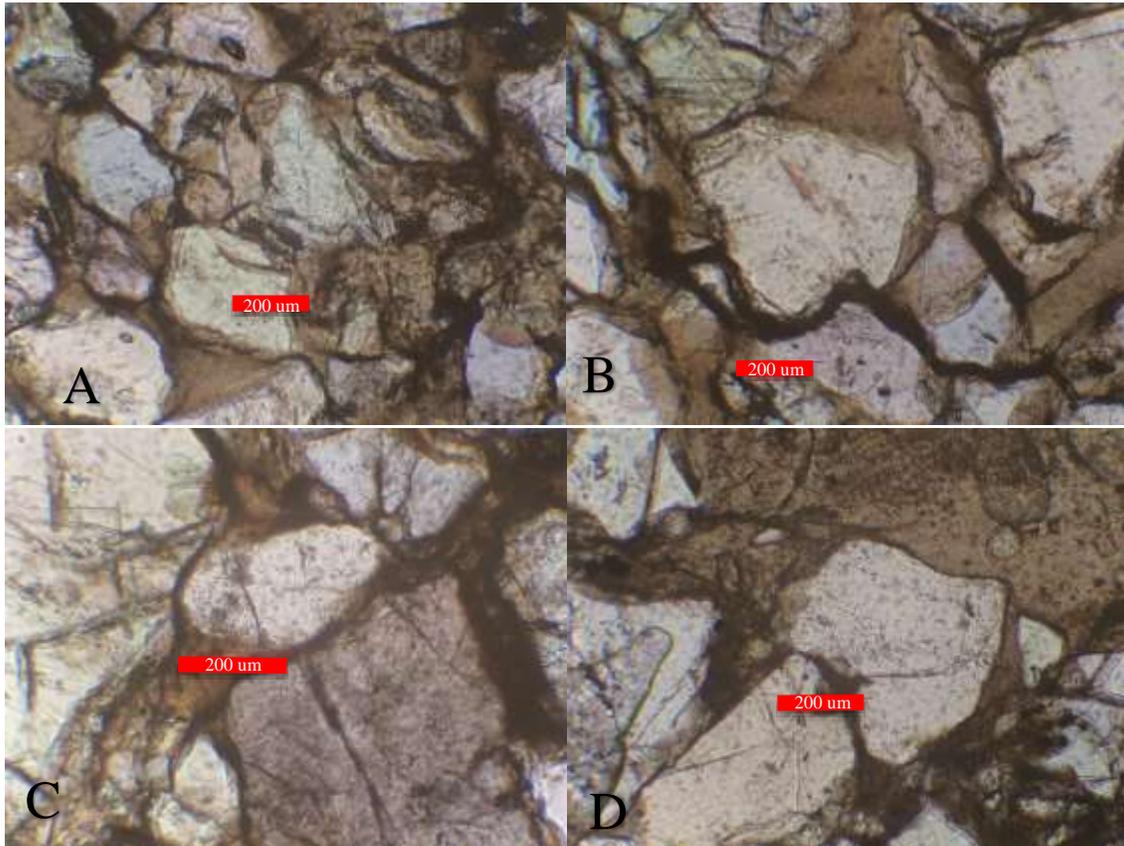


Figura 22. Cuarzo-arenitas del sector BOA, de calibrado moderado, que presentan cristales subangulares y porosidades primarias y secundarias. A) Muestra BM1. B) Muestra BM2. C) Muestra BM3. D) Muetsra BM4.

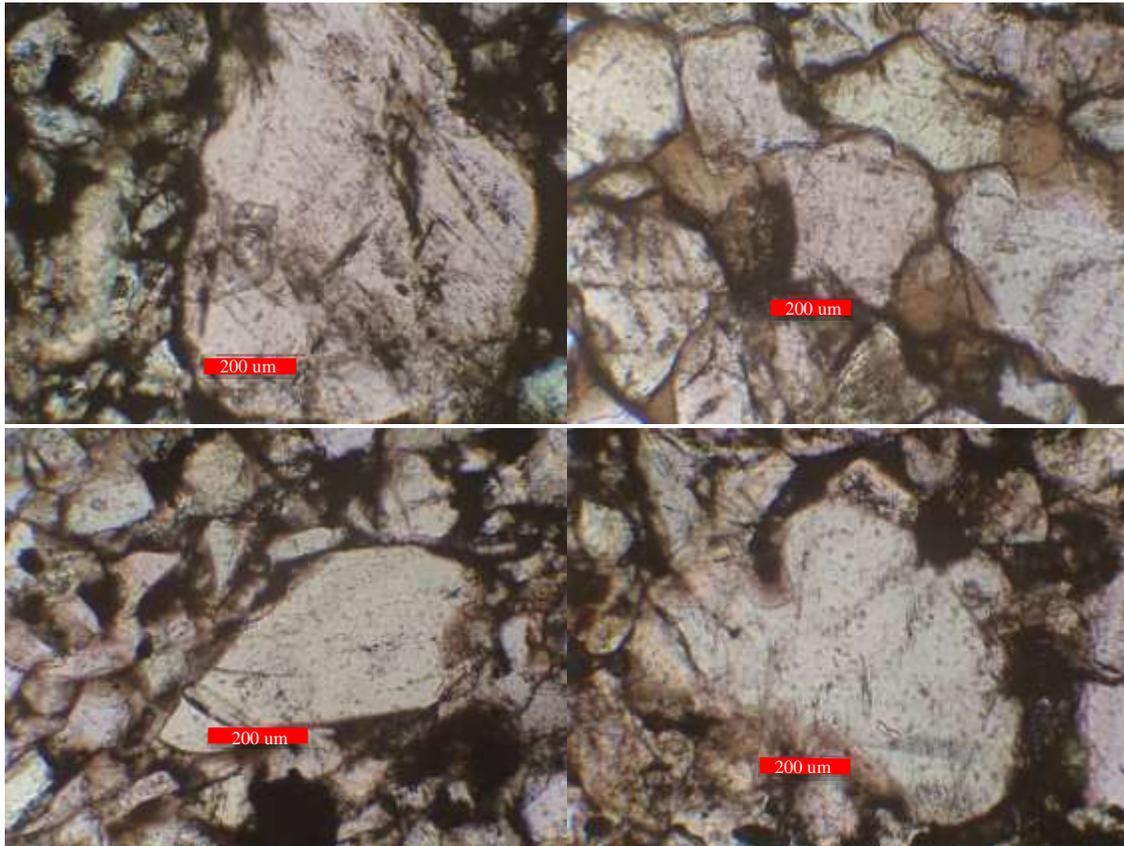


Figura 23. Cuarzo-arenitas del sector CUCHARO, de calibrado moderado, que presentan cristales subangulares - subredondeados y porosidades primarias y secundarias. A) Muestra CM1. B) Muestra CM2. C) Muestra CM3. D) Muestra CM4.

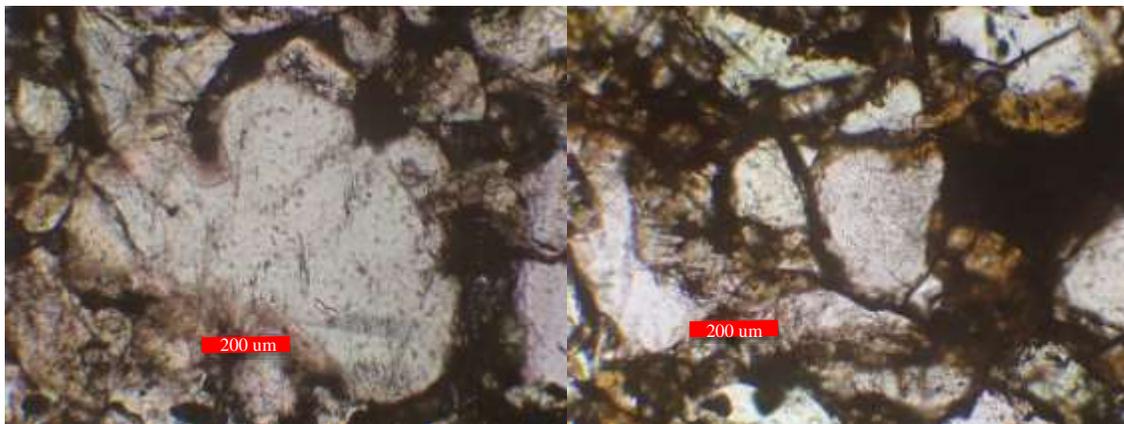


Figura 24. Cuarzo-arenitas del sector NAZARETH de calibrado moderado, que presentan cristales subangulares - subredondeados, notoria presencia de meteorización y porosidades primarias y secundarias. A) Muestra NM1. B) Muestra NM2.

4. INCLUSIONES FLUIDAS

4.1. Características Generales

El estudio petrográfico detallado de la fase cuarzo presente en cada una de las muestras analizadas reveló la presencia de inclusiones primarias y secundarias, tal como se muestra en las microfotografías expuestas (*Ver Figs. 25, 26 y 27*), las primeras que siguen el patrón de crecimiento de los cristales y las segundas presentes en las fracturas generadas en estas, por los diferentes eventos ocurridos posteriores a su cristalización. Los cristales presentan nubosidad uniforme y algunos de ellos se ven oscuros debido al tamaño de las IFs presentes, estas a su vez son muy pequeñas para las respectivas mediciones microtermométricas. Las IFs primarias se encuentran distribuidas de manera densa en cada uno de los cristales individuales y se concentran principalmente en el núcleo de los mismos (*Ver Figs. 25C*). Los cristales presentan formas irregulares y las inclusiones tienen en su mayoría una forma irregular a lobulada, algunas se alargan a lo largo de las direcciones de crecimiento de los cristales.

Las IFs del sector Boa (*Ver Figs. 25*), están presentes principalmente en fracturas selladas (*Ver Figs. 25A-B*), su morfología corresponden a formas esferoidales, por lo que se definen como secundarias, y se caracterizan por seguir el patrón de estas, este fenómeno genera mayor nubosidad debido a la concentración de dichas IFs en el trayecto de las fracturas.

Las muestras del sector Cucharó presentaban mayor meteorización (*Ver Figs. 26A*), razón por la cual su identificación fue bastante compleja, sin embargo, se denota que las IFs presentes son de carácter primario debido a que siguen el patrón de crecimiento que se genera en el momento de la cristalización, se logró clasificar morfológicamente como esferoidales a ovaladas.

Las IFs de las muestras del sector Nazareth se caracterizan por ser abundantes y en su mayoría confinadas a los límites de la zona de crecimiento (*Ver Fig. 27A*), además en su morfología se encontraron formas esferoidales a ovaladas; más, parte de las IFs de la segunda muestra (*Ver Fig. 27B*) están aisladas y no se encuentran presentes a lo largo de las zonas de crecimiento ni a lo largo de las fracturas, sin embargo se observan algunas IFs secundarias presentes en fracturas y morfológicamente se clasifican como esferoidales.

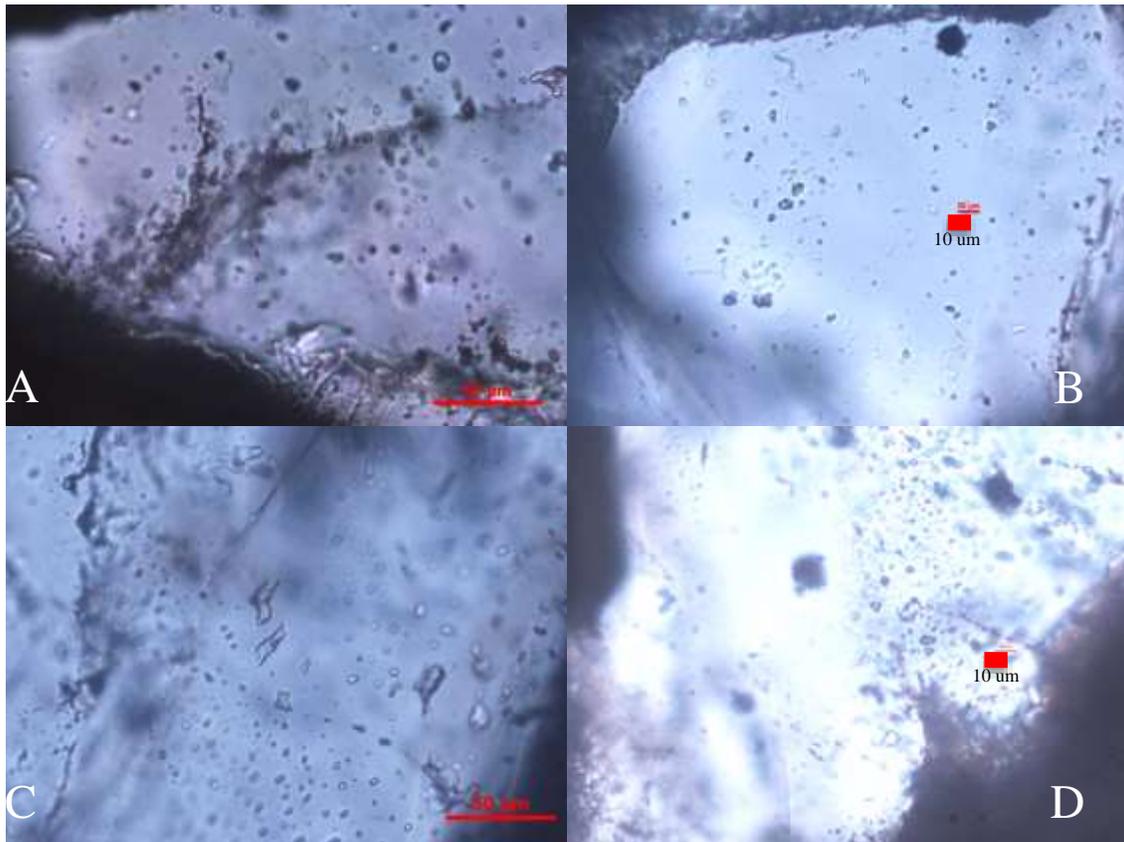


Figura 25. Microfotografías del sector BOA: (A) IFs de BM1, secundarias, presentes en fracturas y morfológicamente con formas esféricas. (B) IFs primarias de BM2 y morfológicamente con formas esféricas. (C) IFs de BM3, primarias que siguen el patrón de cristalización y morfológicamente con formas esféricas. (D) IFs primarias de BM4.

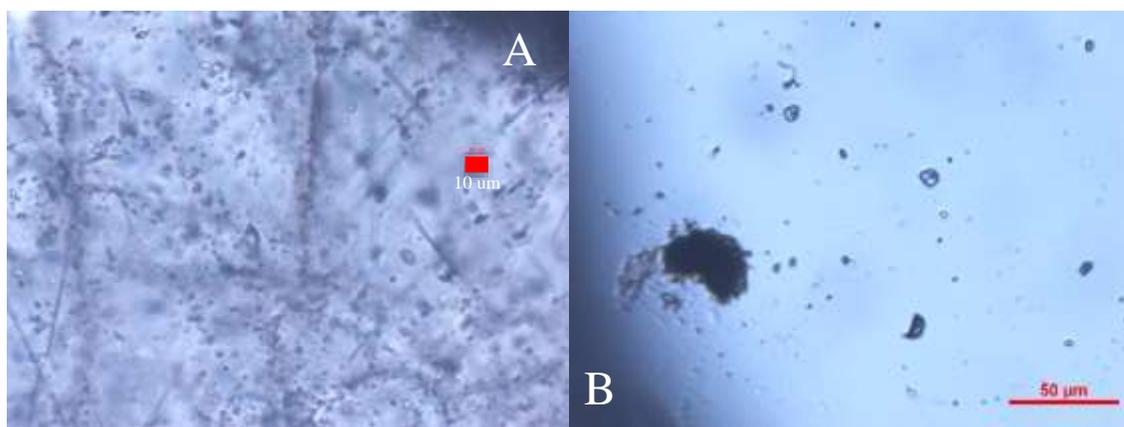


Figura 26. Microfotografías del sector CUCHARO: (A) Muestra CMI con aspecto turbio debido a la cantidad de IFs, de tipología primaria y morfológicamente con formas esféricas a ovaladas. (B) IFs primarias de CM2 y morfológicamente con formas esféricas a ovaladas.

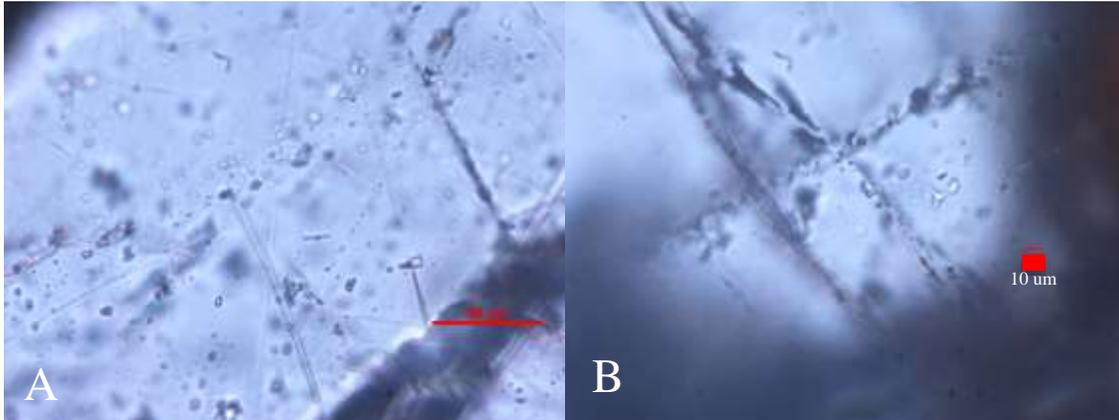


Figura 27. Microfotografías del sector NAZARETH: (A) NMI con aspecto turbio debido a la cantidad de IFs, de tipología primaria y morfológicamente con formas esféricas a ovaladas. (B) IFs secundarias de la muestra NM2, presentes en fracturas y morfológicamente con formas esféricas.

4.2. Microtermometría

El desarrollo del análisis microtermométrico, consistió en verificar la existencia de IF en el microscopio y para que su localización fuera más sencilla, se aumentó la temperatura de las muestras realizando pausas entre intervalos de temperaturas y se procedió a realizar un rastreo sobre la sección para verificar si existe movimiento de las IFs, hasta llegar a 150°C, luego de identificar la(s) inclusión(es) en movimiento se programó la rampa de control desde temperatura ambiente (*Ver Fig. 28A*), hasta una temperatura ya establecida para cada muestra (se realizó un ensayo y error para determinar la temperatura de congelamiento, en este caso se llegó hasta -100°C); posteriormente se observó el momento en el cual todo el líquido contenido en la inclusión se congeló completamente, reportando la Temperatura de nuclearización (T_n °C) (*Ver Fig. 28B*), así, se programó la rampa de calentamiento, desde la temperatura de nuclearización hasta 200°C (Los tiempos

de calentamiento se determinaron de igual manera por ensayo y error de modo que se estableció un rango en el cual la temperatura disminuyó paulatinamente. Se registró el momento de la aparición de la primera gota de líquido como la temperatura de fusión final del hielo (T_m °C) (*Ver Fig. 28C*), y denominada como aparición de la primera burbuja. Durante el aumento de la temperatura se percibió nuevamente el movimiento de la IF, en dicho punto se aumentó el tiempo de calentamiento, obteniendo de esta forma una rampa un poco más prolongada para no perder el instante en el cual se evapora el líquido, en ese momento se determinó la Temperatura de homogenización y se registró como T_h (*Ver Fig. 28D*).

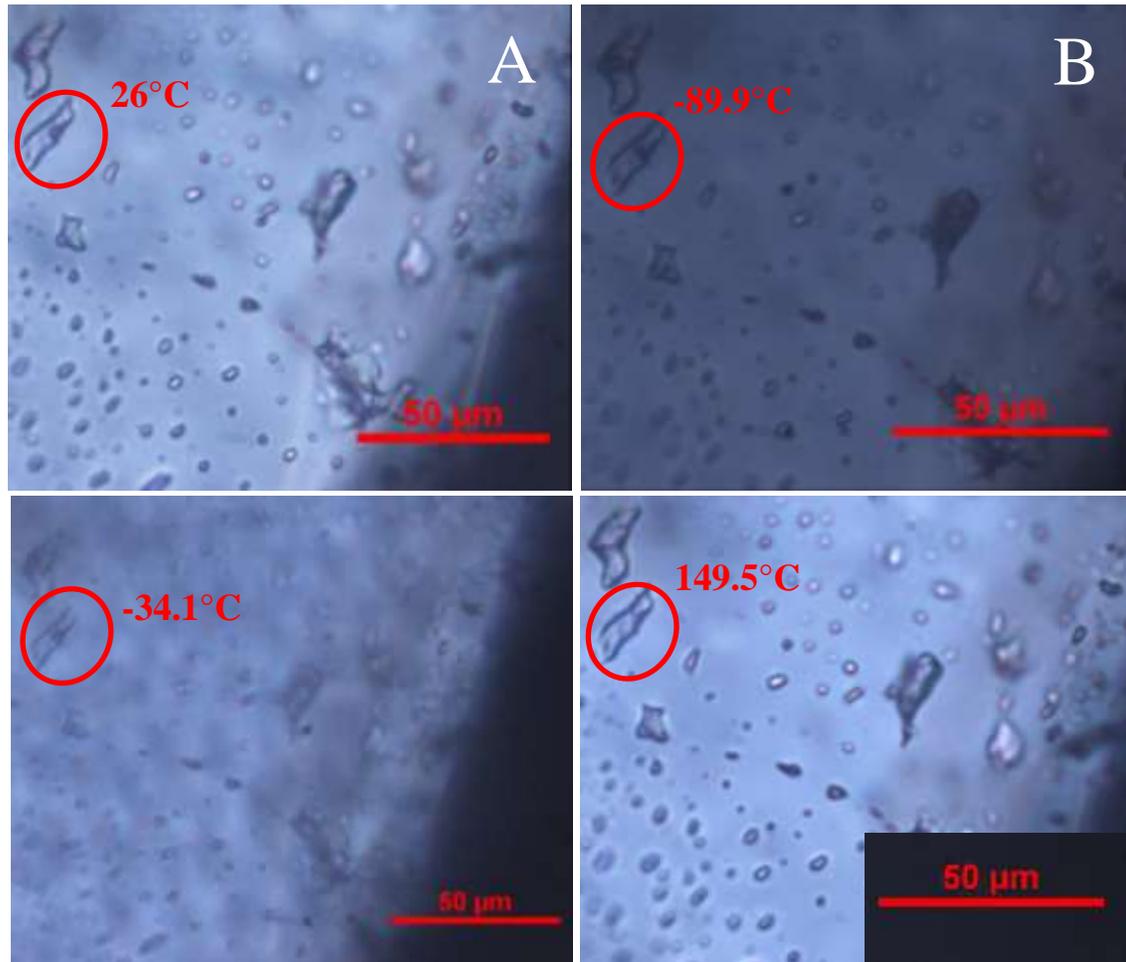


Figura 28. Microfotografías de las muestras durante el desarrollo del proceso Microtermométrico. A) Muestra ejemplo (BM3) con IF a temperatura ambiente (T_a). B) Muestra ejemplo (BM3) con IF, completamente congelada, correspondiente a la Temperatura de nuclearización. C) Muestra ejemplo (BM3) con aparición de primera burbuja, correspondiente a T_m . D) Muestra ejemplo (BM3) donde se observa evaporación total del líquido (sin burbuja), corresponde a T_h .

5. RESULTADOS

5.1. Petrografía

Para la petrografía macroscópica, en general las muestras de mano presentaron características macroscópicas similares, se analizó estadísticamente las tendencias y particularidades que generan los diferentes sectores. Se compararon los distintos tamaños de partículas que se presentaron, las muestras del Sector denominado La boa son las que expusieron mayor similitud, ya que todas sus muestras tuvieron un mal calibrado, las muestras del sector Cucharó presentaron dos tipos de calibrado (moderado - malo), en el Sector Nazareth una muestra se clasificó como mal calibrada y la restante como moderadamente calibrada. Un análisis estadístico de los tres sectores determinó que el 60% de las muestras están mal calibradas y el 40% presentó un calibrado moderado (*Ver Fig. 29*). Se observó que texturalmente el 90% de las muestras presentó un considerable grado de cohesividad y de igual forma un 90% de estas tenían algunas partículas friables. Los resultados para esfericidad y redondez se plasmaron en gráficos de barras, de manera general la esfericidad según Folk (*Ver Fig. 31*) tuvo una tendencia entre prismático, sub prismático y sub discoidal, esta misma característica bajo la clasificación de Wandel (*Ver Fig. 30*) se inclinó hacia Sub discoidales y sub prismáticos. La redondez en ambas clasificaciones presentó las mismas características exceptuando "Sub redondeado - Angular" presentado en una de las muestras dentro de la clasificación de Wandel.

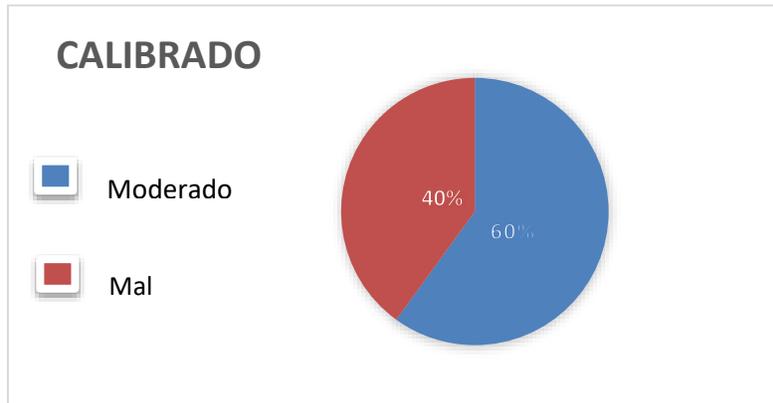


Figura 29. Diagrama de torta de la comparación porcentual de los tipos de calibrado presentes en las muestras de mano analizadas.

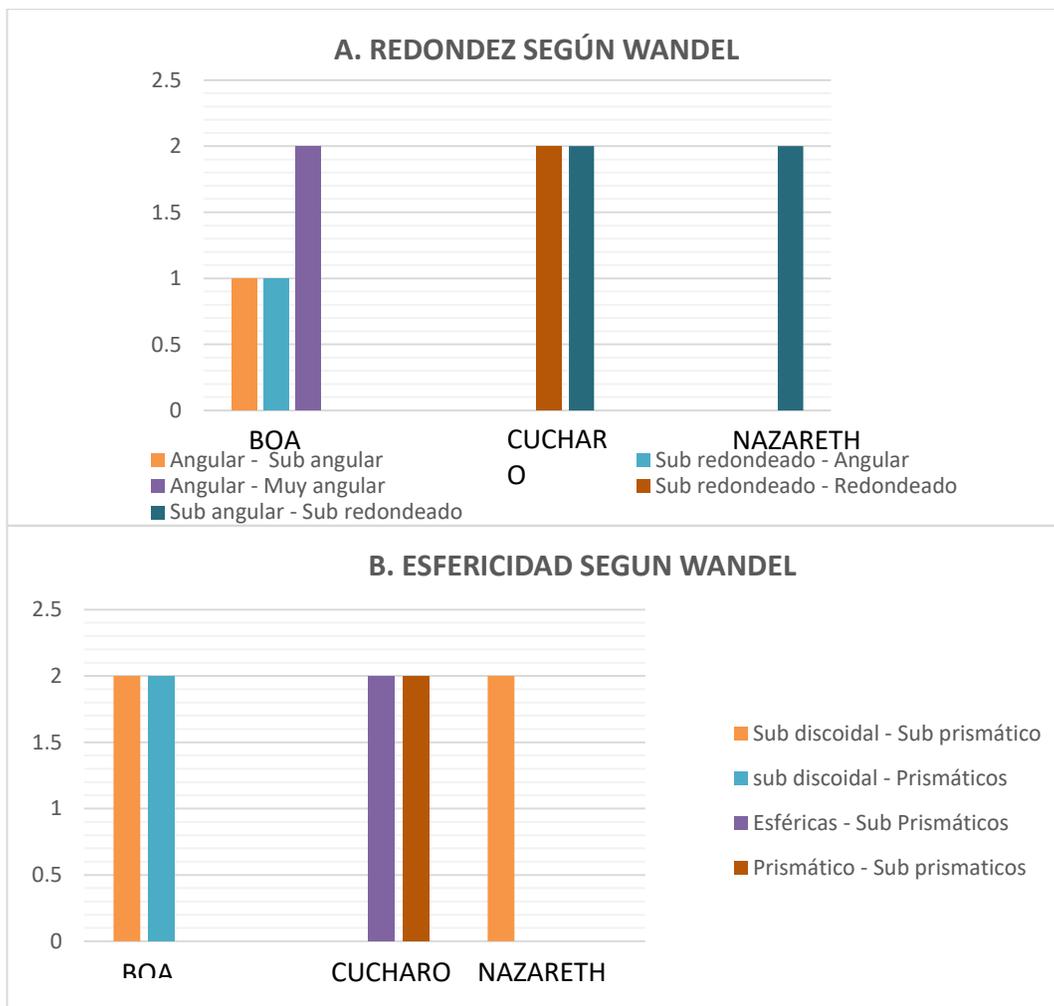


Figura 30. Diagrama de barras comparativo de la redondez y la esfericidad según Wandel para los sectores estudiados.

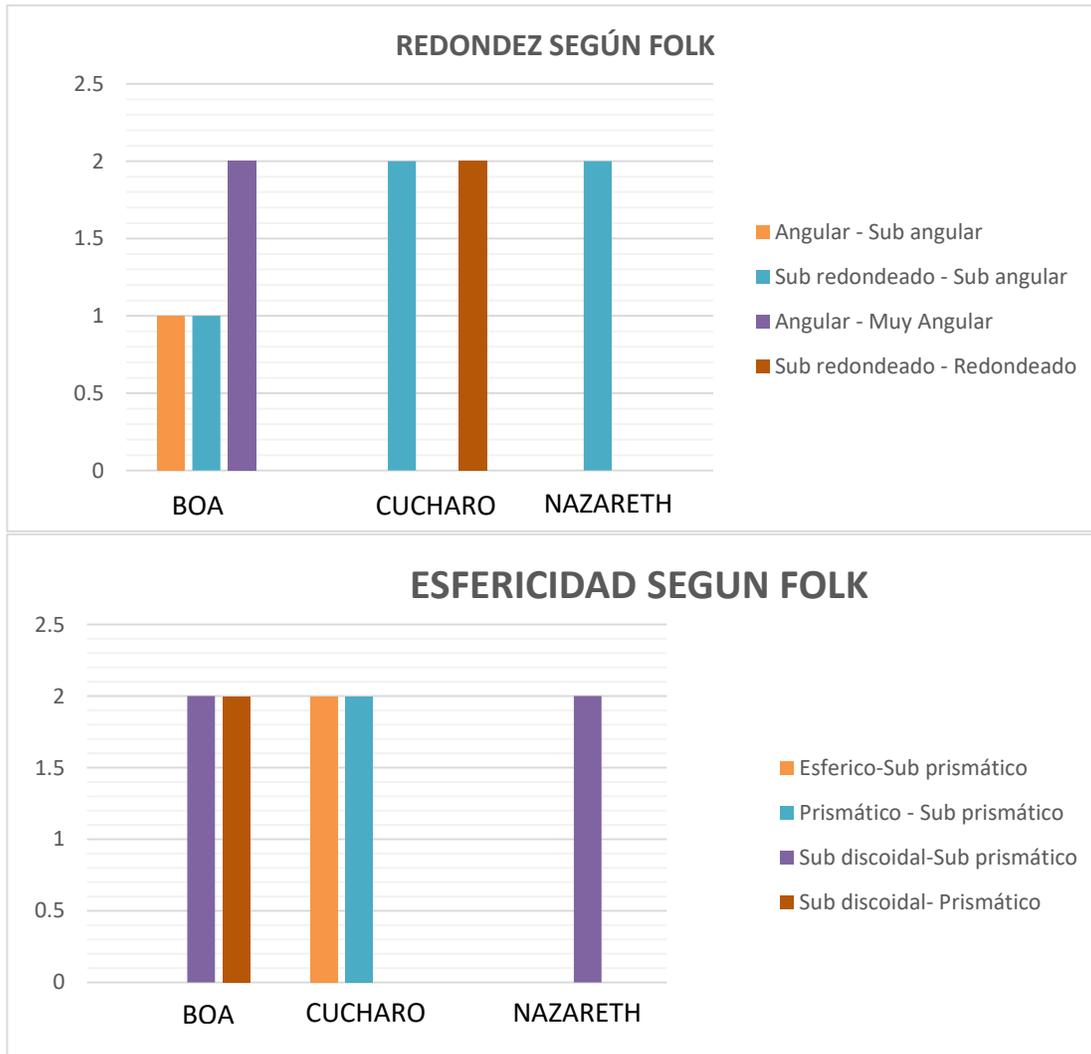


Figura 31. Diagrama de barras comparativo de la redondez y la esfericidad según Wandel para los sectores estudiados.

Para la petrografía Microscópica, se realizó un análisis durante la fase de laboratorio y se obtuvieron los datos microscópicos relacionados en las tablas 5, 6 y 7 específicas para cada uno de los sectores. El 100% de las muestras presentó Porosidad primaria intergranular, y el 70% exhibieron porosidad secundaria debido a fracturas. De igual forma todas las muestras están compuestas principalmente por cemento

silíceo, cuarzo y arcilla. Se determinó el nombre de cada una de las muestras con base a los principales constituyentes, en el sector La Boa, el 100% de las muestras presentó un contenido de Cuarzo igual o mayor al 80%, el restante correspondía a Limo y Arcilla en diferentes porcentajes (Ver Fig. 32), de este modo se estableció que todas las muestras pertenecían a Cuarzoarenitas, estos mismos constituyentes se encontraron en las muestras correspondientes a los sectores Cucharó (Ver Fig. 33) y Nazareth (Ver Fig. 334), obteniendo Cuarzoarenitas como el nombre del total de las muestras. En cuanto al ambiente sedimentario para las muestras de los Sectores La boa y Cucharó se identificó como de cordones de playa progradantes y para el sector de Nazareth se comprobó como un ambiente transgresional.

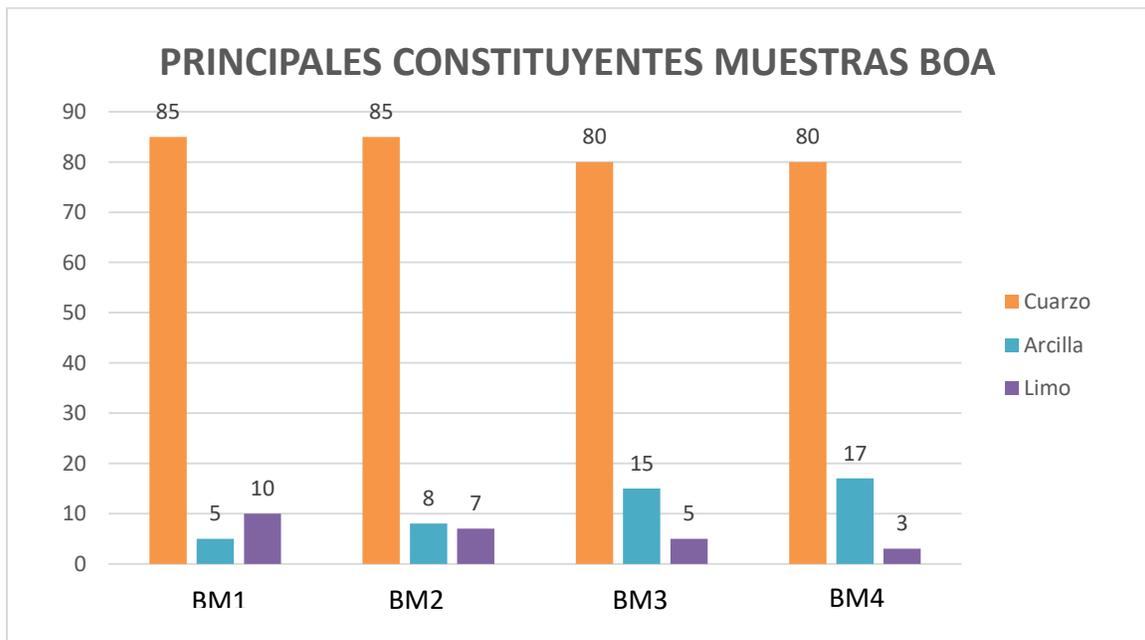


Figura 32. Principales constituyentes del sector BOA. Principales constituyentes de las muestras analizadas.

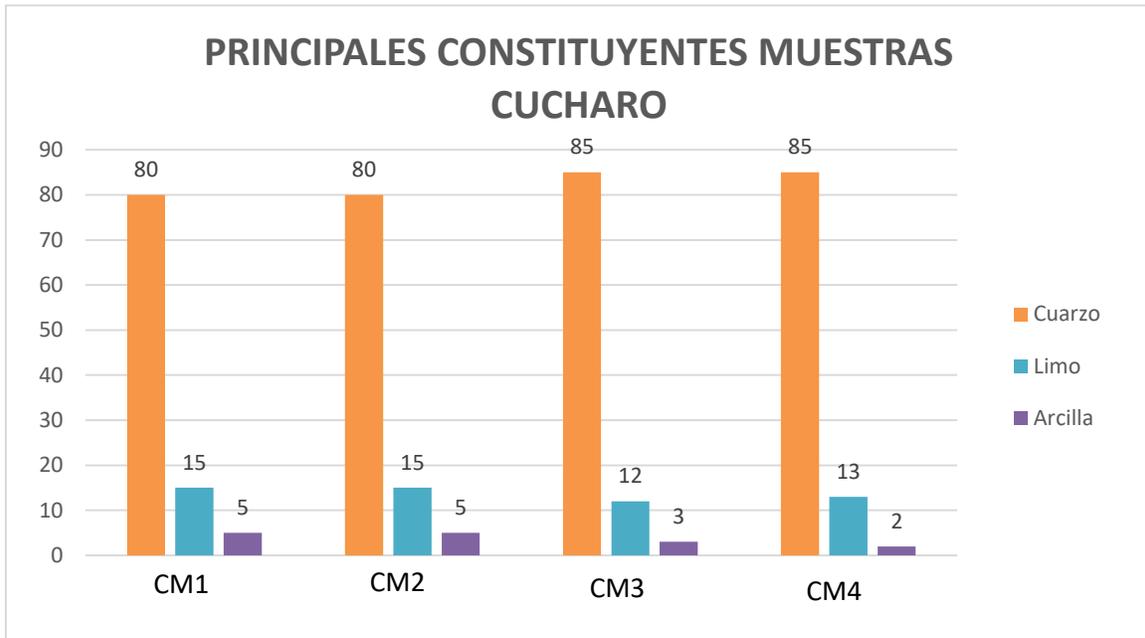


Figura 33. Principales constituyentes del sector CUCHARO. Principales constituyentes de las muestras analizadas.

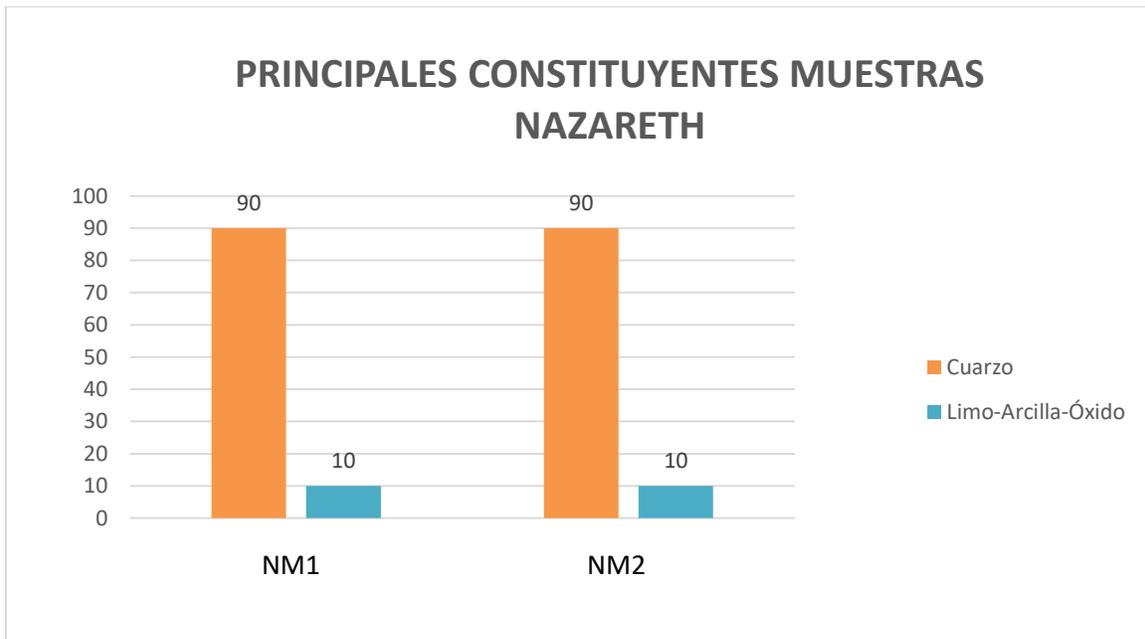


Figura 34. Principales constituyentes del sector NAZARETH. Principales constituyentes de las muestras analizadas.

5.2. Microtermometría de las Inclusiones Fluidas

Se llevó a cabo el método Microtermométrico en ocho muestras de los tres sectores mencionados anteriormente; durante la investigación se determinó la presencia de un único mineral, el cuarzo, en el cual se encuentran las IF, por lo que los principales resultados, generados durante la medición en los cambios de fases, se resumen en la tabla 8.

Tabla 8. Datos microtermométricos principales de las IFs en cuarzo.

Fase		Th °C	Tn °C	Tm °C
Cuarzo	Min	99.50	-98.50	-36.60
	Mean	147.28	-64.36	-29.26
	Max	187.20	-73.50	-15.60
	Mode	160.20	-70.10	-32.80

Las mediciones de homogeneización de IFs se llevaron a cabo antes de los ciclos de congelación, para evitar el estiramiento de IFs por la expansión del hielo. Después de la homogeneización total, se enfriaron los IFs y se midieron las temperaturas de nuclearización y de fusión del hielo.

Debido al pequeño tamaño de las IFs y su comportamiento metaestable, las mediciones de baja temperatura fueron problemáticas para la fase de cuarzo evaluada. Los cambios de la fase a bajas temperaturas (es decir, fusión de hidratos de sal) no pudieron identificarse y en todas las IFs solo se midieron las temperaturas de fusión del hielo (Tm), es así como al enfriarse rápidamente las IFs, se observó un último movimiento repentino de la burbuja de vapor, que se tomó como un indicador para establecer la Tm.

Los gráficos comparativos (Ver Fig. 35), confrontan los datos tomados de manera directa en el momento de las mediciones microtermométricas de laboratorio, de cada uno de los sectores analizados, de esta manera se pueden asociar las temperaturas de homogenización con el momento del entrapamiento, es decir, que permiten identificar las familias de cristales primarios de las familias de cristales secundarios.

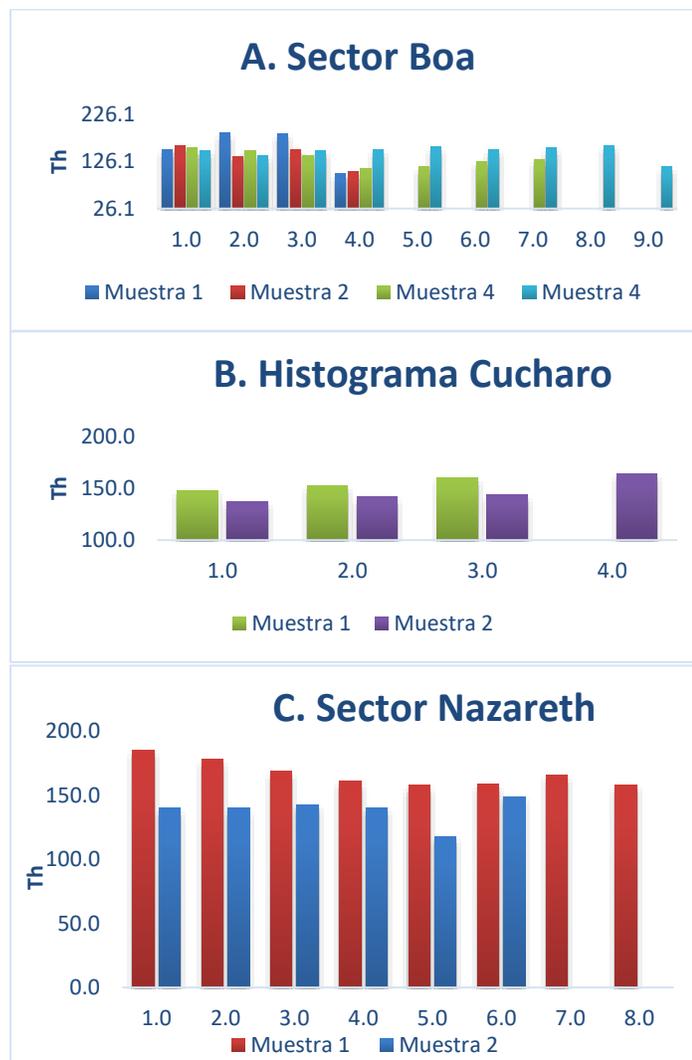
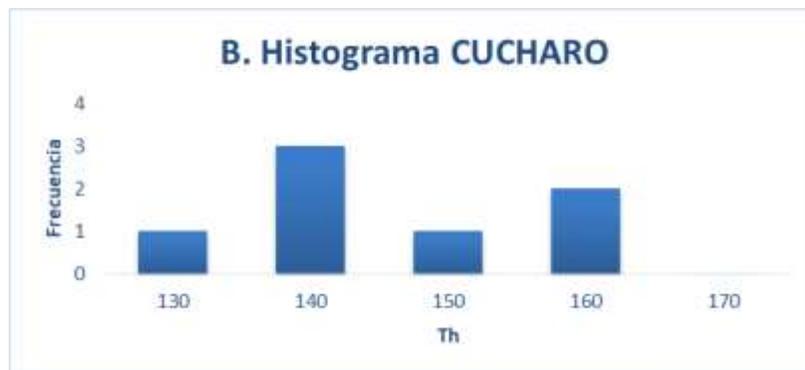
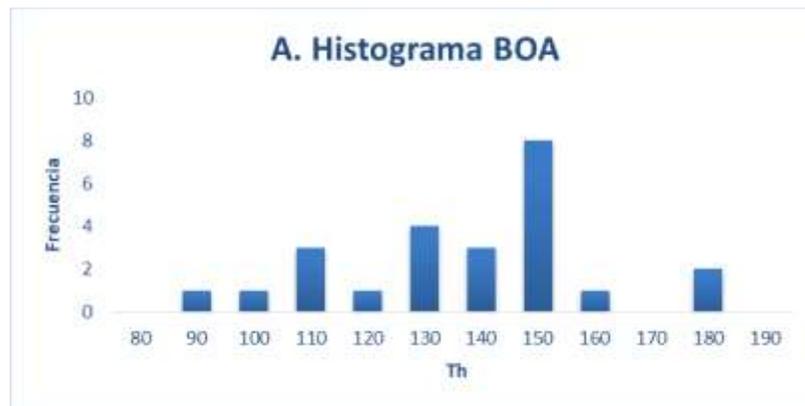


Figura 35. Gráficos comparativos de las temperaturas de homogenización para cada muestra de: (A) Sector BOA, (B) Sector CUCHARO y (C) Sector NAZARETH.

Los histogramas de frecuencia de la temperatura de homogeneización (T_h) (Ver Fig. 36) y de la temperatura de fusión del hielo (T_m) (Ver Fig. 37), muestran la frecuencia de estas variables mediante una distribución de los datos medidos durante la fase de laboratorio; es así como se identifica que la fase del cuarzo se caracteriza por tener una T_h media de 147.28°C , mientras que T_m arroja un valor medio de -29.26°C .



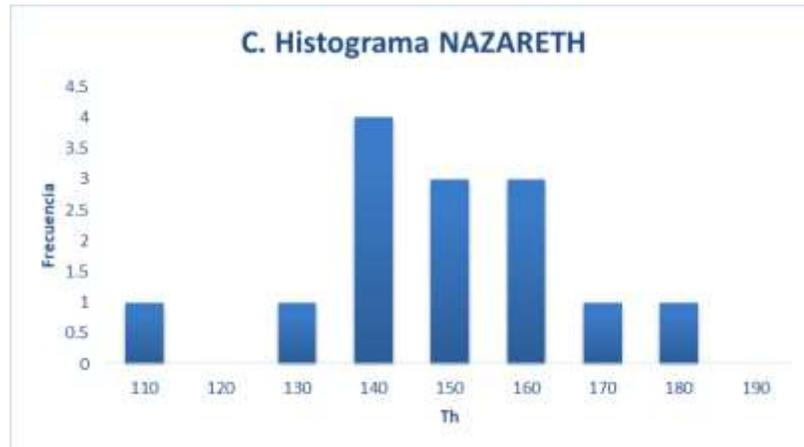
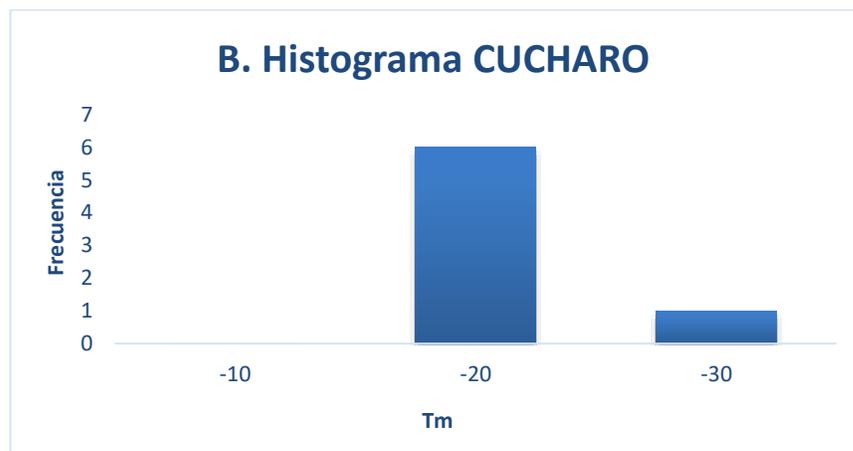
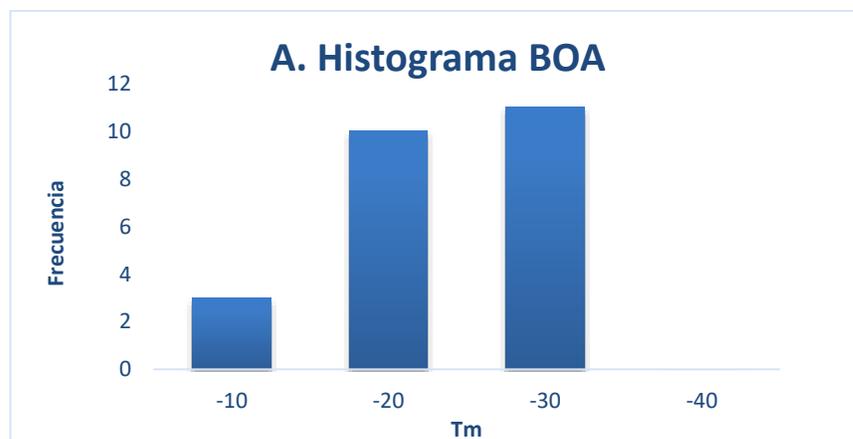


Figura 36. Histogramas de frecuencias para las temperaturas de homogenización de: (A) Sector BOA, (B) Sector CUCHARO y (C) Sector NAZARETH.



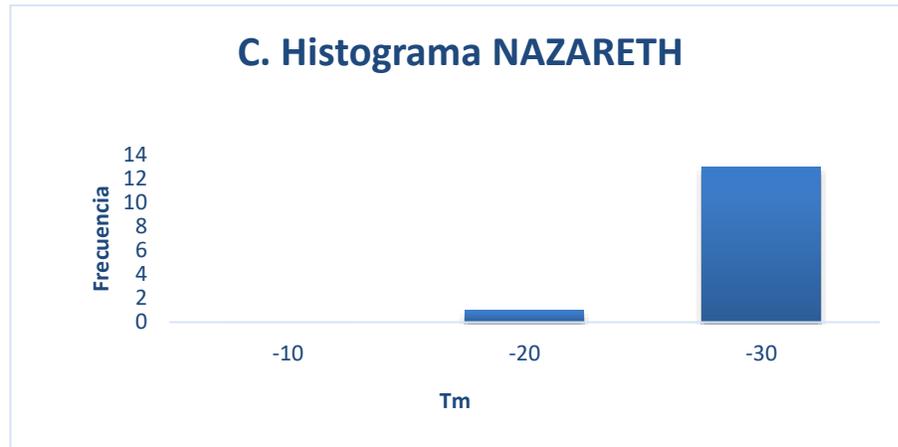


Figura 37. Histogramas de frecuencias para las temperaturas de fusión del hielo de: (A) Sector BOA, (B) Sector CUCHARO y (C) Sector NAZARETH.

Los gráficos de covarianza (Ver Fig. 38), muestran las diferencias entre las Temperaturas de fusión del hielo (T_m) y las temperaturas de homogenización (T_h) presentes entre los sectores de estudio.

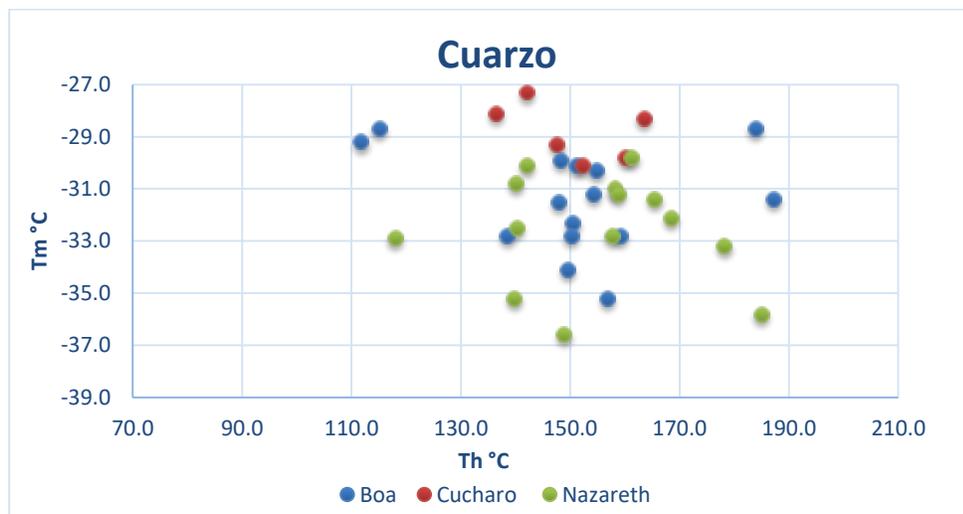
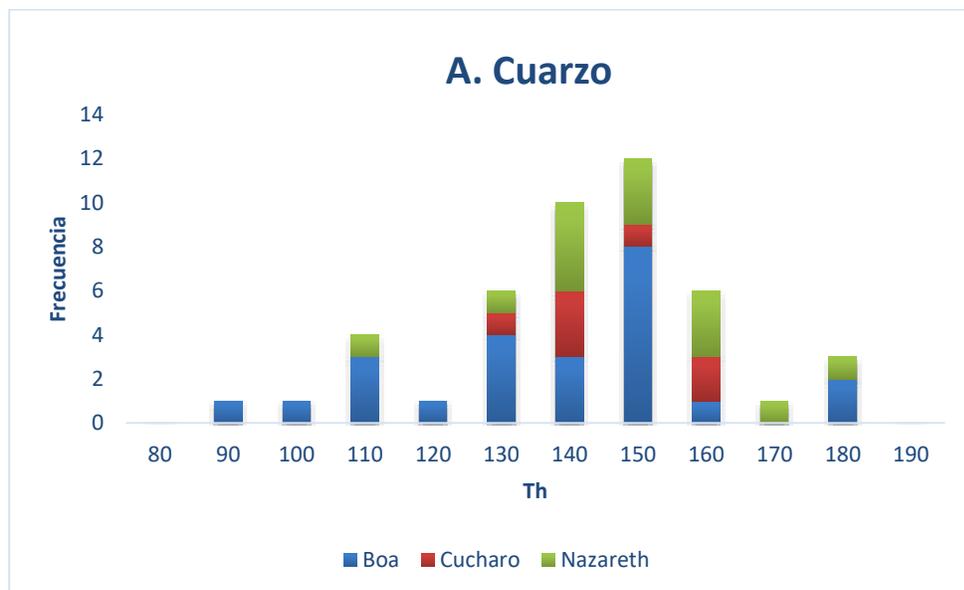


Figura 38. Gráfico de covarianza $T_m - T_h$, que muestra las diferencias entre los sectores analizados.

Las muestras de los tres sectores analizados en total tienen IFs medibles en cuarzo (Qz), para el sector Boa, se midieron 24 IFs para Th, dando como resultado un rango de temperatura entre 99.5°C y 187.2°C y para Tm un rango de temperatura entre -35.2°C y -15.6°C; para el sector Cucharó se midieron 7 IFs para Th, dando como resultado un rango de temperatura entre 136.5°C y 163.5°C y para Tm un rango de temperatura entre -30.10°C y -26.5°C y por último para el sector Nazareth se midieron 14 IFs para Th, dando como resultado un rango de temperatura entre 118°C y 185°C y para Tm un rango de temperatura entre -36.6°C y -29.8°C. El histograma de frecuencia para Th muestra una distribución asimétrica de datos con una moda de 160.2°C en la fase del cuarzo (Ver Fig. 39), mientras que el histograma de frecuencia para Tm muestra una distribución normal con una moda de -32.8°C en la fase del cuarzo (Ver Fig. 39).



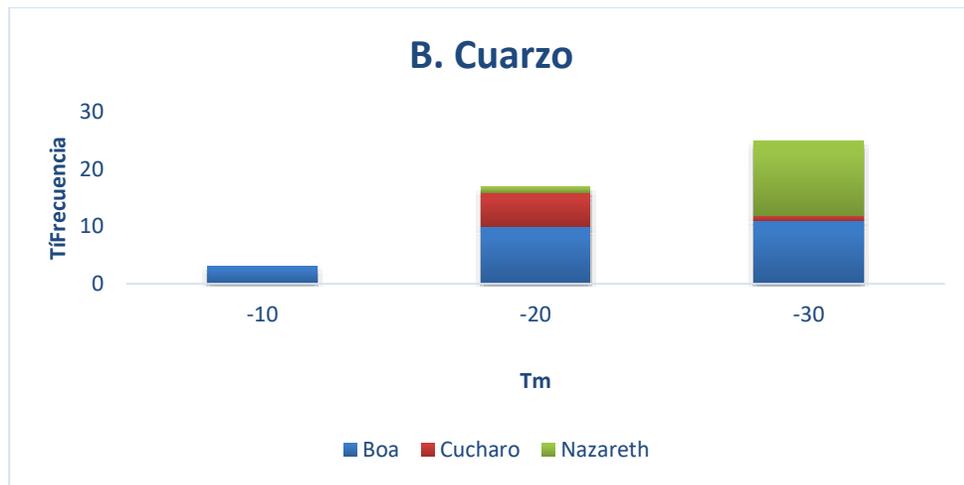


Figura 39. Valores microtermométricos de los sectores analizados: (A) Distribución de frecuencia de T_h ; (B) Distribución de frecuencia de T_m .

5.3. Salinidad y temperatura

Para la determinación del sistema salino presente en cada una de las muestras analizadas se utilizó la temperatura de nuclearización, ya que esta brinda la información acerca del tipo de sales presentes en las inclusiones que se encuentran en los cristales (Sociedad, *et al*; 2010); las muestras en cuestión presentan rangos de T_n en la fase del cuarzo que van desde -98.5°C hasta -58.2°C , indicativo de que las sales presentes en las inclusiones corresponden a un sistema binario $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ (Bodnar, 1993), así, por medio de los programas AQS01, AQS03 y BULK COMPOSITION, se logró determinar el porcentaje en peso equivalente de NaCl, el volumen molar del mismo y la fracción molar de la sal presente en el sistema cristalino. Los valores para la fase de cuarzo se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Datos microtermométricos principales de las IFs en cuarzo

Fase		Salinidad NaCl Eq. wt %
Cuarzo	Min	19.13
	Mean	27.92
	Max	33.25
	Mode	30.49

El gráfico de covarianza (Ver Fig. 40) muestra las diferencias presentes en % en peso equivalente de NaCl en el sistema binario que se encuentra en el sistema cristalino, en el cual se logra observar que algunas de las muestras analizadas para el sector Boa se salen de la distribución normal debido a que su Th difiere en intervalos altos, si se compara con los otros sectores, indicativo de que pertenecen a diferentes momentos de entrapamiento, por lo que se definen como inclusiones que se generaron durante fracturas y no durante el patrón mismo de crecimiento del cristal, evidenciándose en las medidas obtenidas, ya que su salinidad es menor, así como su Th.

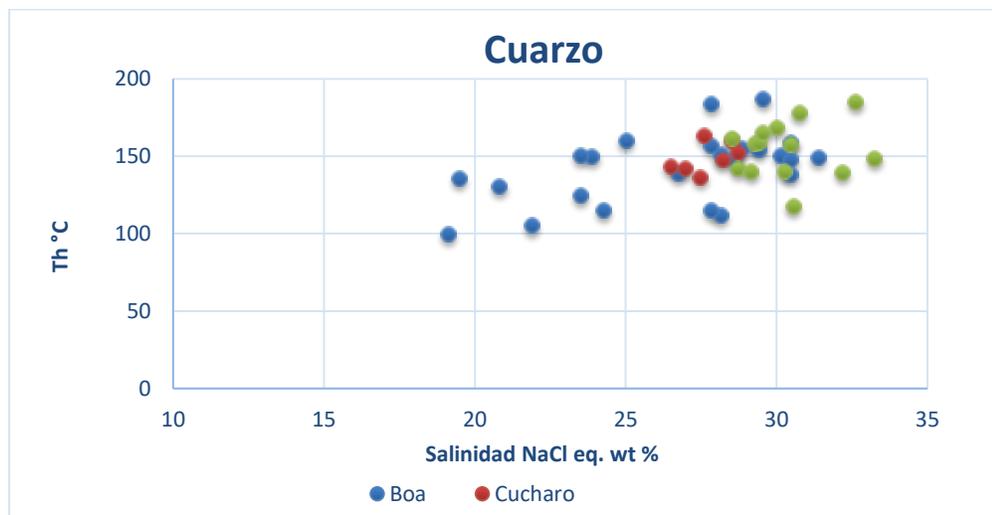


Figura 40. Gráfico de covarianza Th – Salinidad que muestra la diferencia en % eq. Wt entre los sectores analizados.

6. DISCUSIÓN

Al realizar el estudio de los datos microtermométricos obtenidos durante las mediciones realizadas para las muestras de los tres sectores estudiados, se percibió que para el sector Cucharó no se presentó moda para ninguna de las mediciones, esto quiere decir que no se presentaron valores iguales dentro de las medidas, para el sector Nazareth se generó la misma situación para T_m , T_h y la Salinidad, tendencia que no se repitió en el sector Boa debido a la cantidad de datos obtenidos durante el proceso microtermométrico. En lo que respecta a la temperatura de homogenización de las muestras del sector Boa la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura es de 88°C , indicativo de la existencia inclusiones primarias y secundarias, estas últimas generadas en rangos de temperatura mayores a los rangos de las inclusiones primarias, esta situación ya descrita se presentó de igual forma para las muestras de Nazareth, en las cuales la diferencia en la T_h fue de 67°C .

Se realizó también una comparación de los valores de Salinidad obtenidos, de este modo se encontró que la menor salinidad corresponde al sector Boa, valor que se aleja de la tendencia evidenciada dentro de los demás valores que permanecen entre 26 y 30, así que se puede excluir este valor del rango obtenido, este rango refleja que en el momento de entrapamiento de las inclusiones fluidas todas estas se encontraban en condiciones de salinidad similares independientemente del sector en el cual se entraparon. El sector Boa fue el que presentó un rango más estrecho de salinidades indicativo de una formación de las inclusiones fluidas dentro de un período de tiempo muy cercano.

Tabla 10. Datos comparativos microtermométricos principales de las IFs en el sector BOA

Phase		Th °C	Tn °C	Tm °C	Salinity NaCl
Boa	Min	99.50	-98.50	-35.20	19.13
	Mean	142.48	-73.53	-27.58	26.56
	Max	187.20	-58.50	-15.60	31.39
	Mode	115.10	-70.10	-32.80	27.85

Tabla 11. Datos comparativos microtermométricos principales de las IFs en el sector CUCHARO

Phase		Th °C	Tn °C	Tm °C	Salinity NaCl
Cucharo	Min	136.50	-73.10	-30.10	26.50
	Mean	149.41	-44.93	-28.49	27.72
	Max	163.50	-73.50	-26.50	28.72
	Mode	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

Tabla 12. Datos comparativos microtermométricos principales de las IFs en el sector NAZARETH

Phase		Th °C	Tn °C	Tm °C	Salinity NaCl
Nazareth	Min	118.00	-72.50	-36.60	28.53
	Mean	154.44	-58.34	-32.53	30.35
	Max	185.00	62.30	-29.80	33.25
	Mode	#N/A	-69.30	#N/A	#N/A

Las temperaturas de homogenización obtenidas en las inclusiones fluidas, mostradas en las tablas de resultados, indican que en el momento de entrapamiento de las mismas, la roca se encontraba en la ventana de generación de hidrocarburos medianos – livianos (*Ver Fig. 41*), presentando temperaturas que se encuentran entre 99.50°C y 160.20°C, por lo que se establece que debido a procesos diagenéticos posteriores las muestras analizadas alcanzaron las características actuales de los hidrocarburos de la formación caballos, que corresponden a hidrocarburos livianos – gas, con una gravedad

API que va desde 18° a 25° tal y como se evidencia en muchos de los campos petrolíferos presentes en la zona del Valle Superior del Magdalena, como lo son San Francisco, Balcón Arrayan y Mangos (ANH 2012).

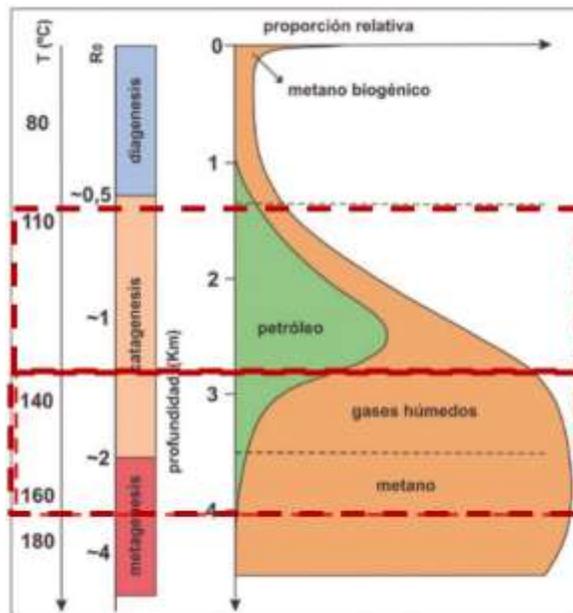


Figura 41. Condiciones de generación de petróleo y gas en función de la profundidad, relacionadas con los estadios de diagénesis, la reflectancia de la vitrinita (R_0) y la temperatura (T). La línea interrumpida roja corresponde al rango en el que se encuentra la Formación Caballos (Tissot, et al; 1974).

La profundidad promedio de los pozos productores de la Formación Caballos presentes en el Valle Superior del Magdalena es de 6000 fts, teniendo en cuenta el gradiente de temperatura que presenta la Agencia Nacional de Hidrocarburos 59.4 °C/Km, a esta profundidad se tendría una temperatura de 108, 65°C, esta se encuentra dentro de la ventana de generación de hidrocarburos y dentro del rango de temperatura de homogenización obtenida de las muestras de los tres sectores estudiados (99,5 – 187,2°C) por lo que se establece que las medidas microtermométricas analizadas corresponden al sector de la formación caballos, y que, los conocimientos de las propiedades del yacimiento

asociadas a las mismas son verídicas, por lo que los datos determinados ayudarían en el desarrollo de los pozos tanto en su desarrollo como en su vida productiva.

Asimismo, debido a las características microtermométricas, análogamente de pueden asociar a tipos de yacimientos, esto, debido a que los criterios de guía con base a rangos de temperatura o de salinidad varían en estos y, en algunos casos, varían entre yacimientos distintos de la misma tipología (Sociedad, *et al*; 2010).

La relación de la salinidad vs temperatura de homogenización (T_h) con el tipo de yacimiento (Wilkinson J.J., 2001) (*Ver Fig. 42*), muestra la ubicación de las medidas microtermométricas dentro de los depósitos mineralógicos existentes, estableciendo los valores arrojados en laboratorio y de escritorio (aplicación de correlaciones para la determinación del % eq. Wt NaCl) en el depósito mineralógico denominado como Mississippi Valley (MVT), depósito que se caracteriza por desarrollarse de manera progradante que precisa de litologías favorables para su emplazamiento, por lo que su control es más litológico que estructural. De esta manera, es usual que en este tipo de yacimientos se formen carbonatos arrecifales o unidades evaporíticas, por tanto generan mineralizaciones económicas importantes que sería preciso evaluar de forma individual; para el caso puntual, se determina que la formación del yacimiento se debe a unidades evaporíticas debido a que durante la descripción petrográfica no se ubican carbonatos.

Es posible asociar este tipo de yacimientos con cuencas petrolíferas y de este modo se podría determinar la composición, evolución en temperatura y presión de salmueras acuosas e Hidrocarburos (Sociedad, *et al*; 2010). Todo ello gracias al análisis microtermométrico aplicando en zonas productoras o de maduración inicial en zonas de migración y llenado de reservorios.

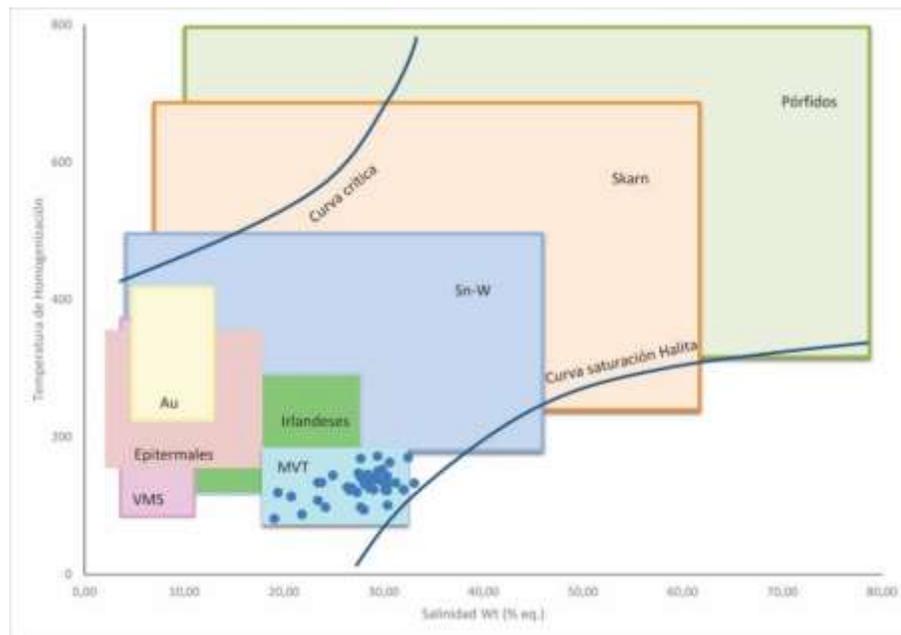


Figura 42. Gráfico analogía de los análisis microtermométricos con la tipología de yacimiento Th vs. Salinidad que muestra la ubicación de los datos microtermométricos dentro de los depósitos mineralógicos existentes (Sociedad, *et al*; 2010).

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se logró identificar los diferentes estudios realizados en la subcuenca de Neiva, con énfasis en el análisis microtermométrico para la caracterización de las propiedades de los fluidos presentes en los yacimientos existentes, encontrando homologaciones del proyecto en cuestión que ayudaron a la determinación de que esta técnica es efectiva cuando se pretende caracterizar el fluido de formación de un yacimiento en cuanto a propiedades como la temperatura, la salinidad y la densidad, resaltando dichas propiedades en los gases, debido a que la Microtermometría es una medición directa de los mismos.

La temperatura de homogenización establece la temperatura a la cual se entramparon los fluidos en el momento de su cristalización y posteriores eventos como micro fracturas, es así como los resultados obtenidos arrojan entrampamientos que oscilan entre temperaturas menores a 200°C, resultados que se pueden asociar a la ventana de generación de hidrocarburos, y por ende al tipo de hidrocarburo, que para el caso específico se relacionan con medianos a livianos.

Se estable por medio de la temperatura de nuclearización el % eq. Wt NaCl, propiedad que permite asociar los resultados a unidades evaporíticas, ya que los resultados arrojados se encuentran en el rango de 19.13% a 33.25% eq. en peso NaCl.

Las IFs presentes en las muestras analizadas demuestran que los resultados encontrados para la propiedad de salinidad, medida en % eq. Wt NaCl es mayor en aquellas que se clasificaron como primarias, factor que confirma la clasificación dada al realizar la categorización microscópica tras la petrografía realizada.

Los resultados de las variables microtermométricas determinados en el análisis realizado durante el desarrollo de la investigación permiten establecer una categorización a nivel de reservorios. Sin embargo, es necesario enfatizar de manera individual el sector potencialmente económico de interés, según el tipo de yacimiento establecido (MVT), debido a la asociación con cuencas petrolíferas que se le atribuyen a este tipo de yacimientos, esto, mediante la implementación de técnicas que permitan la determinación de más propiedades que confirman los resultados ya establecidos y generan categorizaciones a mayor escala del yacimiento y los fluidos en cuestión.

Los cálculos de salinidad se presentan como estimaciones aproximadas debido a que se calculan de manera indirecta por medio de las correlaciones previstas para el sistema NaCl, por lo que se recomienda la realización de estudios que implementen la técnica denominada como Espectrometría de Raman que permitan confirmar de manera directa los resultados obtenidos.

Los cuerpos gruesos de areniscas forman depósitos para los hidrocarburos en muchas partes del mundo, sin embargo su interpretación en casos específicos se dificulta debido a la geología. El estudio de los análogos de yacimientos en afloramientos facilitaría una mejor comprensión de dichos reservorios económicamente significativos y una mejor predicción limitada.

Es evidente la carencia de estudios geológicos a fondo que permitan esclarecer las propiedades de los fluidos de formación de los yacimientos tanto en la exploración como durante el desarrollo de los mismos, de manera que el conocimiento de las propiedades de los potencialmente económicos sea verídica y concisa, y así poder darles una mayor eficiencia en el momento de la explotación con el fin de aprovechar al máximo las reservas que los mismos dispongan, es por esto que se recomienda la implementación del análisis microtermométrico en muestras como ripios de perforación que permitan determinar dichas propiedades de manera directa, evitando las aproximaciones y analogías que se presentan en los análisis a muestras en superficie, como lo son los afloramientos.

Dentro de la industria del petróleo el uso de fluidos para el control de pozo se realiza cada vez que se debe intervenir este por diferentes razones, el conocimiento de la salinidad del agua de formación es fundamental para conocer las propiedades con las cuales debe contar el fluido de control para que este cumpla con su principal función de crear un diferencial de presión que impida una arremetida de los fluidos presentes en el pozo, una

alta salinidad, como la que presentaron las muestras estudiadas, si se desconoce, podría alterar las propiedades del fluido de control, causando el incremento en la viscosidad, los valores de gel y las pérdidas de filtrado de modo que se presentarían problemas al momento de controlar las presiones.

REFERENCIAS

- Alfaro, Claudia; et al. 2009. "PROYECTO MAPA GEOTÉRMICO DE COLOMBIA."
- Andrade Caicedo, Juan Carlos. 2003. "Toma De Datos En La Libreta De Campo.", ministerio de minas y energía - instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear.
- ANH. 2009. "Aspectos Clave: Cuenca Valle Superior Del Magdalena." (Figura 2): 1–24.
- . 2010. "MEMORIAS AL CONGRESO PERIODO 2009 - 2010."
- . 2012. "AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS INFORME DE GESTIÓN 2011 Enero de 2012."
- Asociación Colombiana de Petróleos, 2014. "Informe Estadístico Petrolero". Ministerio de minas y energía. 1: 22-25.
- Bodnar, R J. 1993. "Revised Equation and Table for Determining the Freezing Point Depression of H₂O-NaCl Solutions." 57(1988): 683–84.
- Carlos, Juan, S A Hocol, and Valle Superior. 1968. "Sedimentología y Estratigrafía Secuencial de La Formación Caballos , Subcuenca de Neiva , Valle Superior Del Magdalena." (Figura 1).
- Carrillo, L., J. G. Aguilar, and J. M. Rodríguez. 1993. "Arenas y El Aprendizaje de La Geología, Las. Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra." 1(1): 37–43.
- Chavarro, Hernandez M F; Palencia, Barona L. A.; 2013. "CORRELACION PETROFISICA EN SUPERFICIE CON SUBSUELO DE FORMACIONES PRODUCTORAS SUBCUENCA DE NEIVA." "CORRELACION PETROFISICA EN SUPERFICIE CON SUBSUELO DE FORMACIONES PRODUCTORAS SUBCUENCA DE NEIVA 1(September).
- Chen, D., Schweizer, P., & Horbaczewski, A. 2009. "Reservoir Rock & Source Rock Types: Classification, Properties & Symbols. Course PETR." 1.
- Córdoba, Fabio;, Edgar; Hernández, and Ecopetrol S.A. 1994. "SISTEMAS PETROLIFEROS DE LA SUBPROVINCIA DE NEIVA, VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA, COLOMBIA CORDOBA, FABIO Y EDGAR CHAJID KAIRUZ HERNANDEZ Empresa Colombia de Petroleos/ECOPETROL." *Acgcp* (Figura 1).
- Flórez, J. M., & Carrillo, G. 1994. "Estratigrafía de La Sucesión Litológica Basal Del Cretácico Del Valle Superior Del Magdalena. Estudios Geologicos Del Valle

Superior Del Magdalena: Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Trabajo II, 26.”

Franco, Ricardo, Rio Magdalena, and Valle Superior. 1990. “30633-110914-1-Pb.” (17): 41–64.

Gaona, Julian;, and Ingrid Sánchez. 2018. “CARACTERIZACIÓN DIAGENÉTICA Y PETROFÍSICA DE LAS ROCAS CARBONATADAS FMS. HONDITA-LOMAGORDA, SECTOR CUEVA DEL TIGRE, MUNICIPIO DE YAGUARÁ – HUILA, CON POTENCIAL PARA YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS.”

García, Mario, Ricardo Mier, Luis E. Cruz, and Mauricio Vásquez. 2009. “Informe Ejecutivo: Evaluación Del Potencial Hidrocarburífero de Las Cuencas Colombianas.” *Report*: 219pp. http://www.oilproduction.net/cms3/files/cuencas_petroleras_de_colombia-2009.pdf.

Gasparrini, Marta, and Ronald J Bakker. 2006. “CHARACTERIZATION OF DOLOMITIZING FLUIDS IN THE CARBONIFEROUS OF THE CANTABRIAN ZONE (NW SPAIN): A FLUID-INCLUSION STUDY WITH CRYO-RAMAN SPECTROSCOPY.” : 1304–22.

Goldstein, R. H., & Reynolds, T. J. 1994. “Fluid Inclusion Microthermometry.” HOLLISTER, L. S.; ROEDDER, E.; BURRUS, R. C.; SPOONER, E. T. C & TOURET, J. 1981. “Practical Aspects of Michrothermometry.”

González, R. F. (1996). Análisis del sistema poroso de las rocas. In Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico:[Cursos de verano de El Escorial de la Universidad Complutense de Madrid, 1994] (pp. 227-236).

Mangas, J., and J. Sierra. 1991. “Las Inclusiones Fluidas: Método de Análisis e Interpretación.” *Yacimientos minerales: técnicas de estudio, tipos, evolución metalogénica, exploración (Parte 1)*: 79–146.

Mojica Jairo; Colmenares Fabio; Macía, Carlos; 1985. “Consideraciones Sobre La Importancia de La Paleogeografía y Las Áreas de Aporte Precretácicas En La Prospección de Hidrocarburos En El Valle Superior de Magdalena, Colombia.” (14).

Montaño, Quintero M. E. 2015. “CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN LOMAGORDA, APLICADO A LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL COMO YACIMIENTO NO CONVENCIONAL DE HCS, HUILA, VSM.Pdf.” : 43.

- Nuñez, Alberto et al. 1998. "Geología de La Plancha 323 Neiva." : 840.
<http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010002476/mapa/pdf/0101024761300002.pdf>.
- Orozco-Centeno, Wendy Patricia, Jhon Willian Branch Bedoya, and Jovani Alberto Jiménez-Builes. 2014. "Classification of Fine-Grained Igneous, Sedimentary and Metamorphic Rocks through Structured Programming." *Boletín de Ciencias de la Tierra* (36): 5–9.
- Pardo, Andrés, and Juan F Martínez. 2007. *Agencia Nacional de Hidrocarburos: Colombian Sedimentary Basins*.
- Pettijohn, F. J.; Potter, PE, and Siever, R. 1957. "Sand and Sandstone." 1.
- Powers, Maurice Cary. (1953). A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Research*, 23(2), 117-119.
- De Porta, Jaime. 1965. "La Estratigrafía Del Cretácico Superior y Terciario En El Extremo S Del Valle Medio Del Magdalena." *Boletín de Geología*: 5–50.
- Randive, Kirtikumar et al. 2014. "Study of Fluid Inclusions: Methods, Techniques and Applications." *Gondwana Geological Magazine* 29(1–2): 19–28.
- Riga, Bernardo J. González. 2006. "ROCAS SEDIMENTARIAS CLÁSTICAS."
- Roedder, Edwin. 1971. "Metastability in Fluid Inclusions." *Soc. Mining Geol. Japan, Special Issue 3*: 327–34.
- Smith, F. G. 1953. "Historical Development of Inclusion Thermometry. University of Toronto Press."
- Sociedad, Geológica, A C México Mexicana, and Antoni Camprubí. 2010. "Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana Criterios Para La Exploración Minera Mediante Microtermometría de Inclusiones Fluidas." *Sociedad Geológica Mexicana* 62(1): 25–42. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94315961003>.
- SORBY, H. C. 1858: "On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks". *Geol. Soc. London Quart. Jour.*, 14: 453-500
- Swanenberg, H. E. C. 1979. "Phase Equilibria in Carbonic Systems, and Their Application to Freezing Studies of Fluid Inclusions." *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 68(3), 303-306. 1: 303–6.

Tissot, B., B.; Durand, J.; Espitalie, and A. Combaz. 1974. "Influence of Nature and Diagenesis of Organic Matter in Formation of Petroleum." 3: 499–506.

Wilkinson J.J. 2001. "Fluid Inclusions in Hydrothermal Ore Deposits." *Treatise on Geochemistry: Second Edition* 44: 119–42.