

**Mineralogía y sus implicaciones genéticas en el miembro superior de la formación la luna  
(galembó), en la sección de la Q. Aguablanca (VMM)**

**Andrés Felipe Mejía Duran**

**Trabajo de grado para optar el título de geólogo**

**Director.**

**Carlos Alberto Ríos Reyes.**

**PhD en Ciencias Aplicadas.**

**CO-Director.**

**María del Rosario Trejos Pérez.**

**Física**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas**

**Escuela de Geología**

**Bucaramanga**

**2018**

### **Agradecimientos**

Agradecimientos al PhD Carlos Alberto Ríos Reyes, director del proyecto, Maria del Rosario Pérez y a Msc. Efraín Casadiego por el apoyo brindado y por préstamo del material de trabajo para el desarrollo de investigación

A los Laboratorios de Microscopía Electrónica de Barrido de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatiguará y del Instituto Colombiano del Petróleo sede Piedecuesta y su personal, por la información y adquisición de datos

A los Laboratorios de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander– Parque Tecnológico de Guatiguará y del Instituto Colombiano del Petróleo y su personal por el apoyo en la preparación y adquisición de datos.

Al laboratorio de Análisis Petrofísico de la Universidad Industrial de Santander– Parque Tecnológico de Guatiguará y su personal por la ayuda brinda en la limpieza de las muestras.

A todos aquellos que me apoyaron en el desarrollo de esta investigación desde las asesorías, opiniones y críticas.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	18
1. Objetivos .....	19
1.1 Objetivo General.....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Antecedentes .....	20
2.1 Localización de área de estudio .....	20
2.2 Antecedentes geológicos.....	21
3. Marco Conceptual.....	26
3.1. Microscopía Electrónica de Barrido- Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (SEM-EDS).....	26
3.1.1 Scanning Electron Microscopy (SEM).....	27
3.1.2 Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS).....	29
3.2 Difracción de Rayos X. (DRX or XRD).....	30
4. Marco teórico.....	33
4.1 Petrología de Rocas Carbonatadas.....	33
4.1.1 Clasificación de Calizas según Folk (1974).....	33
4.1.2.1 Calcita Microcristalina.....	33
4.1.2.2 Calcita Esparita.....	34

---

4.1.2.3 Aloquímicos.....	34
4.1.2.3.1 Intraclastos.....	34
4.1.2.3.2 Oolitos:.....	34
4.1.2.3.3 Fósiles:.....	34
4.1.2.3.4 Pellets:.....	35
4.1.2 Escala de Tamaños de Granos de Rocas Carbonatadas.....	35
4.2 Mineralogía de Cornelis Klein-Cornelius S. Hurlbut (1996).....	36
4.2.1 Sulfuros.....	36
4.2.1.1 Calcosina.....	36
4.2.1.2 Galena.....	36
4.2.1.3 Esfalerita.....	37
4.2.1.4 Calcopirita.....	37
4.2.1.5 Pirrotina.....	37
4.2.1.6 Pirita.....	37
4.2.2 Carbonatos.....	38
4.2.2.1 Grupo de la Calcita.....	38
4.2.2.2 Grupo de Aragonito.....	40
4.2.3 Sulfatos.....	40
4.2.3.1 Sulfatos Anhidros.....	40
4.2.4 Fosfatos.....	42
4.2.4.1 Apatito.....	42
4.2.5 Silicatos.....	42
4.2.5.1 Tectosilicatos.....	43

4.2.5.2 Filosilicatos.....	44
4.3 Matriz y Granos (Basado en Flügel (2010)). .....	46
4.3.1 Microfábrica.....	47
4.3.1.1 Tamaño de Grano.....	47
4.3.1.2 Contactos de Grano.....	47
4.3.1.3 Forma del Grano. ....	47
4.3.1.4 Inclusiones de cristales. ....	47
4.3.1.5 Microfenestra. ....	47
4.3.1.6 Límites entre la matriz de calcita y los fósiles.....	48
4.3.1.7 Microporosidad. ....	48
4.3.2 Granos Esquelatales. ....	48
4.3.3 Clasificación de tamaños de partículas de las calcitas segun Flügel (2010).....	48
4.3.3.1 Micrita.....	48
4.3.3.2 Microesparita. ....	49
4.3.3.3 Limo de calcita “Calcsiltite”.....	50
4.4 Clasificación de micro-texturas y morfologías de micritas según Deville de Periere et al (2011).....	50
4.5 Índice de “cristalinidad” de la Illita. ....	52
5. Metodología.....	54
5.1 Recopilación de Información y Selección de Muestras.....	54
5.2 Preparación de Muestras y Fase de laboratorio. ....	55
5.2.1 Preparación de Muestra para SEM. ....	55
5.2.2 Preparación de muestras para análisis en DRX. ....	57

---

5.3 Interpretación de Datos y Elaboración de Informe Final.....	59
6. Resultados.....	60
6.1 Análisis de SEM-EDS.....	60
6.1.1 Wackestone.....	61
6.1.2 Micrita Lodosa.....	74
6.1.3 Arcillolita Calcárea.....	95
6.1.4 Esparita.....	110
6.1.5 Biomicroesparita Packestone.....	120
6.2 Análisis de Difracción de Rayos X (XRD o DRX).....	127
6.2.1 Índice de Cristalinidad.....	134
7. Interpretación de Datos.....	136
7.1 Composición mineralógica y su procedencia.....	136
7.2 Porosidad.....	140
7.3 Índice de Kübler.....	149
8. Discusión.....	150
9. Conclusiones.....	153
10. Recomendaciones.....	156
Referencias Bibliográficas.....	157

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización del área de estudio. Muestra los puntos de muestreos. ....	20
Figura 2. Esquema básico de las partes del Espectrómetro. ....	29
Figura 3. Esquema Ilustrativo de Ley de Bragg. ....	31
Figura 4. Hábitos principales de los sulfuros. ....	38
Figura 5. Hábitos cristalinos más comunes de las calcitas y dolomitas. ....	39
Figura 6. Hábitos cristalinos del grupo de la baritina y el yeso. ....	41
Figura 7. Hábitos cristalinos del apatito. ....	42
Figura 8. Hábito cristalino más común de los cuarzos. ....	44
Figura 9. Clasificación de microtexturas micríticas. ....	51
Figura 10. Esquema básico del recubrimiento por medio de “Sputtering” ....	56
Figura 11. Criterios en que se basan las descripciones. ....	60
Figura 12. Acercamiento de la microfotografía de la muestra wackestone. ....	61
Figura 13. Rasgos generales de la litofacie wackestone. ....	62
Figura 14. Vista general de las esparitas. (Wackestones). ....	63
Figura 15. Acercamiento a un cristal de esparita. (wackestone). ....	64
Figura 16. Espectro EDS de un cristal de esparita (wackestone). ....	65
Figura 17. Matriz de una wackestone. ....	67
Figura 18. Acercamiento más detallado de la matriz de una wackestone. ....	68

Figura 19. Espectros EDS de la matriz de una wackestone.....	70
Figura 20. Fragmentos fósiles en wackestones.....	71
Figura 21. Fragmento Fósil asociado a foraminíferos en wackestones.....	72
Figura 22. Espectro EDS de los fragmentos de fósiles en wackestones.....	73
Figura 23. Acercamiento de microfotografía de la micrita lodosa.....	74
Figura 24. Cristales de apatitos en micritas lodosas.....	76
Figura 25. Espectro EDS de cristales de apatitos en micritas lodosas.....	77
Figura 26. Componentes minerales predominantes en las micritas lodosas.....	79
Figura 27. Matriz relleno y bordeando los cristales de esparitas en micritas lodosas.....	80
Figura 28. Mineral arcilloso de la matriz de la micrita lodosa.....	81
Figura 29. Minerales predominantes de la micrita lodosa.....	82
Figura 30. Acercamiento a la matriz de la micrita lodosa.....	83
Figura 31. Acercamiento a los minerales arcillosos de la micrita lodosa.....	84
Figura 32. Espectros EDS con punto de análisis en las esparitas y en los minerales arcillosos...	85
Figura 33. Cristales de cuarzo en micritas lodosas.....	86
Figura 34. Óxidos en micritas lodosas.....	87
Figura 35. Óxidos con morfología esférica en micritas lodosas.....	87
Figura 36. Espectros EDS de los minerales de cuarzo y óxidos (alteraciones) en las lodolitas calcáreas.....	88
Figura 37. Fragmento de cristal de barita en micritas lodosas.....	89
Figura 38. Barita que se encuentra en la micrita lodosa.....	90
Figura 39. Piritas Framboidales en micritas lodosas.....	91
Figura 40. Piritas Framboidales en la micrita lodosa.....	92

Figura 41. Fragmentos fósiles recristalizados en micritas lodosas. ....	93
Figura 42. Fragmentos Fósiles recristalizados en micritas lodosas. ....	94
Figura 43. Espectro EDS de la Baritina (barita) en las micritas lodosas. ....	95
Figura 44. Mineral arcilloso en matriz de la Arcillolita calcárea. ....	97
Figura 45. Microfábrica y orientación de los minerales arcillosos de arcillolitas calcáreas. ....	98
Figura 46. Cristales de esparita, micritas y cuarzo criptocristalino en Arcillolita calcárea. ....	99
Figura 47. Cristales de Micritas en la matriz de la arcillolita Calcárea. ....	100
Figura 48. Cristales de apatitos en Arcillolita calcárea. ....	100
Figura 49. Cristales euhedrales de apatitos en Arcillolitas calcáreas. ....	101
Figura 50. Cuarzo microcristalino y minerales arcillosos en arcillolitas calcáreas. ....	101
Figura 51. Espectro EDS cuyo punto de análisis es la matriz de la Arcillolita calcárea. ....	102
Figura 52. Fragmentos de Fósiles recristalizados en arcillolitas calcáreas. ....	104
Figura 53. Fragmentos Fósiles recristalizados en arcillolitas calcáreas. ....	105
Figura 54. Cristales de esparitas en la Arcillolita calcárea. ....	106
Figura 55. Piritas y Esfaleritas en Arcillolitas Calcáreas. ....	108
Figura 56. Espectro EDS de la Esparita, Pirita y Esfalerita en Arcillolita Calcárea. ....	109
Figura 57. Cristales de esparitas en la esparita. ....	111
Figura 58. Matriz (micritas y cuarzo microcristalino) de la esparita. ....	113
Figura 59. Composición mineralógica predominante de la matriz de la Esparita. ....	114
Figura 60. Cristales de esparitas, apatitos y matriz de la muestra de esparita. ....	115
Figura 61. Fragmentos fósiles recristalizados de la muestra de Esparita. ....	116
Figura 62. Espectro EDS de la matriz y de los cristales de esparita en la muestra esparita. ....	117
Figura 63. Espectros EDS de la esfalerita, barita y pirita en la muestra de Esparita. ....	119

Figura 64. Componentes principales de la matriz en Biomicroesparita Packestone. ....	121
Figura 65. Componentes principales de la matriz en Biomicroesparita Packestone. ....	122
Figura 66. Baritina en la Biomicroesparita Packestone. ....	123
Figura 67. Fragmentos fósiles recristalizados en biomicroesparitas Packestone. ....	124
Figura 68. Fragmento fósil recristalizado en biomicroesparita packestone. ....	125
Figura 69. Espectro EDS de la mica Moscovita en biomicroesparita packestone. ....	126
Figura 70. Difractograma de DRX de la litofacie arcillolita calcárea. ....	130
Figura 71. Difractograma de DRX de la litofacie arcillolita calcárea. ....	131
Figura 72. Difractograma de DRX de la litofacie arcillolita calcárea. ....	132
Figura 73. Difractograma de DRX de la litofacie arcillolita calcárea. ....	133
Figura 74. Medida del FWHM del pico 001 de la illita. ....	134
Figura 75. Medida del FWHM del pico 001 de la illita. ....	135
Figura 76. Medida del FWHM del pico 001 de la Caolinita. ....	135
Figura 77. Medida del FWHM del pico 001 de la Caolinita. ....	136
Figura 78. Microporosidad secundaria en las wackestones. ....	141
Figura 79. Microporosidad en la matriz de las wackestones. ....	142
Figura 80. Microporosidad en la matriz de las micritas lodosas. ....	143
Figura 81. Microporosidad en la matriz de la arcillolita calcárea. ....	144
Figura 82. Microporosidad en la matriz de arcillolita calcárea. ....	145
Figura 83. Rasgos generales de las fracturas rellenadas por calcita y materia orgánica en arcillolitas calcáreas. ....	146
Figura 84. Acercamiento a las venas de calcita en las arcillolitas calcáreas. ....	147

---

Figura 85. Acercamiento a las venas rellenas por materia orgánica solidificada en arcillolitas calcáreas.....	148
Figura 86. Microporosidades en la matriz de la Esparita.....	149
Figura 87. Tabla de Índice de Kübler .....	150

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Esquema ilustrativo de los sistemas ópticos: Microscopía Óptica y Microscopía electrónica de barrido.....	28
Tabla 2. Escala de tamaño de grano para rocas carbonatadas. ....	35
Tabla 3. Terminología y modos genéticos de origen lodos carbonatados y calizas compuestas por calcita microcristalino y criptocristalino (micritas).....	49
Tabla 4. Fases minerales más sobresalientes con sus respectivos picos.....	127

### **Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Apéndice A: Sección Aguablanca Segmento 1.

Apéndice B: Difractogramas de Difracción de Rayos X.

## Resumen

**Título:** Mineralogía y sus implicaciones genéticas en el miembro superior de la formación la luna (galembó), en la sección de la Q. Aguablanca (VMM)\*.

**Autor:** Andrés Felipe Mejía Duran\*\*.

**Palabras Claves:** Mineralogía, Formación La Luna, Miembro Galembó, SEM, DRX.

### Descripción:

La Formación La Luna siempre ha despertado un gran interés tanto económico como científico por un largo tiempo, y se han empleado múltiples técnicas de análisis con el fin de comprender y estimar su potencial de generador de hidrocarburos. En la siguiente investigación se realizó un análisis mineralógico a partir de la microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X con el fin de brindar una caracterización mineralógica más certera. Para lograr dicha caracterización se tomó como criterios la morfología de los minerales, su tamaño, su micro-fábrica, micro-textura, y ayudado con el espectro EDS para su identificación, se aplica DRX en el caso para determinar los minerales arcillosos. En base a estos criterios se propone que la fuente del carbonato de calcio proviene principalmente de la descomposición de fragmentos de conchillas de invertebrados, se propone que el sílice es aportado al menos por dos fuentes, uno por producto de la precipitación del sílice biogénico, que se forma por la descomposición de fragmentos de organismos ricos en sílice y la segunda fuente es a partir de aporte de sedimentos por la erosión de algún macizo rocoso cercano, también se realizó un análisis cualitativo de los microporos observados principalmente en la matriz de la rocas y también se caracteriza los microporos secundarios que son originados por fracturas post-diagenéticas.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Geología. Director. PhD. Carlos Alberto Ríos Reyes. Codirector. Maria Del Rosario Pérez Trejos.

### **Abstract.**

**Title:** Mineralogy and its genetic implications in the upper member of the luna formation (galembo), in the section of the q. Aguablanca (MVM)\*.

**Author:** Andrés Felipe Mejía Duran\*\*.

**Key Words:** Mineralogy, The Luna Formation, Galembo Member, SEM, XDR.

### **Description:**

The Luna Formation has always aroused great economic and scientific interest for a long time, and multiple analysis techniques have been used in order to understand and estimate their hydrocarbon generator potential. In the following investigation a mineralogical analysis was made from the scanning electron microscopy and X-ray diffraction in order to provide a more accurate mineralogical characterization. In order to achieve this characterization, the morphology of the minerals, their size, their micro-factory, micro-texture, and helped with the EDS spectrum for their identification were taken as criteria, DRX is applied in the case to determine the clay minerals. Based on these criteria it is proposed that the source of calcium carbonate comes mainly from the decomposition of shell fragments of invertebrates, it is proposed that silica is provided by at least two sources, one by product of the biogenic silica precipitation that is formed by the decomposition of fragments of organisms rich in silica and the second source is from the contribution of sediments by the erosion of some rocky massif nearby. Also, a qualitative analysis of the micropores observed mainly in the matrix of the rocks was carried out and secondary micropores are also characterized, which are originated by post-diagenetic fractures.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Geología. Director. PhD. Carlos Alberto Ríos Reyes. Codirector. Maria Del Rosario Pérez Trejos.

## Introducción

La Formación La Luna ha sido estudiada por su gran potencial como roca generadora de hidrocarburos, y estos estudios se han enfocado principalmente en las propiedades geoquímicas, y algunas veces en sus propiedades litológicas Bernal (2009), o en su defecto esta información es confidencial. Se han realizado estudios desde la Concesión Barco por Notestein et al (1944), en la Cuenca de Catatumbo, también es descrita por Bernal (2009) en la en las Q. Azufrada y la Q. Agua-Blanca, el cual describe esta sección como una litología muy monótona compuesta principalmente por biomicritas, posteriormente Casadiego (2014), hace un estudio detallado del Miembro Galembo en la Q. de Aguablanca, posteriormente, Pacheco (2014) hace un análisis de la Formación la Luna en el miembro de Pujamana analizando las propiedades petrofísicas y en la tesis de pregrado de Herrera (2015) hace una caracterización mineralógica de la Formación La Luna en el sinclinal de Nuevo Mundo, en la quebrada la Sorda, por medio de la técnica de DRX.

En este trabajo se propone realizar un análisis mineralógico detallado de la Formación la Luna, en el Miembro Galembo, con el fin de aportar información de la mineralogía y que permitan comprender la procedencia de los sedimentos del Miembro Galembo (Miembro Superior de la Formación La Luna), y las implicaciones genéticas que este conlleva, aplicando las técnicas de SEM-EDS y DRX que permitirán un análisis detallado y para identificar el grado de cristalinidad de los minerales arcillosos. En base a los resultados de estos análisis se pretende generar conclusiones apoyadas en diferentes estudios y trabajos previos acerca del origen de dicha

formación. . En base a los resultados de estos análisis se pretende generar conclusiones apoyadas en diferentes estudios y trabajos previos acerca del origen de dicha formación.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Caracterizar la composición mineralógica al Miembro Galembo (Miembro Superior de la Fm La Luna) en la sección de la Quebrada Aguablanca, con el fin de establecer una relación entre su composición mineralógica predominante y la procedencia de sus sedimentos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Identificar la composición mineralógica por medio de técnicas análisis de rayos X.
- Determinar el índice de cristalinidad de los componentes arcillosos.
- Proponer cuáles fueron las fuentes de sedimentos que formaron al Miembro Galembo (Fm. La Luna).



## 2.2 Antecedentes geológicos

La Formación La Luna fue nombrado por primera vez como “La Luna Limestones” por (HEDBERG, H. 1931) en el Noroeste de Venezuela y las describe como calizas carbonáceas impuras (contenidos de materia orgánica y bituminosa que predomina sobre el sedimento inorgánico) con presencia de cherts negros, se observaron abundantes concreciones elipsoidales, de diámetros de pocas pulgadas hasta el orden del pie y estima un espesor de 610 m.

En Colombia, Notestein, Et al (1944), la describe para la Concesión Barco, con una litología de calizas duras de color gris oscuro, con abundantes foraminíferos, con shales calcáreos bituminosos negros, en la parte superior se puede observar cherts en afloramientos y se sugiere que es la parte superior de esta Formación, y se encuentra concreciones densas de calizas grises del rango de centímetro hasta 75 cm, estima un espesor de 56 m, en el Anticlinal de Tibú, mientras que en la sección tipo tiene 300 m de espesor, es decir, hacia el Norte. .

Morales (1958) toma el mismo nombre de la Formación La Luna que se encuentra en el Perijá en Venezuela, afirmando que las características son muy remarcadas en una extensión regional. Subdivide esta formación en tres miembros: Salada, Pujamana y Galembo. El Miembro Salada su litología esta descrita como shales limosos con laminaciones muy finas, estratificaciones delgadas, de color negro con algunas intercalaciones de estratos de calizas, estima unos espesores de 50 a 100 m. El Miembro Pujamana la sección tipo en una quebrada que es tributario al R. Sogamoso, con el mismo nombre, está compuesto por shales grises a negros, calcáreos, con estratificaciones delgadas, tiene un registro fósil de foraminíferos bentónicos, radiolarios entre los más comunes. Se estima que tiene unos 50 a 225 m y el Miembro Galembo en el que se encuentra bien expuesta en el Cerro Galembo al margen occidental de la Q. Aguablanca, su litología predominante son

shales calcáreos, con estratificaciones delgadas, con numerosas concreciones discoidales, estos estratos son comúnmente intercalados con estratos de chert, el espesor estimado es de 180 a 350 m.

Richards (1968) hace una caracterización más precisa de la Formación La Luna en gran parte de la Concesión Barco, el cual caracteriza las calizas como bien estratificadas “Plana y Onduladas”, el cual tienen una gran cantidad de cherts con concreciones y encuentra cenizas volcánicas erosionadas en la parte basal de la Formación, estima los espesores de 50 m (en Tibú) hasta 250 m (en Sardinatas), Él sugiere que hay una discontinuidad hacia el tope de la Formación. Zumberge (1984), realiza análisis geoquímicos orgánicos a la Formación La Luna, y concluye que está compuesta (42% de minerales de carbonatos), de margas en los Miembros Pujamana y Salada, y estima que la Formación la Luna es de origen marino.

Ramón & Dzou (1997) realizan análisis geoquímicos orgánicos y en base de los resultados obtenidos infieren que el ambiente de depósito de la Fm. La Luna el cual tiene facies carbonatadas de ambiente anóxico marino/pelágico en el sector noroeste del Valle Medio del Magdalena. Mientras que en el sector Oriental recibe una alta proporción de sedimentos Clásticos y destacan que el Miembro galembó tiene contenidos en trazas de carbonatos bajos (promedio de 2.7 %).

A. Rangel Et al (2000). Realiza análisis en la Q. La Sorda, Lebrija, Santander, en el Flanco Occidental del Sinclinal de Nuevo Mundo en el Valle Medio de Magdalena y hace una clasificación más detallada de cada miembro esta formación. Para el Miembro Salada lo describe como wackestones pobremente laminada, wackestones con laminaciones lodosas y shales calcáreos, shales fosfáticos y calcáreos y mudstones laminadas y calizas cristalinas. Para el Miembro Pujamana lo describe como shales fosfáticos y shales calcáreos y con laminaciones de mudstones, bentonitas, wackestones con laminaciones de lodo y shales calcáreos. Para el Miembro

Galembó lo clasifica como shales calcáreos, shales fosfáticos y laminaciones de mudstones, arcillolitas calcáreas con laminaciones de composición fosfática finas y muy finas, este Miembro también está compuesto por packstones que contienen un registro fósil de foraminíferos, pellets, fragmentos de huesos de pescados y oolitos, y localmente presenta laminaciones tipo lenticular y tipo “flaser” y al tope de este Miembro está compuesto principalmente por Packstones con un registro fósil de foraminíferos levemente fosfáticos, con laminaciones tipo lenticular y ondulada, contienen también fragmentos de huesos de pescados, pellets, oolitos y fósiles Planctónicos.

Royero, et al. (2001), hacen una síntesis y una diferenciación de litologías de la Fm. La Luna en la zona de la Cuenca Valle Medio de Magdalena y en la zona de la Cuenca de Catatumbo-Maracaibo; para la Cuenca de Valle Medio de Magdalena la unidad está constituida por calizas grises oscuras, arcillosas, lutitas negras, calcáreas, en capas delgadas, lutitas grises oscuras con delgadas intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas que pueden alcanzar más de dos metros de diámetro, capas delgadas de chert negro y también capas fosfáticas hacia el techo, y para la Cuenca de Catatumbo-Maracaibo está compuesta por calizas y lodolitas calcáreas que contienen grandes concreciones y nódulos discoidales biomicríticos, capas de chert y rocas fosfóricas en la parte alta de la secuencia. Las calizas fosilíferas tienen un registro fósil de amonitas y foraminíferos.

Dos Santos (2003), hace unos análisis a la Fm. La Luna en la Q. Chiriría, en el Estado de Táchira, Venezuela, en los Andes Venezolanos de los procesos diagenéticos a partir de la microscopía de luz polarizada y microscopía electrónica e incluye análisis geoquímicos, petrografía y determinación de su incidencia. Establece como resultado contenidos de arcillas montmorillonita-esmectita en las fases iniciales, el contenido fósil es <50% y divide la diagénesis temprana en 3 Tiempos, T1: procesos orgánicos, cementación fibrosa y piritización, neomorfismos

procesos de silicificación y fosfatización, en el T2: reducción espacial de los carbonatos, transformando los carbonatos en granos más finos, sufren procesos de piritización, fosfatización y silicificación y se genera la cementación en forma de drusa, cementación de los carbonatos ricos en Fe, y en el T3: se genera cemento de sulfato de bario, las fracturas extensivas y continúan los procesos de compactación, fosfatización, silicificación y cementación de carbonatos de hierro (sideritas).

Bernal, Et al (2009), hace un recorrido por la zona donde Morales (1958) hizo la descripción de la Formación, y concluye que la litología, fósiles no coinciden con las descripciones que Él ha observado. Él solo observa una buena exposición de la litología de dicha Formación en el Cerro Galembo, y la describe como una litología monótona de calizas biomicritas con una textura tipo packestone, con un alto contenido de foraminíferos y también con abundantes concreciones elipsoidales con diámetros de 5 cm hasta llegar al orden del metro. Luego se describen capas de calizas biomicritas recristalizadas. Bernal, Et al (2009), explica que sus datos recolectados en campo contrastan demasiado con las descripciones hechas por Morales (1958) ya que en el año de publicación del trabajo de Morales (1958) aún no se habían publicado ni el trabajo de Folk (1959, 1962) ni el de Dunham (1962), con los que se estandarizó la clasificación y determina que el termino Formación La Luna en Colombia es incorrecto, pues no corresponde con la unidad que aflora en Venezuela. Bernal, Et al (2009), descarta los Miembros Salada y Pujamana ya que afirma que no existen, y Él considera que el Miembro Galembo lo representa una sucesión homogénea de calizas biomicritas con una textura tipo packestone.

Pacheco-Sintura (Et al, 2014) hacen una comparación de la Formación la Luna (Sección Q. la Sorda, Lebrija, Santander) y Fm. Conejo (sección de Tunja-Villa de Leyva), y le hacen análisis de R0, TOC, y DRX. Con respecto a la Formación La Luna sus resultados fueron para el Miembro

Salada: tiene una composición de: cuarzo (21%), calcita (74%) y flúor-apatito (5%). Para el Miembro Pujamana: cuarzo (53%), calcita (18), moscovita (11%), sanidina (18%) y para el Miembro Galembo: Calcita (58%), Cuarzo (37%) y flúor-apatito (5%), los porcentajes corresponde en peso (Wt%).

Sarmiento et al (2015) hace una caracterización de micro-facies mediante análisis de secciones de lámina delgada, y también propone que la localidad tipo sea en la Q. la Sorda, Lebrija Santander. El Miembro Salada está compuesto por calizas biomicritas con laminaciones plano paralelas e intercalaciones de eventuales capas de calizas biomicritas re-cristalizadas y en secciones delgadas aparecen como pseudo-esparitas. Con “texturas” tipo packstones >> wackestones y en la parte superior de este Miembro se encuentran capas tabulares, lenticulares o nodulares de “chert diagenético”. Miembro Pujamana: son menos frecuentes las capas de pseudo-esparitas y las calizas micríticas son más blandas (en comparación al Miembro Salada) y no tienen aspecto de shale carbonoso, hay mayor predominio de cuarzo (material terrígeno) en tamaño de partícula limo y en baja proporción el material arcilloso. La textura predominante es wackestones >>> packstone. La parte inferior de este miembro está compuesto por intercalaciones de capas de “Chert Diagenético”. El contacto entre los Miembros Pujamana y Galembo: se identifica con las intercalaciones de fosforitas y calizas biomicríticas de aspecto un “duro”. Estas capas de fosforitas tienden a ser más gruesas hacia el tope de la Formación, tienen bioturbaciones y forma una secuencia granocreciente. Se sub-divide este Miembro en dos partes y está marcada por una contrastante “superficie de inundación”. La parte inferior tiene una composición de calizas biomicríticas con foraminíferos bentónicos, con limos finos a muy finos de cuarzo, y lodos fosfáticos afectados por procesos de silicificación y la parte superior por material terrígeno

conformado por granos subangulares y sub-redondeados de cuarzo, de bioclastos fosfáticos, pellets y oolitos que muestran una somerización.

Herrera (2015) en su tesis de pregrado hace una caracterización mineralógica mediante la difracción de rayos X a la Formación La Luna en el Sinclinal del Nuevo Mundo, en la Q. La Sorda, Lebrija, Santander, Él identifica los minerales terrígenos, minerales diagenéticos, aloquímicos y minerales evidentes de vulcanismo. Y también determina el grado de Cristalinidad de la Illita (ICC) por medio del índice de Kübler, también concluye que hay evidencias que hay un aporte de sedimentos terrígenos, sedimentos volcánicos asociados a pulsos volcánicos y a partir de los resultados del grado cristalinidad para el Miembro Galembó concluye que hay una degradación de las caolinitas, debido a la basicidad de los iones de fosfatos más la temperatura de profundización.

### **3. Marco Conceptual**

#### **3.1. Microscopía Electrónica de Barrido- Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (SEM-EDS).**

En las diversas investigaciones se utiliza la técnica de Microscopía óptica (OM) de luz para determinar, caracterizar litologías, minerales etc. Esta técnica consiste de un sistema simple, en que una fuente de luz atraviese la muestra, como una lámpara de halógeno o en muchos casos Luz emitida por Diodos (LED's) y luego con condensadores densifique el haz de luz, aunque esta

técnica tiene muchas limitaciones una de ellas y quizá la más importante es la pérdida de resolución, con el fin de mejorar esta resolución se mejora esta técnica a la Microscopía Electrónica (EM) en la cual su fuente de iluminación es un haz de electrones muy energético que brinda una resolución teórica alrededor de 0.02 nm, aunque tiene también algunos inconvenientes tales como la aberración de la lente y los límites de resolución. El objetivo principal de esta técnica es alcanzar directamente la resolución de imágenes subatómicas y el análisis elemental. (A.V. Giraño, G. Caputo and M.C. Ferro 2017).

**3.1.1 Scanning Electron Microscopy (SEM).** En la Tabla. 1 se muestra un esquema ilustrativo de las dos técnicas de Microscopía Óptica y Microscopía electrónica de barrido.

En el SEM, un haz de electrones enfocados y altamente energéticos es formado y escanea la muestra en un patrón de exploración ráster y luego hay una interacción entre el haz de electrones emitido y los electrones de la muestra. Una parte del haz de electrones no podrá ser dispersada, aunque la mayor parte de este haz de electrones interactúa con la muestra y sufre dispersiones elásticas (cuando cambia la dirección del electrón primario cambia pero mantiene su energía) e inelásticas (cuando la dirección del electrón primario no cambia pero se disipa la energía que contenía).

Generalmente se presenta efectos secundarios en la interacción entre haz de electrones y la muestra, consiste en que se generan electrones secundarios (se genera cuando el electrón incidente cambia de dirección y a la vez pierde energía) y esta señal es la más utilizada en el SEM.

Los electrones retrodispersados varían directamente con el número atómico del elemento químico presente en la muestra. La imagen se realiza mediante la emisión de electrones

secundarios (topografía) y electrones retrodispersados (número atómico). Las "radiografías analíticas" permiten el análisis cualitativo y cuantitativo de los especímenes.

Así, el SEM proporciona información sobre la topografía, morfología, composición y naturaleza cristalográfica de los especímenes analizados. El Bajo voltaje y la alta intensidad de haz de corriente es necesaria para el análisis EDS y la detección de ciertos elementos son más problemáticos. Además, la combinación de la obtención de imágenes de SEM y el análisis elemental cualitativo / cuantitativo dado por EDS lo convirtieron en una de las herramientas más poderosas en la investigación científica. (A.V. Giraño, G. Caputo and M.C. Ferro 2017)

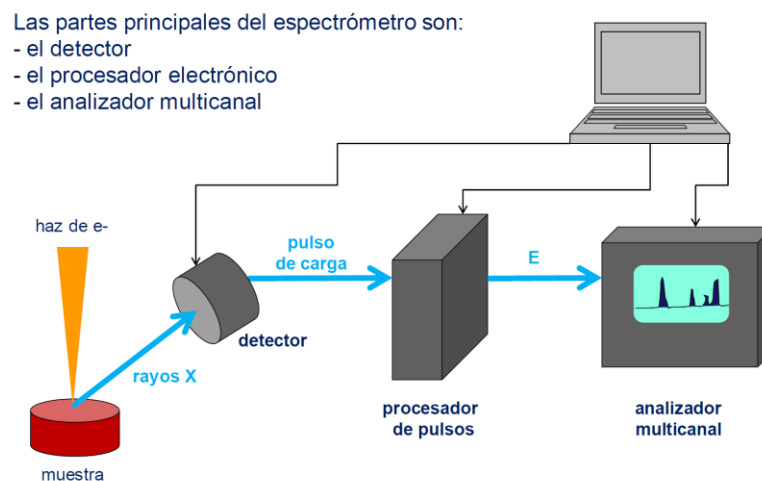
Tabla 1.

*Esquema ilustrativo de los sistemas ópticos: Microscopía Óptica y Microscopía electrónica de barrido.*

<b>Resumen de las diferencias entre Microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido</b>	
<b>Microscopía Óptica</b>	<b>Microscopía electrónica de Barrido</b>
<b>Fuente de Iluminación.</b>	
Rayos de Luz	Rayos de Electrones
<b>Resolución</b>	
entre 0,25 hasta 0,3 $\mu\text{m}$	hasta 0,4 nm
<b>Acercamiento/ profundidad de campo</b>	
500x hasta 1500x	2000000x
Pequeño	Amplio
<b>Material de Lentes/Vacio</b>	
Lente Óptica (No necesita vacío)	Electromagnético y es necesario el vacío
<b>Dimensión de Imagen/colores</b>	
2D/3D	2D/3D
RGB	Escala de Grises
<b>Preparación de Muestra</b>	
Simple	Complejo/ Difícil
<b>Aplicaciones</b>	
Especímenes vivos/muertos	Especímenes Muertos y secados
<b>Costo/Mantenimiento</b>	
Barato/Despreciable	Muy Costoso
<b>Composición Química: Análisis Cualitativo y/o Cuantitativo</b>	
No Disponible	Disponible y preciso (depende de la preparación de la muestra y el equipo de operación)

**3.1.2 Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS).** Los rayos X son fotones altamente energéticos resultantes de la transición electrónica en los átomos de un objetivo en estado sólido por un haz de electrones acelerado incidente en teoría el electrón incidente golpea un átomo de la muestra y golpea hacia afuera un electrón de la muestra de la Capa K  $n=1$  de los metales y esta capa electrónica K queda vacía, si otro electrón ocupa esta capa k vacía luego los Rayos X son emitidos. Este también es llamado transición electrónica y son característicos de para cada elemento químico. Esta es la principal razón que llevó al desarrollo de sistemas de detección de EDS en microscopía electrónica y por lo tanto ampliando su uso en materiales de caracterización microestructural.

Los rayos x son señales analíticas usadas en microscopia electrónica para análisis químicos. Un espectro de rayos X emitido por el espécimen proporciona información tanto cualitativa como cuantitativa, permitiendo identificar qué elementos están presentes en la muestra y la cantidad de cada elemento .Las partes principales del espectrómetro son: (Ver Figura No. 2).



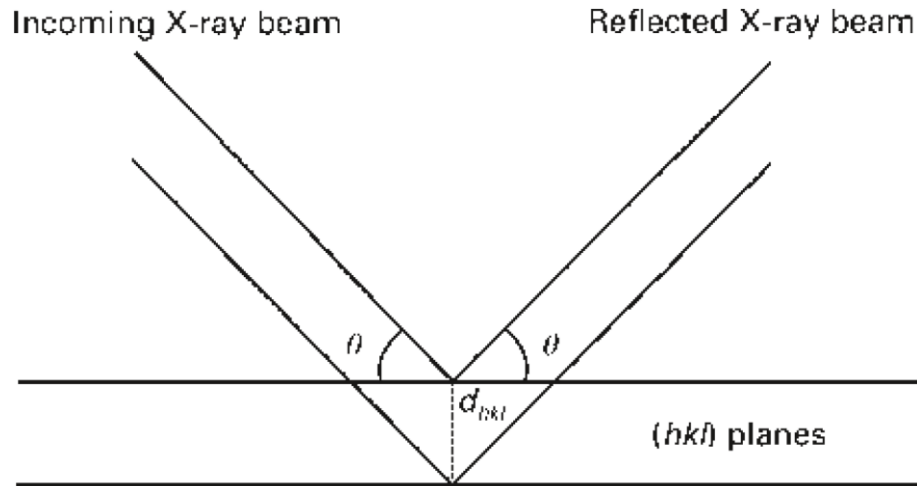
*Figura 2.* Esquema básico de las partes del Espectrómetro.

Descripción. Esquema básico de las partes del Espectrómetro. Tomado de: Servicios Técnicos de Investigación, Universidad de Alicante.

### 3.2 Difracción de Rayos X. (DRX or XRD)

Una de las grandes ventajas de esta técnica es que es un método no destructivo con una penetración de las superficies en la masa de los materiales. Los rayos X son de naturaleza electromagnética y los átomos tienen secciones transversales de absorción moderada para la radiación de rayos X, dando como resultado un intercambio de energía moderado con los materiales estudiados, haciendo la difracción un método no destructivo, en la mayoría de los casos. La colisión entre electrones acelerados genera un espectro de línea superpuesto en un continuo espectro llamado “bremsstrahlung.”

El método de Difracción utiliza la interferencia de la radiación dispersada por átomos en una estructura ordenada y es sin embargo limitada a estudios de materiales con orden de largo plazo. Las interacciones con el haz de rayos x con los electrones del material bajo estudio pueden resultar en absorción y dispersión. La dispersión puede ser pensada como esferas de radiación que emanan de los átomos dispersados. Estas esferas pueden interferir entre ellas que pueden ser constructivas o destructivas y estas producen manchas “Reflexiones Bragg” en ciertas direcciones. (Ver Figura No.3)



*Figura 3.* Esquema Ilustrativo de Ley de Bragg.

Descripción: Esquema básico e ilustrativo de la Ley de Bragg.

La base de todos los estudios de ciencia de materiales que utilizan la difracción de rayos X es la ley de Bragg:

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin(\theta_{hkl})$$

Donde “ $\lambda$ ” es la longitud de onda de la radiación incidente, el ángulo “ $\theta$ ” es el ángulo de dispersión donde ocurre la interferencia positiva, “ $d_{hkl}$ ” es el espaciamiento del plano atómico “ $hkl$ ”. Esta es una fórmula importante que relaciona los cambios observados en los ángulos de dispersión con los cambios estructurales en el material. La figura N. se observa un esquema ilustrativo de la Ley de Bragg.

La profundidad de penetración de la radiación de sondeo es un parámetro importante en diseñar un experimento de difracción. La profundidad de penetración está asociada con la absorción de la radiación, la absorción puede ser calculada con la fórmula.

$$I/I_0 = \exp(-\mu t)$$

Donde  $I_0$  es la intensidad del haz incidente y  $I$  es la intensidad de un haz habiendo pasado por  $t$  (cm) de un material con un coeficiente de absorción de “ $\mu$ ” (cm<sup>-1</sup>). El coeficiente de absorción puede ser calculado como una sumatoria sobre diferentes especies atómicas en unidad de celda.

$$\mu = 1/V_c \sum (\sigma_n)$$

Donde “ $V_c$ ” es el volumen de la celda y “ $\sigma_n$ ” es la sección transversal de absorción del componente  $n$ . Esta sección transversal de absorción varía en función de la longitud de onda y puede ser calculada utilizando la expresión de Victoreen.

$$\mu/\rho = C\lambda^3 - D\lambda^4 + \sigma_{K-N}NZ/A$$

Donde “ $\rho$ ” es la densidad del material, “ $Z$ ” el número atómico y “ $A$ ” el peso atómico. Las “ $C$ ” y “ $D$ ” son constantes y “ $\sigma_{K-N}$ ” varía con la longitud de onda.

Aplicando la técnica SEM-EDS permitirá una caracterización muy detallada y con gran precisión de la composición mineralógica y su morfología. Identificando la fase en que se encuentra los minerales de las muestras, también ayudan a identificar y cuantificar los compuestos cristalinos. Brinda también un análisis físico como el tamaño de estos agregados cristalinos.

Aplicando la técnica DRX ayudará a determinar fases minerales que presentan complejidades y/o son desconocidas, también ayuda a cuantificar estas fases minerales e incluyendo determinar su estructura cristalina, o su grado de cristalinidad en que se encuentra.

Con estas dos técnicas mencionadas brindarán una información mucho más precisa y sutil acerca de la mineralogía y tamaño de los agregados cristalinos del Miembro Galemba de La

Formación La Luna, apoyado también con los datos del grado de cristalinidad de los componentes arcillosos se puede relacionar su mineralogía predominante con su procedencia y brindar una información adicional acerca de su diagénesis.

## 4. Marco teórico.

### 4.1 Petrología de Rocas Carbonatadas.

**4.1.1 Clasificación de Calizas según Folk (1974).** Folk clasifica las rocas carbonatadas por sus constituyentes, la mezclas de material terrígeno, arcillas y tiene uno componentes básicos de estos carbonatos.

- Calcita microcristalina, calcita esparita y aloquímicos.

**4.1.2.1 Calcita Microcristalina.** Está conformado por granos de 1-4  $\mu\text{m}$  de diámetro, usualmente opacos o sub-trasluciente en secciones delgadas. Los carbonatos Pre-pleistoceno son calizas, casi todos convertidos en calcita. Los lodos carbonatados son poligenéticos, puede ser de la precipitación de química inorgánica, en aguas salinas, someras y calientes, puede ser de la desintegración de organismos, principalmente de las algas, también pueden ser lo, que pueden venir de la abrasión de las conchillas, o podría ser de la precipitación por la algas o bacterias.

**4.1.2.2 Calcita Esparita.** Está conformado por cristales de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro y es distinguido de las micritas por su claridad y también por su tamaño de grano el cual puede alcanzar a 1 mm o hasta más. Este tipo de calcita asuele aparecer como cemento y relleno de poros, los poros suelen alinearse primero por las calcitas fibrosas, con un mosaico igual relleno de calcita llenado los poros finales. En los carbonatos antiguos todos los cementos son convertidos a calcita. Algunas esparitas son el resultado de la recristalización de micritas (pseudo-esparitas o micro-esparitas).

**4.1.2.3 Aloquímicos.** Son aquellos componentes formados por precipitación química dentro de la cuenca de precipitación pero casi todos han sufrido un leve transporte o en defecto, no han sido transportados, se incluyen fósiles, pellets etc. Se clasifican en:

**4.1.2.3.1 Intraclastos.** Representa partes pene-contemporáneos, usualmente pobremente sedimentos consolidados que se han roto y re-depositados por corrientes, estos intraclastos pueden tener tamaños de grano arenas, guijarros etc. Ellos indican un desgarramiento del suelo por el incremento de la velocidad de las corrientes.

**4.1.2.3.2 Oolitos:** Tienen un rango de diámetro de 0.1 – 1 mm, se muestran radiales o concéntricos, ellos generalmente forman redondeos de núcleos de fragmentos fósiles, pellets o granos de cuarzo. Ellos forman por las acciones de corrientes continuas de olas.

**4.1.2.3.3 Fósiles:** Son un importante constituyente de muchas calizas, los más comunes son algas, foraminíferos, espículas de esponjas, orales, briozoos, braquiópodos etc.

## 4.1.2.3.4 Pellets:

- Son agregados homogéneos de calcita microcristalina bien redondeada y buena calibración, con un diámetro en promedio de 0.03 hasta 0.2 mm.

**4.1.2 Escala de Tamaños de Granos de Rocas Carbonatadas.** En la tabla planteada por Folk (1974) la subdivide en dos, una que aplica para partículas transportadas (intraclastos, oolitos, fósiles y pellets) para los minerales químicamente precipitados, (incluso como cemento rellena poros), para poder utilizar bien la tabla antes hay que definir qué constituyentes fueron transportados y/o precipitados

Tabla 2.

Escala de tamaño de grano para rocas carbonatadas.

Constituyentes Transportados		Constituyentes Autigenicos	
256 mm	Calcirudita muy Grueso	Cristalino Extremadamente Grueso	256 mm
64 mm	Calcirudita Gruesa		64 mm
16 mm	Calcirudita Media		16 mm
4 mm	Calcirudita Fina	Cristalino muy Grueso	4 mm
1 mm			1 mm
0,5 mm	Calcarenita Gruesa	Cristalino Grueso	0,5 mm
0,25 mm	Calcarenita Media		0,25 mm
0,125 mm	Calcarenita Fina	Cristalino Medio	0,125 mm
0,062 mm	Calcarenita muy Fina		0,062 mm
0,031 mm	Calculutita Gruesa	Cristalino Fino	0,031 mm
0,016 mm	Calculutita Media		0,016 mm
0,008 mm	Calculutita Fina	Cristalino muy Fino	0,008 mm
0,004 mm	Calculutita muy Fina		0,004 mm
0,002 mm		Afanocristalino	0,002 mm
0,001 mm		Criptocristalino	0,001 mm

## 4.2 Mineralogía de Cornelis Klein-Cornelius S. Hurlbut (1996).

En este ítem se muestra los minerales más importantes y los que más predominaron en los resultados.

**4.2.1 Sulfuros.** La fórmula general de los sulfuros viene dada por  $A_mX_n$ , donde A representa los elementos metálicos y X el elemento no metálico, el orden de enumeración de los distintos minerales es el de la proporción decreciente A:X los sulfuros los sulfuros tienen una gran variabilidad de estructuras y no se pueden generalizar a grandes rasgos, Los sulfuros de ZnS tienen por ejemplo dos estructuras polimórficas distintas, la estructura de esfalerita y la estructura de la Wurtzita, los sulfuros más principales se observan en la Figura No. 4 y las predominantes son:

**4.2.1.1 Calcosina.** Su fórmula química general es  $Cu_2S$ , presenta un sistema cristalográfico ortorrómbico, hexagonal, los cristales tienden a ser tabulares de aspecto hexagonal con estrías paralelas al eje más largo. Su composición química es de Cu (79,8 %) y S (20,2%)

**4.2.1.2 Galena.** Su fórmula química es  $SPb$ , presenta un sistema cristalográfico es isométrica, es cubica, y algunas veces octaedro, su composición química es de Pb (86,6%) y S (13,4%), este sulfuro puede tener cantidades mínimas de Zn, Cd, Sb, As y Bi.

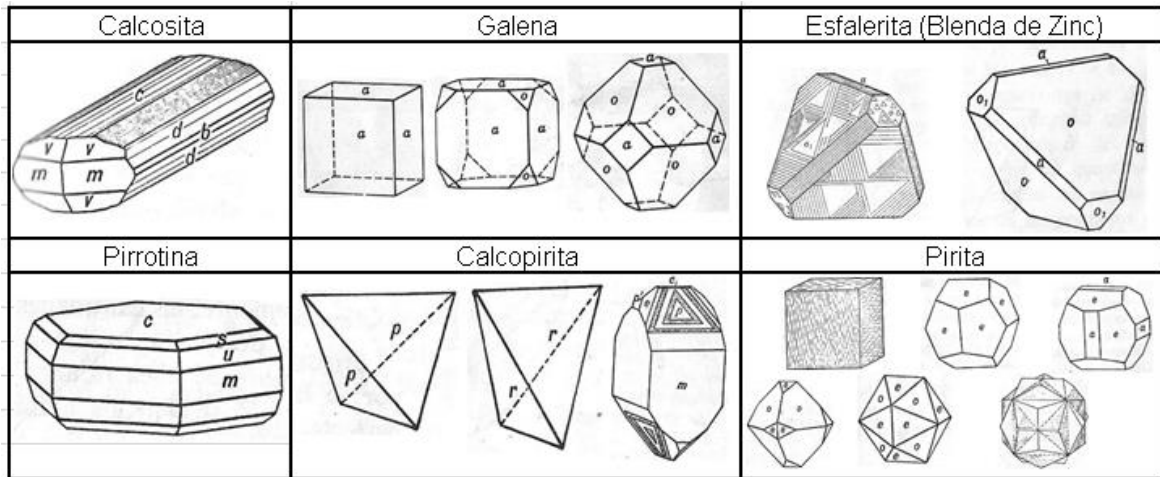
**4.2.1.3 Esfalerita.** Su fórmula química general es  $ZnS$ , también es conocida como blenda de zinc, tiene un sistema cristalográfico, puede presentar formas de tetraedro, dodecaedro y cubo, por lo general son complejos y mal formados o en agregados mal formados, se pueden encontrar en masas exfoliables o granulares. Es compacta, botrioidal, criptocristalina. Su composición química es Zn (67%) y S (33%), si tiene e puede que este asociado con la pirrotina, y si estas crecen juntas, con Fe se puede determinar la temperatura de formación. La esfalerita cubica se asocia a baja temperatura.

**4.2.1.4 Calcopirita.** Su fórmula química general es  $S_2CuFe$ , tiene un sistema cristalográfico cristalografía tetragonal, normalmente tetraédrico, su composición es Cu (34.6%), Fe (30,4%) y S (3,0%).

**4.2.1.5 Pirrotina.** Su fórmula química general es  $Fe_{1-x}S$ , también es conocida como piritas magnéticas, tiene un sistema cristalográfico monoclinico hexagonal, de baja y alta temperatura respectivamente, para los cristales hexagonales tienden a ser tabulares y a veces piramidales, tiene una composición química muy variable y tiene deficiencias de Fe.

**4.2.1.6 Pirita.** Su fórmula química general es  $S_2Fe$ , presenta un sistema cristalográfico isométrica y su forma más habitual es la del cubo con estrías, presenta variaciones de piritoedro, y el octaedro, su composición química es de Fe (46,6%) y S (53,4%) puede tener Ni o Cb.

Figura 4. Hábitos principales de los sulfuros.



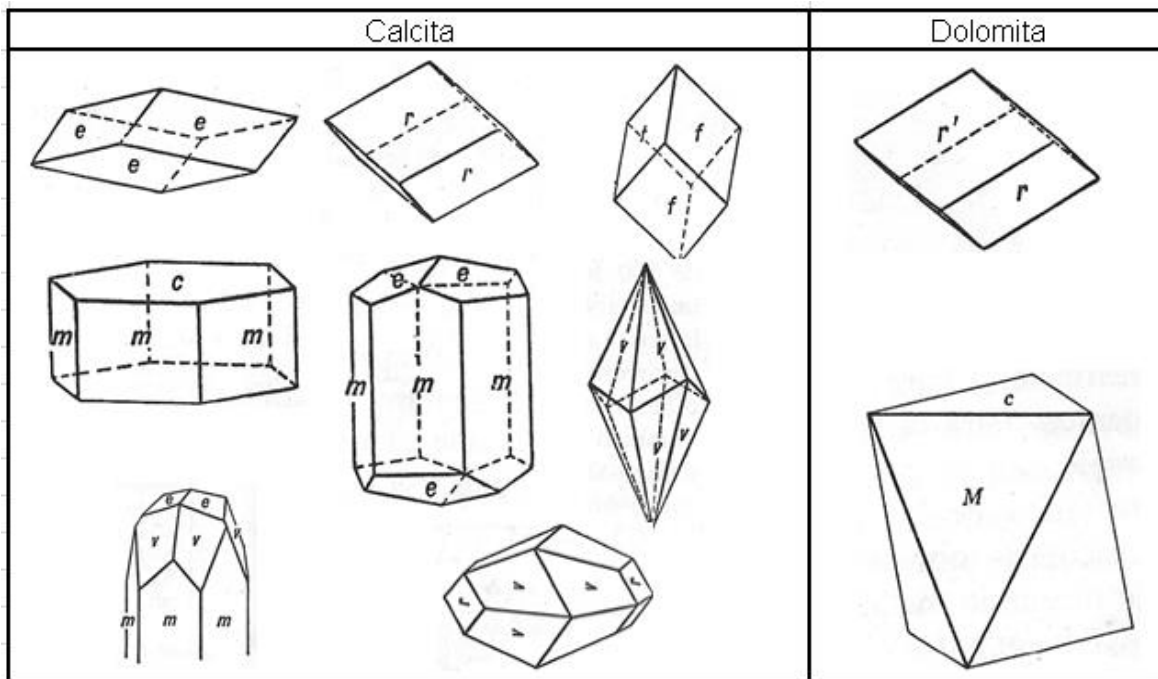
Descripción: Hábitos principales de los sulfuros. Tomado de: Mineralogía de Cornelis Klein-Cornelius S. Hurlbut (1996).

**4.2.2 Carbonatos.** Tiene una composición básica de  $\text{CO}_3$ , y existen grandes variaciones, que radica principales en los elementos metálicos, los carbonatos se subdividen en tres grandes grupos: Grupo de la Calcita (Calcita, dolomita, magnesita, siderita, rodocrosita, smithsonita), Grupo del Aragonito (aragonito, witherita, estroncianita, cerusita.) y carbonatos anhidros (malaquita y azurita).

#### 4.2.2.1 Grupo de la Calcita.

- Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ): su cristalografía es hexagonal y tetraédrica, tiene una gran variedad de hábitos, los más comunes son: prismáticos romboédricos, escalenoédrica, su composición es  $\text{CaO}$  (56%)  $\text{CO}_3$  (44%), algunas veces puede presentar  $\text{Mg}$  o  $\text{FeO}$ . (Ver Figura 5)

- Dolomita  $(\text{CO}_3)_2\text{CaMg}$ : presenta una cristalografía hexagonal y romboédrica, generalmente se presenta como romboedros agudos. Su composición química es  $\text{CaO}$  (30.4%),  $\text{MgO}$  (21.7%),  $\text{CO}_2$  (47.9%).
- Magnesita  $\text{CO}_3\text{Mg}$ : presenta una cristalografía hexagonal y escalenoédrica, rara vez desarrolla cristales, se encuentra generalmente en masas criptocristalina blanca, compacta y terrosa. Presenta similares estructuras de la calcita. Su composición química es  $\text{MgO}$  (47.8%) y  $\text{CO}_2$  (52.2%).



*Figura 5.* Hábitos cristalinos más comunes de las calcitas y dolomitas.

Descripción: Hábitos cristalinos más comunes de las calcitas y dolomitas. Tomado de: Mineralogía de Cornelis Klein-Cornelius S. Hurlbut (1996).

#### 4.2.2.2 Grupo de Aragonito.

- Aragonito ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ): presenta una cristalografía bipiramidal, y sus tres principales hábitos son: piramidal acicular, tabulares, maclas pseudo-hexagonales. Su composición química es  $\text{CaO}$  (56%) y  $\text{CO}_2$  (44%). El aragonito es un polimorfo inestable de la calcita a temperaturas y presiones ordinarias. El aragonito comienza a convertirse a calcita a los  $400^\circ\text{C}$  en presencia de fluidos ricos en  $\text{CaCO}_3$ .

**4.2.3 Sulfatos.** Los sulfatos se dividen en dos grandes grupos de anhídros y básicos. Sulfatos Anhídros: está compuesto por el grupo de la baritina (Baritina, Celestina, Anglesita), glauberita, anhidrita y crocolta y sulfatos básicos: yeso, antlerita, alunita, epsomita, polihalita.

#### 4.2.3.1 Sulfatos Anhídros.

- Grupo de la Baritina (Barita). (Ver Figura No. 6).
  - o Baritina ( $\text{SO}_4\text{Ba}$ ): presenta una cristalografía rómbica, bipiramidal, los hábitos más comunes son tablas paralelas, algunas veces rombos, a veces presenta cristales prismáticos rectangulares, alargados, presenta laminas gruesas, granulares o terrosos. La composición química es  $\text{BaO}$  (67.7%)  $\text{SO}_3$  (34.3%).
  - o Celestina ( $\text{SO}_4\text{Sr}$ ): presenta una cristalografía rómbica, bipiramidal, muy similar a la baritina, los cristales alargados terminan cuatro caras de igual desarrollo. Su composición química es  $\text{SrO}$  (56.4%)  $\text{SO}_3$  (43.6%).

- Anglesita ( $\text{SO}_4\text{Pb}$ ): presenta una cristalografía rómbica y piramidal, tiene hábitos semejantes a la baritina, tienden a ser primáticos. Tiene una composición química de PbO (73.6%) y  $\text{SO}_4$  (26.4%).
- Anhidrita ( $\text{SO}_4\text{Ca}$ ): presenta una cristalografía rómbica, bipiramidal, tienden a ser tabulares, delgados o prismáticos, también puede ser fibroso, granular o maciza. La composición química es CaO (41.2%) y  $\text{SO}_3$  (58.8%), presenta tres exfoliaciones.
- Grupo sulfatos básicas e hidratados. (Ver Figura No. 6).
  - Yeso ( $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ): su sistema cristalográfico es monoclinico y su hábito es prismático, tabulares, puede presentarse como hojoso o masas granulares, la composición química es CaO (32.6%),  $\text{SO}_4$  (46.5%)  $\text{H}_2\text{O}$  (20.9%).

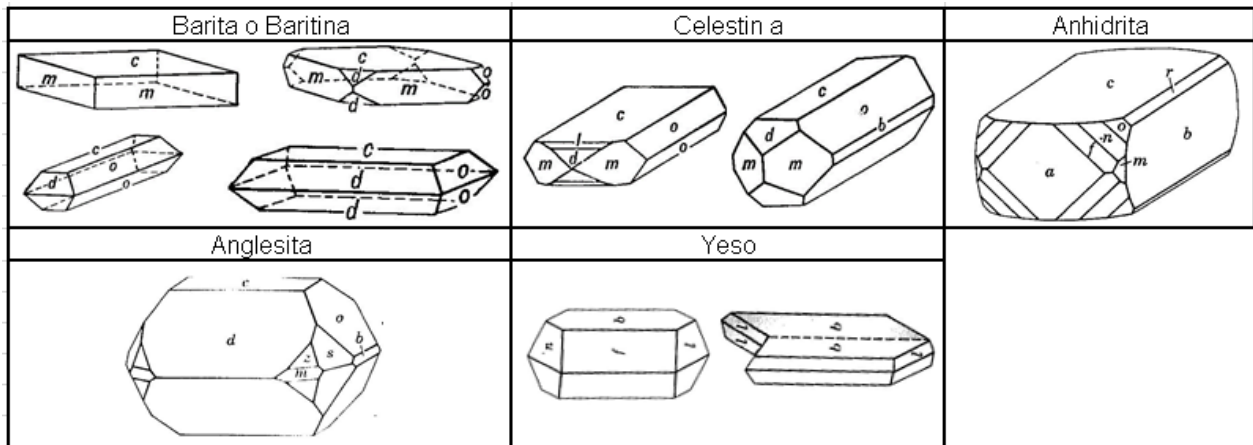


Figura 6. Hábitos cristalinicos del grupo de la baritina y el yeso.

Descripción: Hábitos cristalinicos del grupo de la baritina y el yeso. Tomado de: Mineralogía de Cornelis Klein-Cornelius S. Hurlbut (1996).

**4.2.4 Fosfatos.** El fósforo es el mineral más importante en esta clasificación, los fosfatos tienen fórmula química básica  $PO_4$ , siendo el apatito el más abundante y más importante, el cual en su fórmula química el Ca puede ser reemplazado por los elementos F, Cl, OH. A continuación se mencionaran los fosfatos más sobresalientes.

**4.2.4.1 Apatito.** Su fórmula química general es Apatito  $(PO_4)_3Ca_5$  (F, Cl, OH): su cristalografía es hexagonal, bipiramidal, su hábito tiende a ser prismático o tabular, también se puede encontrar como agregado compacto. Su composición química es muy variable, el cual puede tener contener F (Fluorapatito), Cl (cloroapatito) etc.

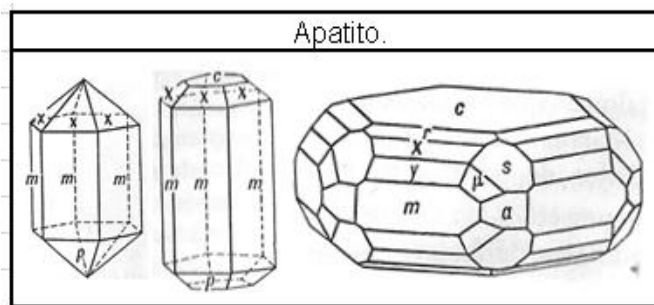


Figura 7. Hábitos cristalinos del apatito.

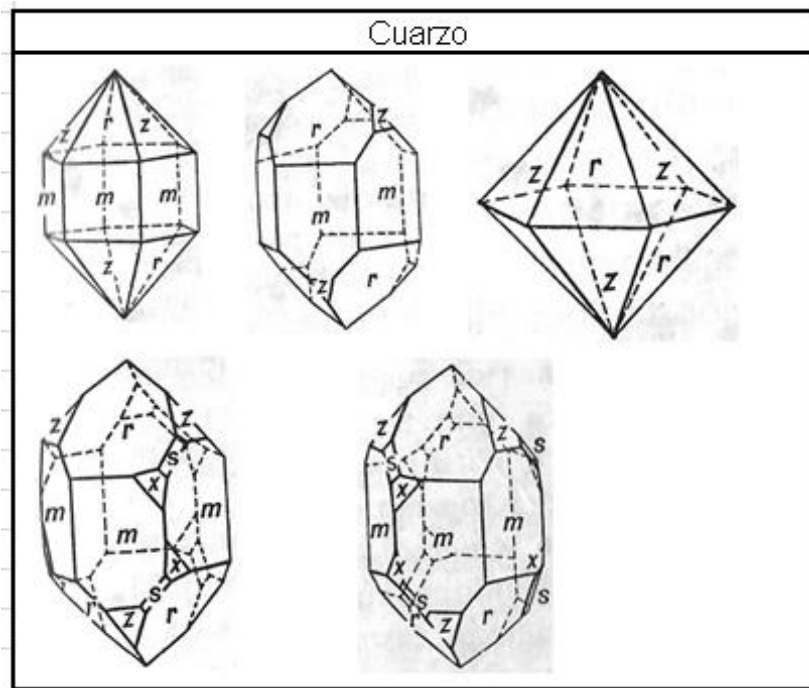
Descripción: Hábitos cristalinos del apatito: Tomado de: Mineralogía de Cornelis Klein-Cornelius S. Hurlbut (1996).

**4.2.5 Silicatos.** Es el grupo de minerales más abundantes en la corteza terrestre, el cual los elementos fundamentales de este grupo son el Si y O. A continuación de los dos grupos más importantes y que se observan en los resultados que son: tectosilicatos y filosilicatos.

#### 4.2.5.1 Tectosilicatos.

- Cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ): presenta una cristalografía hexagonal, trapezoedro-trigonal. Tienden a ser prismáticos, su composición química es Si (46.7%) y O2 (53.3%), el cuarzo presenta muchas morfologías macro-cristalinas, microcristalinas y criptocristalinas, se describirá a continuación los criptocristalinos. (Ver Figura 8) Los cuarzo criptocristalinos pueden ser fibrosos o granulares, a esta escala solo puede ser observado por microscopía de barrido (SEM) y se dividen en:
  - o Variedad Fibrosa: también se conocida como calcedonia, el cual presenta una gran gama de colores, y se encuentran agrupadas las siguientes variedades; cornalina, sardo, crisoprasa y ágatas.
  - o Variedad Granulares: estos se subdividen en Silex, pedernal, jaspe, plamas. Las soluciones que contienen sílice pueden llegar a reemplazar capas de caliza con cuarzo criptocristalino granular y este se llamaría pedernal y se pueden formar al tiempo con las calizas.
- Tridimita ( $\text{SiO}_2$ ): presenta una cristalografía rómbica, pseudo-hexagonal. Una forma de distinguirlo del cuarzo es por medio del índice de refracción.
- Cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ): presenta una cristalografía tetragonal, pseudo-cúbico, su composición es igual a la del cuarzo.
- Ópalo ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ): su cristalografía es amorfa, maciza y algunas veces botrioidal. Tiene la misma composición química del cuarzo pero con adición de moléculas de agua. El ópalo presenta algunas variedades entre las más conocidas está el ópalo común, diatomita, xilópalo

etc. La diatomita se forma por el depósito de los caparzones de sílice de las diatomeas tiene un aspecto similar a la de una creta.



*Figura 8.* Hábito cristalino más común de los cuarzos.

Descripción: Hábito cristalino más común de los cuarzos. Tomado de: Mineralogía de Cornelis Klein-Cornelius S. Hurlbut (1996).

#### **4.2.5.2 Filosilicatos.**

##### - Minerales de Arcilla.

- o Grupo de la Caolinita: está compuesto por una “lamina” de una “hoja” tetraedro de Si y una “hoja” de octaedro de Al combinados para que los oxígenos en el ápice del tetraedro de Si se extienda dentro y sea parte de la “hoja” octaedro, los otros aniones necesarios para completar la coordinación del octaedro del Al en la “hoja” del octaedro

son los OH. La caolinita tiene una gran variabilidad composicional, pero la composición ideal es  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  y su proporción es 46.54%  $\text{SiO}_2$ , 39.5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 13.96%  $\text{H}_2\text{O}$ . Las caolinitas suelen estar acompañadas por  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ , y  $\text{CaO}$ . En este grupo se encuentran: Alofana, imogolita y halloisita.

- Alofano: es descrito como un precipitado de Si-Al- $\text{H}_2\text{O}$  amorfo esponjoso, es descrito como esferas huecas de diámetros de 30-50 Å. En su estructura tiene moléculas de agua que representa un 30-40%.
- Imogolita: es un material paracristalino tabular que suele estar asociado al alofano, tiene una fórmula química general  $(\text{Al}_8\text{O}_4\text{OH}_{20} \cdot 4\text{H}_2\text{O})_2 (\text{Si}_8\text{O}_{10} \cdot \text{OH}_4)$ . Y tiene una gran capacidad de absorber agua hasta 46 g  $\text{H}_2\text{O}/100\text{g}$  de arcilla seca.
- Halloisita: es un mineral cristalino, comúnmente asociado con y derivados de alofanas menos bien cristalizado e imogolita, suelen ser partículas cilíndricas, arrollada, o casi-esférica. La halloisita puede incorporar en su estructura moléculas de agua, siendo la menos hidratada llamada meta-halloisita.
- Illita: el nombre illita fue propuesto por Grim et al (1937) para el tipo de mineral tipo mica de tamaño de arcilla que incurren en sedimentos arcillosos. La estructura de la illita es muy similar a la de la moscovita, una lámina dioctaédrica en medio de dos laminas tetraédricas. Tiene una composición de  $(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})(\text{Si}, \text{Al}) \text{O}_{10}, (\text{OH})_2, \text{K}, \text{Na}, \text{Ca}$ .
- Esmectita: tiene una estructura muy similar a la de la illita, en general sus capas están apiladas de manera aleatoria. En la naturaleza las esmectitas, tiene unos cationes dominantes de  $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Las esmectitas de origen marino tienen iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . En los suelos hay predominio de cationes de  $\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ . Las esmectitas tiene una composición química muy variable. Montmorillonita

$(\text{Na,Ca})_{0.3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$ ; Hectorita  $\text{Na}_{0.3}(\text{Mg,Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F,OH})_2$ ;  
nontronita  $\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_{3+2}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$ .

- Capas Mixtas de Illita y Esmectitas (I/S): capas mixtas o inter-estratificadas son aquellos en el cual cristales individuales están compuestos de capas única básica de dos o más tipos. Es muy probable que la gran mayoría de los minerales filosilicatos están compuestos por capas inter-estratificadas de diferentes composiciones. La única forma de poder identificar este inter-estratificado es por medio de DRX. Los estratificados de I/S contienen menos que 40% a 50% las esmectitas son casi estratificados aleatorios. La proporción de capas de illita aumenta la proporción I/S aumenta. Estas capas mixtas es muy común encontrarlas y son formadas durante la diagénesis de enterramiento, cuando la montmorillonita es convertida en illita a medida que la temperatura aumente.

#### **4.3 Matriz y Granos (Basado en Flügel (2010)).**

Generalmente se ha utilizado muchos términos para definir y describir las rocas carbonatadas, el cual se utilizan tales como “granos”, “groundmass” y posteriormente matriz, calcita esparita o micrita y estos son descritos generalmente por medio de la microscopía óptica, pero a partir del SEM se puede definir de forma más arbitraria límites de tamaño de partículas entre matriz y granos. Flügel (2010) hace una síntesis de los diversos términos utilizados para describir las rocas carbonatadas enfatizándose en las micritas que están compuestas por cristales criptocristalinos o microcristalinos. También Flügel (2010) crea un criterio para descripciones en SEM para las calizas de grano fino a micro-cristalino basado en también en trabajos previos de diversos autores que se muestra a continuación.

### 4.3.1 Microfábrica.

**4.3.1.1 Tamaño de Grano.** Se hace un conteo de los diámetros de las partículas entre 100 a 200 granos, y poder dar un concepto a cerca de su calibración de las micritas, como se encuentra relacionado el espacio y crecimiento de grano, mirar el predominio que existen entre calcita y aragonito.

**4.3.1.2 Contactos de Grano.** Por medio del SEM observar si los contactos son rectos, curvilíneos o cerrados.

**4.3.1.3 Forma del Grano.** Diferenciar el tipo de grano como anhedral, subhedral o euhedral. Observar cómo se encuentran dispuestas las micritas si son granos entrelazados si presenta forma de “mosaico ameboideo”, o si presenta granos en forma de bloques parecido a un “mosaico pavimento” comunes en las calizas afectadas por tensiones termales.

**4.3.1.4 Inclusiones de cristales.** Si hay inclusiones de fluidos en los cristales que son comunes en los cristales microesparíticos.

**4.3.1.5 Microfenestra.** Son algunas calcitas que presentan vacíos redondos, de 40 a 80  $\mu\text{m}$  en tamaño, el cual es llenado por calcita en bloques.

**4.3.1.6 Límites entre la matriz de calcita y los fósiles.** Se pueden diferenciar las distintas etapas diagenéticas por las diferencias de los límites entre matriz y fósiles:

- Límites agudos entre matriz y fósiles de calcita pobre en Mg.
- Límites moderadamente agudos entre la matriz y el fósil.
- Límites entre matriz y fósiles difíciles de diferenciar.

**4.3.1.7 Microporosidad.** La microporosidad puede tener un rango de 5-10  $\mu\text{m}$ . En calizas micríticas, estas microporosidades pueden ser primarias, por disolución, por micro-moldes etc.

**4.3.2 Granos Esquelatales.** Con el SEM se puede describir y reconocer a los diferentes nano-fósiles plantónicos en lodolitas y wackestones, bioclastos de tamaño tipo arcillas etc.

#### **4.3.3 Clasificación de tamaños de partículas de las calcitas según Flügel (2010).**

**4.3.3.1 Micrita.** Se caracteriza por una textura cristalina de tamaño cripto- a microcristalino, con un límite de  $<4 \mu\text{m}$  (Folk 1959). También propone cuáles pueden ser los modos de formación de las micritas, (ver Tabla No.3) y el cual se pueden identificar por las texturas que presentan estas micritas.

Tabla 3.

*Terminología y modos genéticos de origen lodos carbonatados y calizas compuestas por calcita microcristalino y criptocristalino (micritas).*

		Origen	Observaciones
Automicrita	abiogenico	Precipitación físico-químico provocado por la salinidad y fluctuaciones de la temperatura del agua	Se observan por SEM "agujas" de aragonitos
Automicrita	Biologicamente inducido	Precipitación de los carbonatos medido por las matrices orgánicas, causando organomineralización y formación de "organomicrita"	Se observa a través de la microscopía fluorescente y cromatografía
		Procesos metabólicos de bacterias heterótrofas causando cambios en la precipitación inducida	Se encuentran estructuras llamadas "mud mound" compuestas por micritas
	biologicamente controlado	Procesos metabólicos de cianobacterias y algas causando la precipitación de carbonatos	Desarrollan mini-micritas de diámetros < 2µm y genera textura pelmicrita
Alomicritas	Desintegración de biota bentónica predominantemente	Desintegración de algas bentónicas calcáreas en fragmentos sub-microscópicos	En SEM presenta estructuras de "agujas" de aragonito mezclados y poco desarrollados.
		Desintegración de "epibiontes" que viven en pastos marinos y macroalgas	lentes de carbonato encerradas dentro de shales
		Desintegración de los invertebrados	Conchillas de invertebrados desarticulados
		Bioerosión que causa abrasión detrítica y microcorrientes que causan 'micritización'	Las perforaciones de bacterias y hongos tienen diámetros <4 µm, a menudo 1-2 µm.
	Desintegración de Biota pelágica	Acumulación de organismos planctónicos calcáreos	Presencia de nanofosiles y cocolitos
	Erosión y abrasión	Erosión mecánica de las calizas	Carbonatos de grano fino, mal calibrado con tamaños de partícula <2.4 µm
Pseudo-micrita; Micrita Diagenética	diagénesis	cementos de carbonatos micro- y criptocristalino	En las etapas tempranas de la diagénesis se presenta disolución de grano y posteriormente recristalización.
		Recristalización y "disolución de grano" (reemplazo y generación de cristales más grandes)	

Descripción: Terminología y modos genéticos de origen lodos carbonatados y calizas compuestas por calcita microcristalino y criptocristalino (micritas). Tomado de: Flügel (2010).

**4.3.3.2 Microsparita.** Se caracteriza por una matriz de calcita de grano fino con un rango de diámetro de 5-30 µm, pero predomina entre 5-7 µm. Otros criterios son una microtextura en forma de mosaico, formas de grano equidistantes y límites, fisuras en los cristales (disolución de cristales). Es definida como una caliza de matriz de grano fino se desarrolla como Microsparita.

Se tiene varias explicaciones:

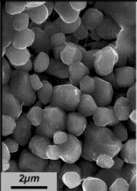
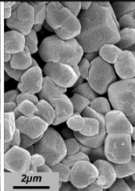
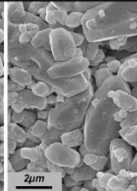
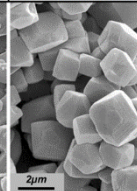
- Recristalización (Neomorfismos).

- Un paso del proceso neofórmico de la cementación y reemplazamiento de un dominio precursor de aragonitos a microesparita sin la etapa de la micrita.
- Crecimiento neofórmico: los fluidos superficiales profundos demostraron que la saturación con respecto a la calcita parece ser el único requisito para la formación del microesparita.
- Recristalización de granos de carbonatos tamaño limo.

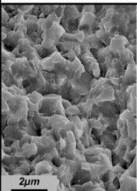
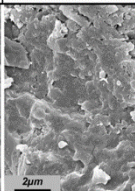
**4.3.3.3 Limo de calcita “Calcsiltite”.** Es caracterizado por una matriz fina compuesta por partículas de calcita de tamaño tipo limo. Su rango es de 2-67  $\mu\text{m}$ .

#### **4.4 Clasificación de micro-texturas y morfologías de micritas según Deville de Periere et al (2011).**

Periere et al. (2011) propone una clasificación basada en la morfología de la matriz de la micrita, el cual los clasifican 6 tipos. Toma como base las clasificaciones de Lambert et al. (2006), Loreau, (1972), Moshier (1989), Budd (1989) entre los más importantes. Esta clasificación tiene en cuenta tamaño de cristales, forma de los cristales, tipo de contactos entre ellos: (Ver Figura 9)

Porous Micrites				
	Rounded	Subrounded	Scaleno-Rhomboedral	Micro-rhombic / Polyhedral
S.E.M.				
Crystal shape	Anhedral / Subhedral / Roundness	Subhedral	Scaleno-hedral / Scaleno-rhombic	Euhedral / Rhombic
Inter-Crystalline Contacts	Punctic / Partially coalescent			

Tight Micrites		
	Anhedral compact	Fused
S.E.M.		
Crystal shape	Subhedral / Anhedral	Anhedral
Inter-Crystalline Contacts	Fully coalescent but distinct	Fused - Mostly indistinct

*Figura 9.* Clasificación de microtexturas micríticas.

Descripción: Clasificación de microtexturas micríticas. Tomado de: M. Deville de Periere et al 2011.

- Las micritas redondeadas con forma de cristal anhedral a subhedral, con bordes lisos y convexos (no planos), los contactos entre los cristales son puntuales y parcialmente coalescentes.
- Las micritas subredondeadas con forma de cristal sub-hedral a anhedral. Los bordes son agudos a suaves y las caras son planas a ligeramente convexas, los contactos entre ellos son puntuales y/o parcialmente coalescentes.
- Son principalmente micritas escaleno-romboédricas con cristales, presenta bordes agudos, los contactos entre ellos son coalescentes a puntuales.

- Las micritas son microrómbicos a polihedrales, con bordes agudos y caras planas, los contactos pueden ser puntuales a coalescentes.
- Compuesto por micritas compactas, con forma de cristales anhedrales a polihedrales, con contactos entre ellos completamente coalescentes.
- Micritas fusionadas está compuesto por cristales anhedrales coalescentes, el cual no se puede observar los contactos inter-cristalino y presenta muy poca a casi nula porosidad. Las rocas con estas características aparentan macroscópicamente homogénea y posiblemente con fracturas concoidales.

#### **4.5 Índice de “cristalinidad” de la Illita.**

El índice de Cristalinidad fue dado por primera vez por Kübler en (1967) que hace mediciones la longitud de espesor de la altura media del pico (001) de la illita en los difractogramas de los análisis DRX, y definió por primera vez con el término de “cristalinidad” como el grado de ordenamiento en una red cristalina que influye la forma de reflexión del DRX, pero no especifica qué tipo de ordenamiento está envuelto. Con este “cristalinidad” se podría saber en qué estado de diagénesis y/o en qué grado de metamorfismo bajo ha sufrido la roca.

Posteriormente varios investigadores fueron publicando sus resultados a partir de la “cristalinidad” de la illita, clorita, caolinita y pirofilita, entre los más sobresalientes se encuentran Frey, (1987), Klug & Alexander, 1974).

El mayor inconveniente ha sido el conjunto de variaciones analíticas que existen entre los laboratorios y por ello no se podría hacer comparaciones eficientes de los resultados obtenidos por diversos investigadores. A partir de las discordancias en los resultados de la “cristalinidad”

de la illita, se opta por estandarizar los datos de la “cristalinidad” de la illita, Warr & Rice, (1994) presenta un enfoque de calibración para la estandarización de datos de minerales arcillosos, y propone un estándar de índice de cristalinidad el cual es consistente con las recomendaciones dadas por el grupo de IGCP 294 IC. Las recomendaciones de Warr & Rice, (1994) son:

- Estándar de Preparación de muestras: las muestras son trituradas y luego son lavadas para poder remover las partículas en suspensión. La separación de partículas se logra por medio de la centrifugación y se miden el tamaño de las partículas por medio de fotesedimentómetro y se logra separar las partículas de tamaño arcillas ( $< 2\mu\text{m}$ ) y luego la fracción de arcillas es separa por medio de decantación y luego fueron sedimentados en un porta objetos de vidrio.
- Condiciones de Equipos y procedimiento de medidas: las medidas fueron hechas por difractometro Siemens D5000 a 40 kV y a 30 mA  $\text{CuK}\alpha$ , la apertura de todos los diafragmas es de  $1^\circ$ , el detector de Diafragmas a  $0.05^\circ$ , monocromador de grafito, y el tiempo con una constante de 1s. Ambas de las preparaciones de preparaciones secadas al aire y glicoladas fueron escaneadas de  $2^\circ$  a  $50^\circ 2\theta$  y la tasa de escaneo fue de  $0.6^\circ 2\theta/\text{min}$  y un ancho de paso de  $0.01^\circ$ . la “cristalinidad” fue medida por el FWHM (Ancho máximo de la media altura “full-width-half-maximum”).

## 5. Metodología

### 5.1 Recopilación de Información y Selección de Muestras.

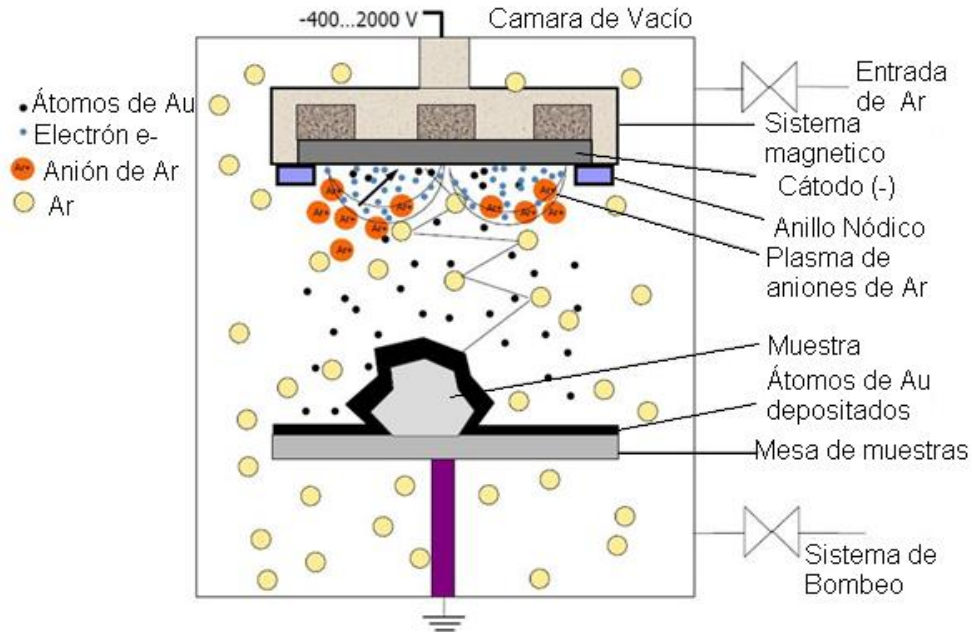
Esta etapa se recopila toda la información disponible en artículos publicados en revistas científicas tales como; South American Earth Sciences, Boletín de Geología UIS, Organic Geochemistry, Marine and Petroleum Geology, AAPG Journals (The American Association of Petroleum Geologists) entre otras, también se recolecta información a partir de bases de datos de: Science Direct, ResearchGate, Springer, también se toma como referencia tesis de pregrado y de maestrías de las universidades UIS y Nacional, y se obtiene información de libros y atlas petrológicos en SEM, memorias explicativas de mapas geológicos de la zona de estudio.

Las muestras fueron recolectadas previamente por Msc. Efraín Casadiego, cuales fueron utilizadas para su tesis de Maestría. Estas muestras fueron inicialmente seleccionadas en base a las litologías más sobresalientes de la columna estratigráfica realizada previamente por Msc. Efraín Casadiego en la Q. Aguablanca (VMM). Se seleccionaron 12 muestras para analizarlas por medio de SEM-EDS y se seleccionaron 4 muestras para analizar por medio de DRX.

## 5.2 Preparación de Muestras y Fase de laboratorio.

**5.2.1 Preparación de Muestra para SEM.** Una vez seleccionadas las muestras se procede luego a fracturarla por medio de martillo y cincel hasta lograr que los fragmentos que se van a analizar tenga un diámetro aproximado de 1 cm. Luego el fragmento que se va analizar se pone sobre el porta-muestras. Se tiene en cuenta que la superficie interna o “fresca” del fragmento de roca sea la superficie que el equipo va analizar, luego la muestra se adhiere al porta-muestras por medio de cinta de carbono o de otro material que sea conductor. A continuación se recubre la superficie que se va analizar con una capa de Au o de carbono.

- Recubrimiento de Au: para lograr este recubrimiento se logra por medio del proceso llamado “Sputtering” que consta de generar un plasma de aniones de Ar, con el fin de producir un potencial entre las muestras (ánodo) y el cátodo (carga negativa). Los iones de la muestra chocan contra el cátodo negativo y van quitando los átomos de Au de este. Y estos átomos de Au van “cayendo” sobre la superficie de la muestra durante este proceso la cámara debe tener una presión de  $1 \times 10^{-1}$  mbar. En la Figura 10 se observa el principio básico en que se basa el recubrimiento de Au.



*Figura 10.* Esquema básico del recubrimiento por medio de “Sputtering”.

Descripción: Esquema básico del recubrimiento por medio de “Sputtering”. Modificado y Tomado de: <http://clipground.com/image-post/60927-sputtering-clipart-19.jpg.html>

- Se ponen las muestras que se van a recubrir en la cámara donde se realizara el vacío.
- Una vez encendido el equipo “Sputter Coater” es llevado al vacío abriendo las llaves de la bomba y la cámara para iniciar el proceso del vacío.
- Se le va inyecta Ar por medio de la botella que se encuentra conectada a la cámara periódicamente para lograr un mejor vacío en la cámara y también alternadamente se va abriendo la llave de la ventana hasta conseguir un vacío de  $2 \cdot 10^{-2}$  mbar.
- Se configura el equipo para que el recubrimiento sea de 3 a 5 minutos.
- Se inicia el proceso de recubrimiento durante el tiempo estipulado en el tiempo anterior.
- Una vez terminado el tiempo de recubrimiento se procede a desconectar el equipo.
- Finalmente se abre la llave de la ventana para quitar el vacío y se cierra la llave de Ar.

Finalmente se ingresan las muestras previamente preparadas al equipo y posteriormente este genera el vacío en el interior del mismo.

**5.2.2 Preparación de muestras para análisis en DRX.** Implementos utilizados: mortero de ágata, molino de mortero, vaso de precipitado de 100 mL, 40 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Peróxido de Hidrógeno) al 10% de concentración, agua destilada, tubos de ensayo con tapa, balanza, centrifuga, recipientes de 500 mL, embudo, tamiz 270, porta-objetos, mufla, etilenglicol.

Inicialmente se separa la muestra inicial en dos partes, la primera es para hacer el análisis de minerales arcillosos y el segundo es para realizar el bulk mineralógico, la separación de la muestra inicial corresponde aproximadamente a un 80% y 20% respectivamente.

Para la preparación de la muestra para el bulk mineralógico, se disgrega por medio del macerador de ágata y posteriormente para homogenizar el tamaño de partícula la muestra se pasa por el molino de mortero por 3 minutos hasta lograr unos tamaños de partícula deseada y se separa.

Preparación de muestra para determinar minerales arcillosos.

La muestra se disgrega inicialmente con el macerador de ágata y posteriormente se homogeniza la muestra triturada en el molino de mortero por 3 minutos, posteriormente la muestra se pone en un vaso de precipitado de 100 mL, y se pone en solución agregando 40 mL aproximado de Peróxido de Hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) al 10% de concentración para eliminar la cementación de carbonatos de la muestra y también la materia orgánica, se deja en disolución por lo menos 12 horas.

Una vez ya eliminada la materia orgánica y cementantes de cada muestra, las muestras diluidas se traspasan a los tubos de ensayo con tapa correspondientes, luego para cada par de tubos de ensayo con tapa se nivelan o balancean por medio de la balanza.

Una vez ya nivelado los pares de tubos de ensayo con tapa son llevados a centrifugar por primera vez para separar los reactivos de cada muestra, en la centrífuga el cual se configura a 300 rpm por 10 minutos. Una vez terminado de centrifugar se puede separar la fase líquida de la solución dejando solamente la muestra precipitada y parte de la muestra en suspensión.

La muestra posteriormente es pasada a través de un tamiz 270 el cual ayuda a separar las partículas superiores a diámetros de 53  $\mu\text{m}$  de la muestra, con el fin de obtener solo las partículas de tamaño limo y arcillas, luego este precipitado se pone en solución en agua destilada en frascos de 500 mL. (Agua destilada + muestra tamizada).

Luego, se toman cada par de frascos para nivelarlos con la balanza y posteriormente se ponen en la centrífuga que se configura a 500 rpm por 10 minutos, para lograr separar la fracción tamaño arcilla en suspensión y la fracción tamaño limo que precipita en el vaso. Luego se separa la fracción de tamaños arcilla que se encuentra en suspensión en el agua destilada y el precipitado de tamaño limo.

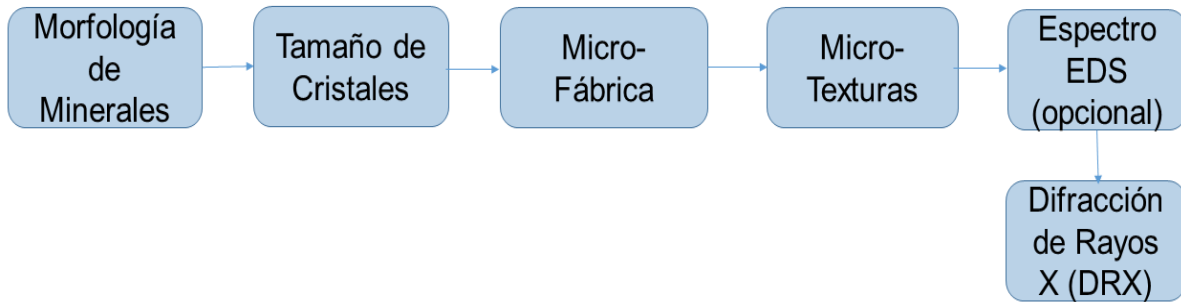
Una vez obtenida la fracción tamaño arcilla en suspensión se envasa en otro recipiente de 500 mL y luego se balancea con otro recipiente de igual capacidad, para luego ponerlo en la centrífuga con una configuración de 300 rpm por 10 minutos, luego se deja decantar las arcillas por al menos 12 horas y finalmente se separa el solvente (agua destilada) dejando en el fondo el precipitado las partículas tamaño arcilla.

Posteriormente este precipitado es puesto sobre 3 porta-objetos, el cual la primero es para someterlo a 40° a 60°C, el segundo es para ponerlo en un atmosfera de etilenglicol y el tercero es para someterlo a una temperatura de 300° hasta 500°C.

### **5.3 Interpretación de Datos y Elaboración de Informe Final.**

Los análisis e interpretación de los datos obtenidos están basados bajo los criterios de; la morfología de los minerales, forma de los cristales, micro-fábrica, micro-texturas y el espectro EDS y análisis DRX.

Para la morfología de los minerales se toma como referencia las descripciones realizadas por Folk (1974), Cornelis Klein-Cornelios S. Hurbut (1996), también se toma en cuenta las descripciones realizadas por. Welton, J. (1984), para el caso de las micritas se toma en cuenta las clasificaciones dadas por Periere et al. (2011), para la clasificación de los tamaños de cristales o de partículas se toma en cuenta las clasificaciones y definiciones dadas por Folk (1974), Periere et al. (2011), Flügel (2010). Para las descripciones de las fábricas y texturas se tiene en cuenta las definiciones y descripciones dadas por Folk (1974), Periere et al. (2011), Flügel (2010) estos dos últimos autores brindan una clasificación más detallada para las rocas carbonatadas. Para las descripciones a partir de los espectros EDS se toma en cuenta las descripciones y clasificaciones dadas por Cornelis Klein-Cornelios S. Hurbut (1996) y Welton J. (1984) y para los datos obtenidos a partir de los análisis de DRX, se toma en cuenta las bases de datos del software Diffrac.Eva. En la Figura 11 se observa los criterios en las que se basaron las descripciones.



*Figura 11.* Criterios en que se basan las descripciones.

Descripción: se observa la secuencia de los criterios bajo el cual se basan las descripciones de las muestras, se tiene en cuenta que para la técnica de difracción de rayos X (DRX) se aplica para las muestras que contienen un predominio de minerales arcillosos.

Finalmente se organiza y se estructura la información recolectada, los procedimientos realizados y los resultados obtenidos de los diversos análisis hechos para y posteriormente se hace la informe final en base a las normas y especificaciones de la entrega del trabajo de grado.

## 6. Resultados.

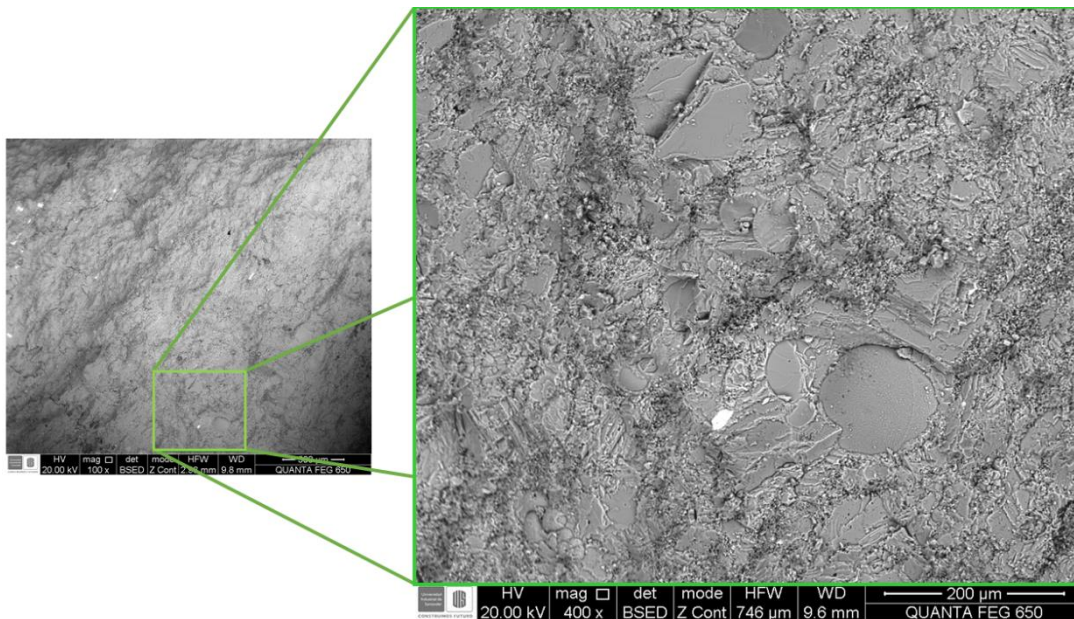
### 6.1 Análisis de SEM-EDS

A partir de las muestras tomadas y las columnas estratigráficas levantadas por Efraín Casadiego en su tesis de maestría, se realizará una descripción y análisis mineralógico por medio de la técnica de SEM/EDS y también ocasionalmente utilizando la técnica de DRX. En la columna Estratigráfica levantada en la Q. Aguablanca (VMM) (Ver Anexo A) se observa las muestras

recolectadas de cada una de las litofacies. A continuación, se realizará el análisis mineralógico de cada uno de los litofacies presentes.

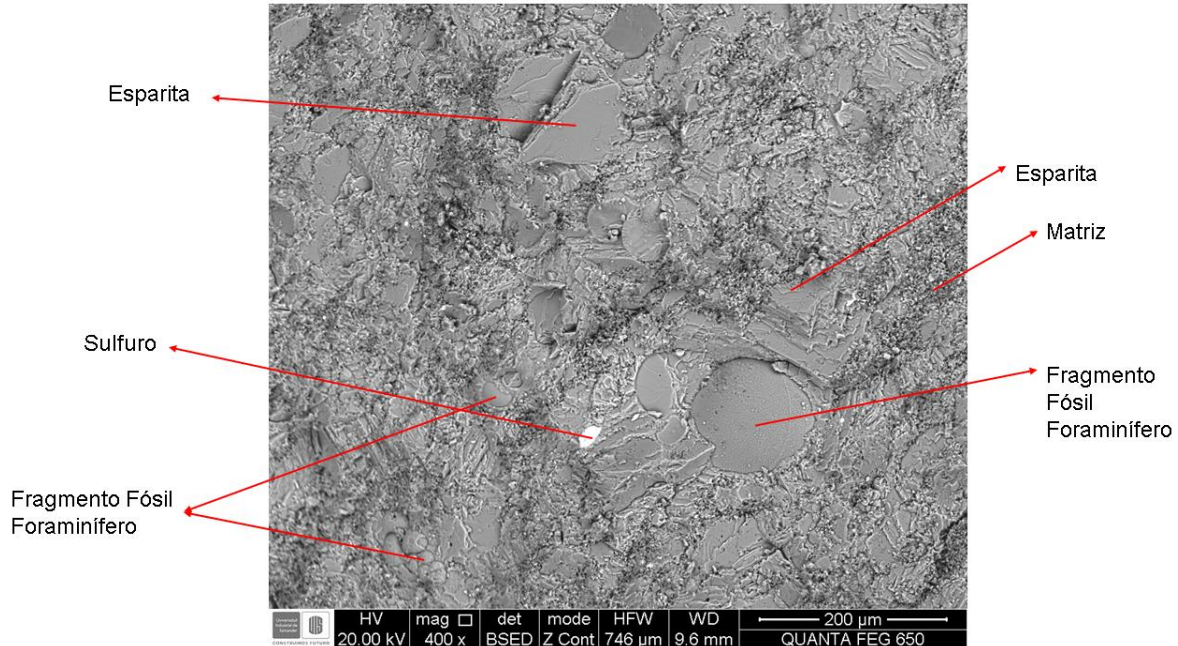
**6.1.1 Wackestone.** Este litofacie se caracteriza por presentar minerales con gran contenido de carbonatos, bajo contenido de foraminíferos, el cuarzo detrítico y cuarzo micro-cristalino y presenta eventualmente contenido de sulfuros. En la Figura 12 se muestra una microfotografía de la muestra con su respectivo acercamiento para un mayor de detalle.

En el acercamiento (Ver Figura 13) se puede observar una gran variedad de morfologías de los minerales, el cual se describe y se analiza cada uno por separado. Se observa rasgos generales minerales carbonatados, (esparitas, micritas y conchillas de fósiles foraminíferos). También se observa una matriz (micritas, fosfatos, sulfuros, cuarzo micro-cristalino y minerales arcillosos)



*Figura 12.* Acercamiento de la microfotografía de la muestra wackestone.

Descripción: en el acercamiento se observa las morfologías distintivas de cada mineral que compone a esta litología



*Figura 13.* Rasgos generales de la litofacie wackestone.

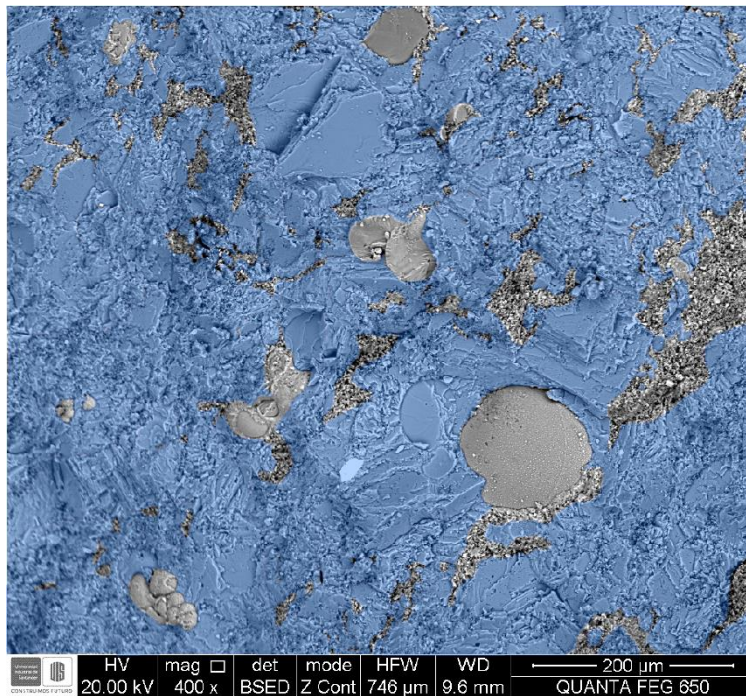
Descripción: se observa la composición más predominante en la muestra. Esparitas, matriz (micrita, minerales arcillosos, cuarzo microcristalino, apatitos), sulfuros y fragmentos fósiles recristalizados.

### **Esparita.**

Se presentan unos cristales subhedrales a anhedrales, sus diámetros varían de 10 a 20 µm, presenta unos cristales de forma de pseudo-rómbicos, y ocasionalmente presenta unas morfologías cóncavas. Generalmente presenta unos bordes irregulares y difusos. Ocasionalmente presenta unos bordes angulares (tiende a ser romboédrica). En la Figura 14 se observa sombreada de azul creta los cristales de esparitas. Bajo la clasificación de Folk (1974) es llamada esparita y bajo la clasificación de Flügel (2010) se denomina microesparita. Usualmente las esparitas están bordeadas por la matriz, el cual se encuentra generalmente junto a las aristas del cristal. En la Figura 15 se observa un acercamiento de un cristal de una micrita apretada fusionada. Y en la Figura 16 se muestra el espectro de EDS de un cristal de Micrita Apretada.

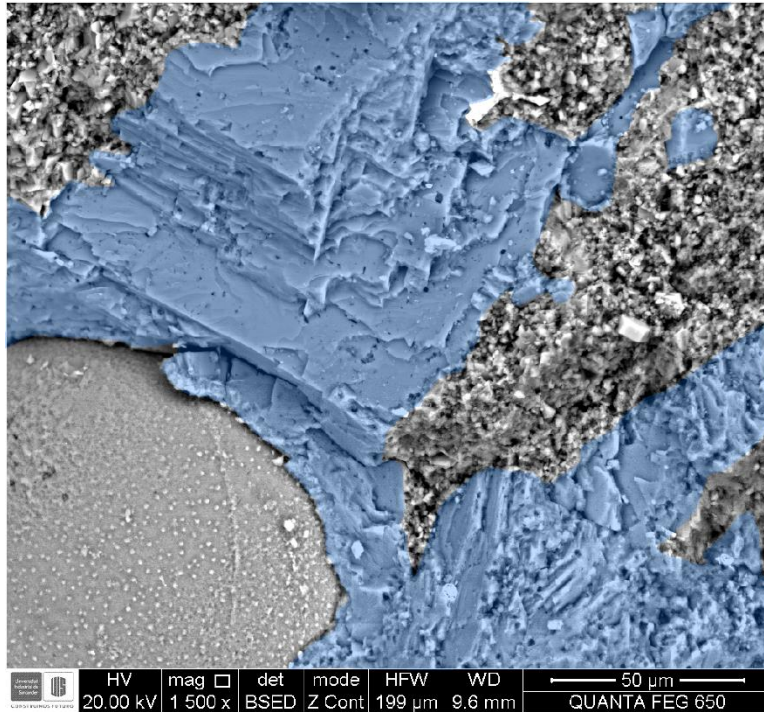
En la Figura 15. Se puede observar un acercamiento de la figura anterior en el que se encuentra un cristal de esparita (Color azul Creta), con una forma de cristal subhedral que se encuentra bordeado por la matriz (micrita, apatitos, cuarzo micro-cristalino) y también en la parte inferior izquierda de micro-fotografía un fragmento de conchilla de un fósil, el cual es muy semejante a una cámara de foraminífero y tiene un diámetro aproximado de 120  $\mu\text{m}$ .

En la Figura 16 se muestra el espectro EDS de una Micrita apretada, y presenta una composición predominante de Ca sobre los demás elementos, las alturas relativas de los picos de los elementos de Si, Al y Mg son iguales. La composición de estos cristales va acorde con la composición química general de los carbonatos



*Figura 14.* Vista general de las esparitas. (Wackestones).

Descripción: se observa las esparitas que son predominantes en toda la muestra y generalmente estas se encuentran bordeadas por la matriz.



*Figura 15.* Acercamiento a un cristal de esparita. (wackestone).

Descripción: Se observa el cristal de esparita, bordeado por la matriz y en la parte inferior izquierda la imagen se observa un fragmento de fósil asociado a una cámara de un foraminífero.

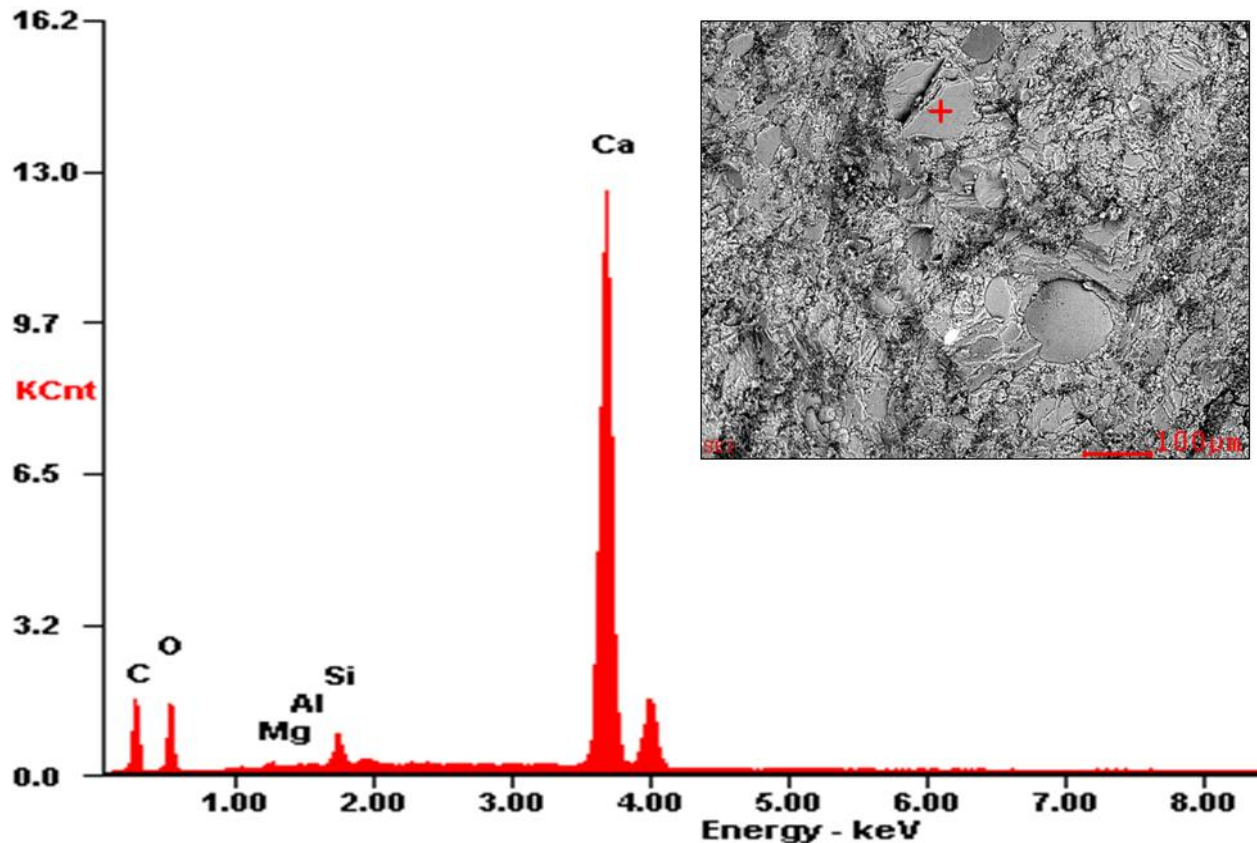


Figura 16. Espectro EDS de un cristal de esparita (wackestone).

Descripción: Se puede observar que el elemento predominante es el Calcio, y en menor proporción se encuentra el Carbono, Oxígeno, Magnesio, Aluminio y Sílice. El contenido de sílice puede ser debido a los cuarzos microcristalino que bordea el cristal de esparita.

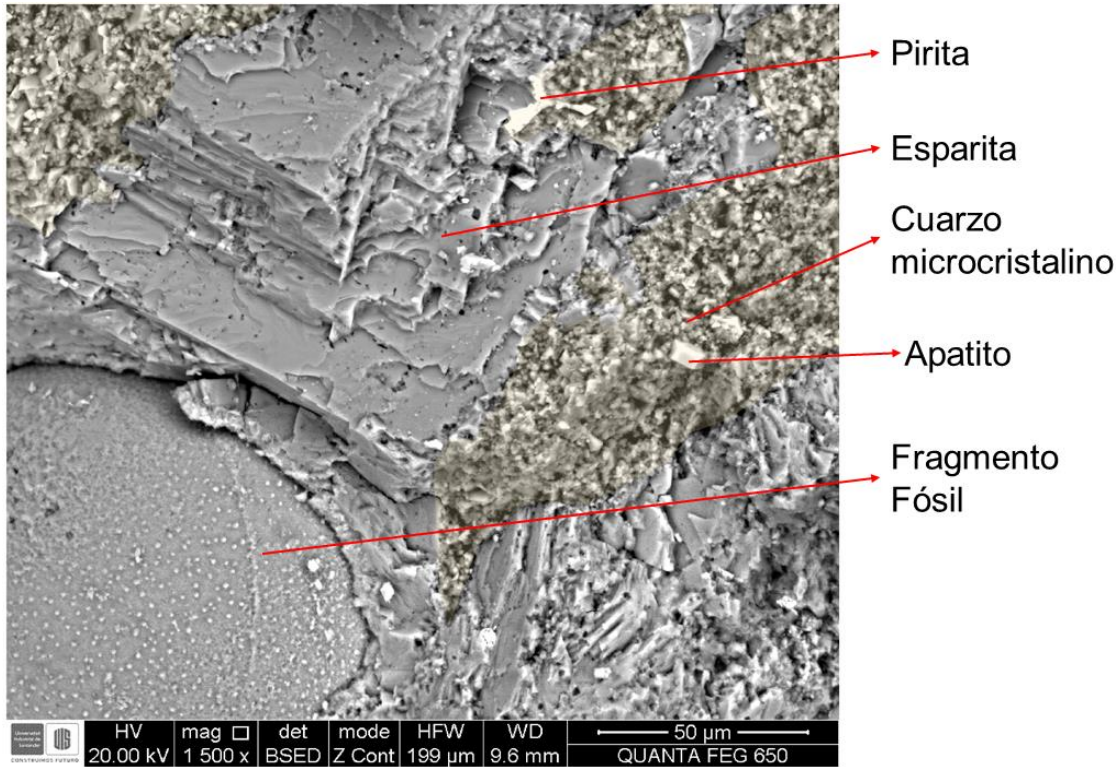
**Matriz (Matriz de micritas, minerales arcillosos, cuarzo microcristalino, sulfuros y apatitos).**

En la Figura 17 se observa de color Naranja una matriz que suele bordear las aristas de los cristales relativamente grandes de la esparita. En la Figura 18 se observa un acercamiento a la matriz. Esta matriz está compuesta principalmente por:

- Micritas: tienen una forma de cristal subhedral y anhedral, las aristas de estos cristales tienden a ser planos y con bordes agudos, algunos cristales tienden a presentar una

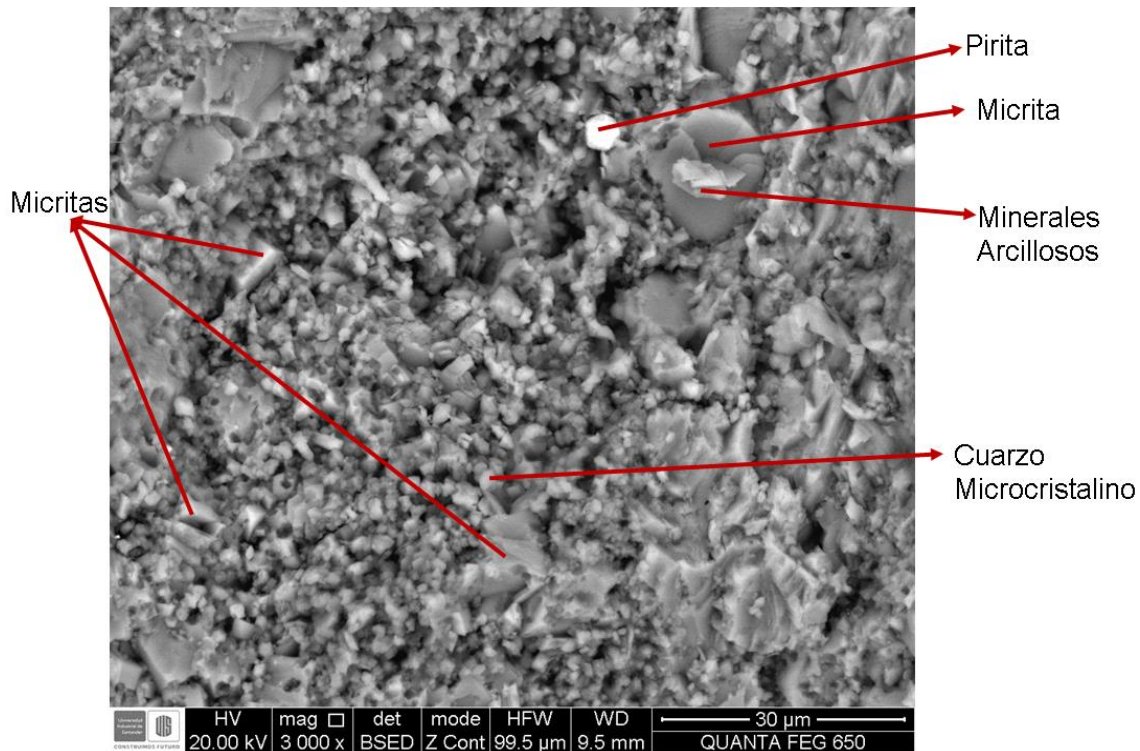
morfología de bloques, los contactos con los demás cristales tienden a ser puntuales a coalescentes, el rango de diámetro que presenta dichos cristales es de 2-10  $\mu\text{m}$  con un promedio aproximado de 3.8  $\mu\text{m}$ . En base a la clasificación de Folk (1974) y Flügel (2010) sería llamada micritas y en base a la micro-textura y morfología de micritas de Deville de Pierre et al. (2011) se llamaría Micrita apretada subhedral y anhedral con contactos coalescentes.

- Minerales arcillosos: los cristales de estos minerales tienden a ser subhedrales a euhedrales, estos cristales presentan un hábito hojoso, estos minerales se observan ocasionalmente en la matriz, estas minerales arcillosos tienen un rango de diámetro aproximado de 0.6-4.5  $\mu\text{m}$  con un promedio aproximado de 3.1  $\mu\text{m}$ .
- Cuarzos microcristalinos: tienen una forma de cristal subhedral a anhedral, estos cristales tienen los bordes subredondeados, tienen un rango de diámetro de 0.7-2  $\mu\text{m}$  con un promedio aproximado de 1.5  $\mu\text{m}$ . y se observa casi siempre junto a las micritas, generalmente cumple el rol de cemento.
- Apatitos: la forma de estos cristales tienden a ser subhedrales y presenta un hábito cristalino hexagonal, este mineral se observa ocasionalmente en la matriz, tiene un rango de diámetro de 7.5-6  $\mu\text{m}$ .
- Sulfuros: los sulfuros se encuentran principalmente como un agregado mineral, su forma de cristal es anhedral. Estos sulfuros están asociados principalmente a las piritas. Se observan ocasionalmente en la matriz.



*Figura 17.* Matriz de una wackestone.

Descripción: la matriz está señalada con color naranja y se señalan los componentes más predominantes.



*Figura 18.* Acercamiento más detallado de la matriz de una wackestone.

Descripción. Acercamiento a los minerales que tienden a ser más finos que componen a la matriz.

Como complemento se anexan los espectros de EDS de la matriz, el cual se tomaron en diferentes lugares de la matriz, con el fin de determinar la composición química elemental. Observando con detenimiento la Figura 19.A se observa el espectro EDS que muestra altos contenidos de S, Fe, Ca, y Si en el punto de análisis puede corresponder a sulfuros (Pirita) ya que coincide con la fórmula elemental, las anomalías de Si y Ca, pueden ser explicadas como una interferencia de la composición del cristal grande de micrita y el Si de la matriz.

En la Figura 19. B. Se observa el espectro de EDS mostrando los elementos predominantes como Si y Ca, mientras que los de menor proporción están el S, P, Al. Debido a que los tamaños de los cristales son demasiados pequeños (rango de 2-5 μm) y el punto de análisis pudo tomar la composición de varios cristales allí presentes. A partir de los resultados obtenidos del espectro de

EDS los componentes elementales predominantes son Sílice y el calcio, en menor proporción se encuentra el fósforo y el azufre. El cual pueden representar la composición de la composición ya mencionada (cuarzo-microcristalino, Micritas, Sulfuros (Pirita)).

En la Figura. 19. C. muestra el espectro EDS de un cristal de Apatito que presenta una forma de cristal euhedral, que tiene un diámetro aproximado de 8  $\mu\text{m}$ . Se evidencia los picos elementales de Ca, P, Si, Al, C y O, siendo el calcio y fósforo los elementos predominantes y es concordante con la fórmula química del apatito. Se encuentra también la presencia de sílice y este puede deberse los cristales microcristalinos de cuarzo que bordean el cristal de apatito.

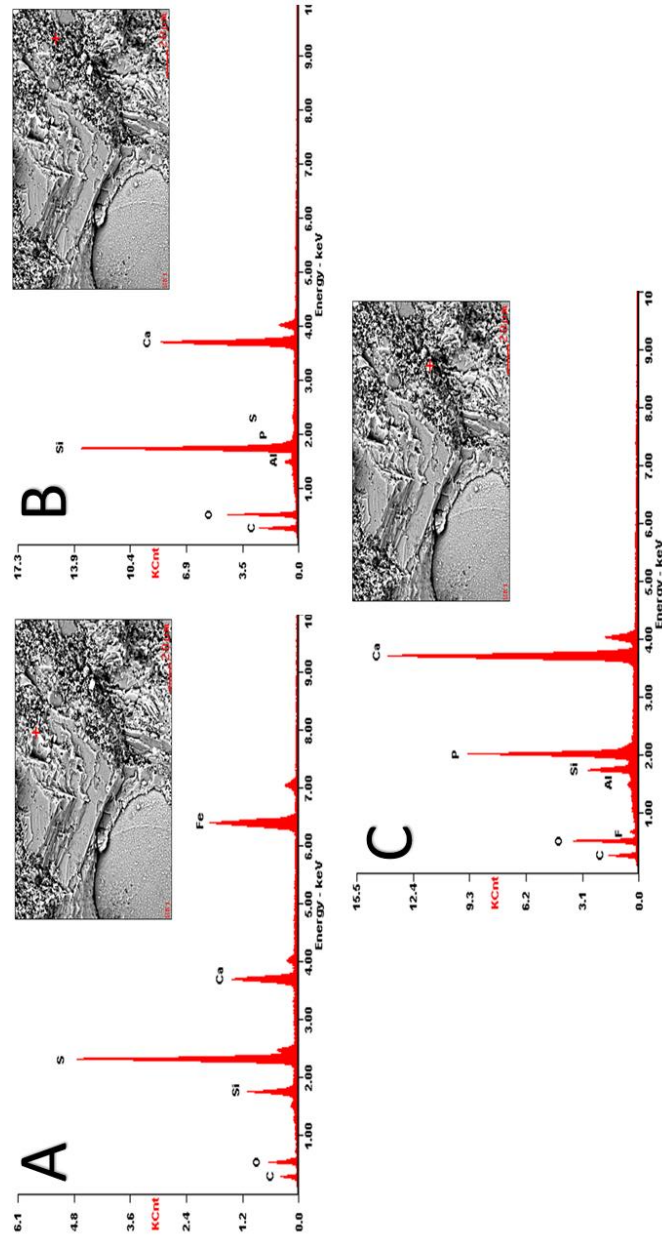
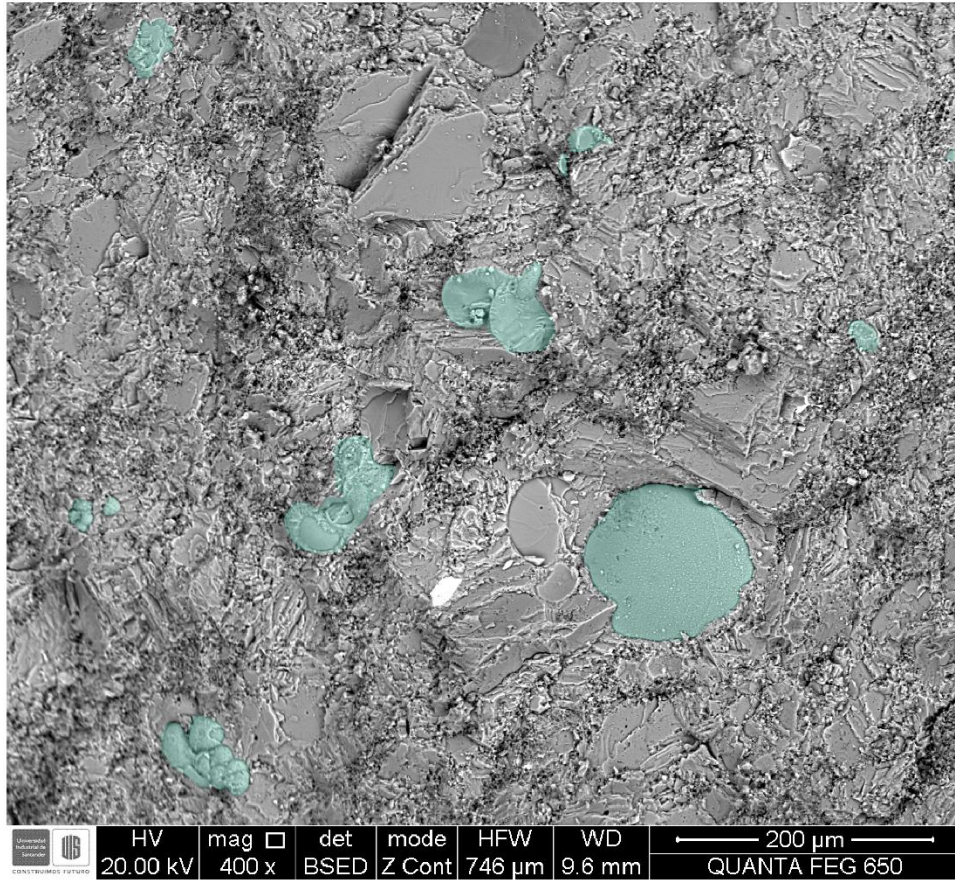


Figura 19. Espectros EDS de la matriz de una wackestone.

### Fósiles y/o fragmentos de Fósiles.

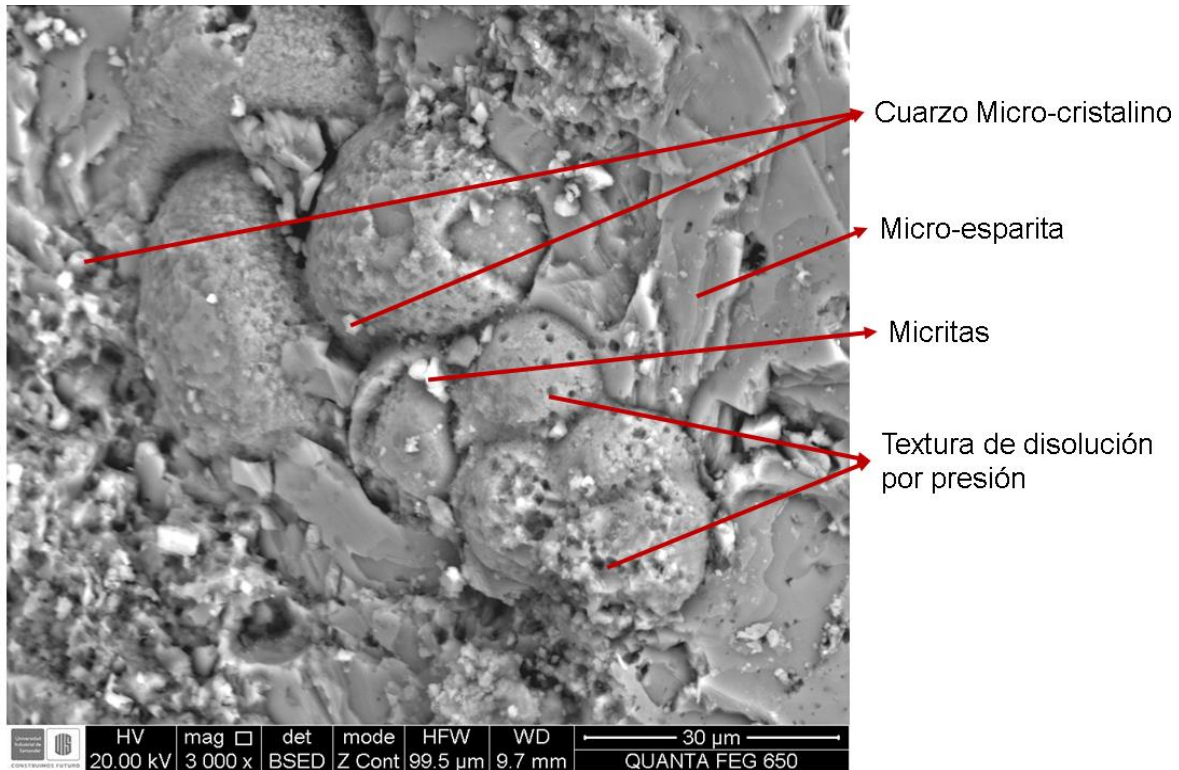
En la Figura 20 se muestran sombreados con un color de verde turmalina, el cual señala fragmentos y fósiles de tipo foraminíferos. Las cámaras de estos foraminíferos presentan una estructura de disolución y puede deberse a la disolución por presión de los carbonatos (ver Figura

21). Estos fósiles suelen estar en contacto con los cristales grandes de las microesparitas (Flügel (2010)) el cual sus contacto son agudos, el cual pudo ser generado por una recristalización, como se observa en la Figuras 21. En estos fósiles es común verlos acompañados de pequeños cristales de cuarzos microcristalinos, estas tienen un diámetro aproximado de 2-5  $\mu\text{m}$ .



*Figura 20.* Fragmentos fósiles en wackestones.

Descripción: Los fragmentos fósiles se encuentran sombreados de color verde turmalina, la mayoría corresponde cámaras de foraminíferos.



*Figura 21.* Fragmento Fósil asociado a foraminíferos en wackestones.

Descripción: se observa el fragmento fósil asociado a un foraminífero y además presenta textura de disolución por presión, también cabe resaltar el contacto agudo o marcado entre el fósil y la micro-esparita puede ser causado por un evento de recristalización.

En la Figura 22 se muestra el espectro EDS el cual el punto de análisis es el foraminífero y resalta el contenido elemental de Ca y en menor proporción es Al y Si, el cual puede deberse a la interferencia de pequeños cristales de cuarzos microcristalinos, aunque también se encuentran cristales de micritas que se encuentran sobre el fósil. En la figura 22 también se muestra el espectro de EDS de otro fragmento de la cámara de algún foraminífero que tiene un diámetro aproximado de 120 µm. y presenta también la pequeña interferencia de Si, Al y Mg debido a las pequeñas minerales de arcillas allí presentes.

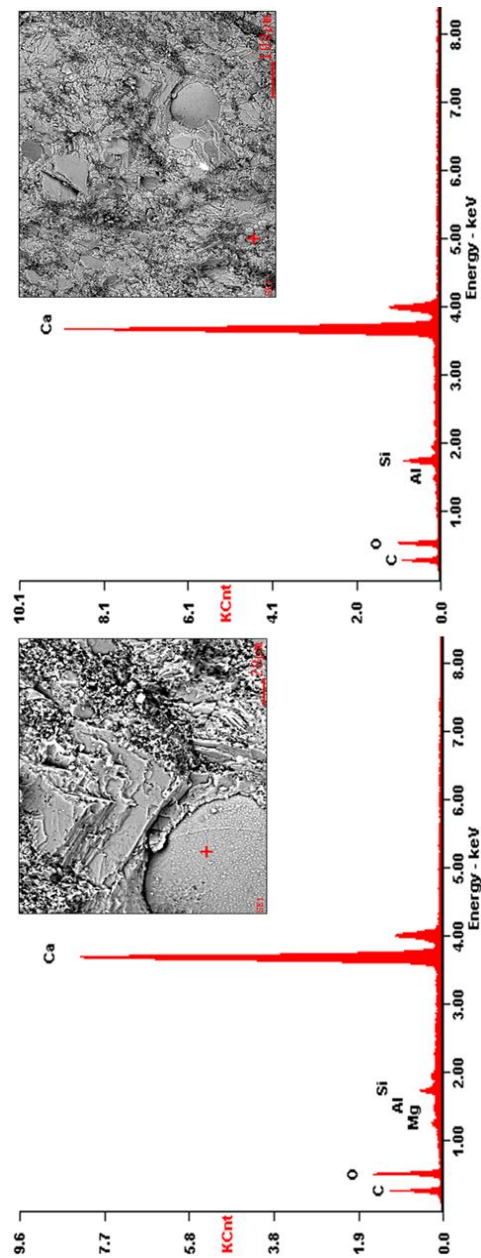
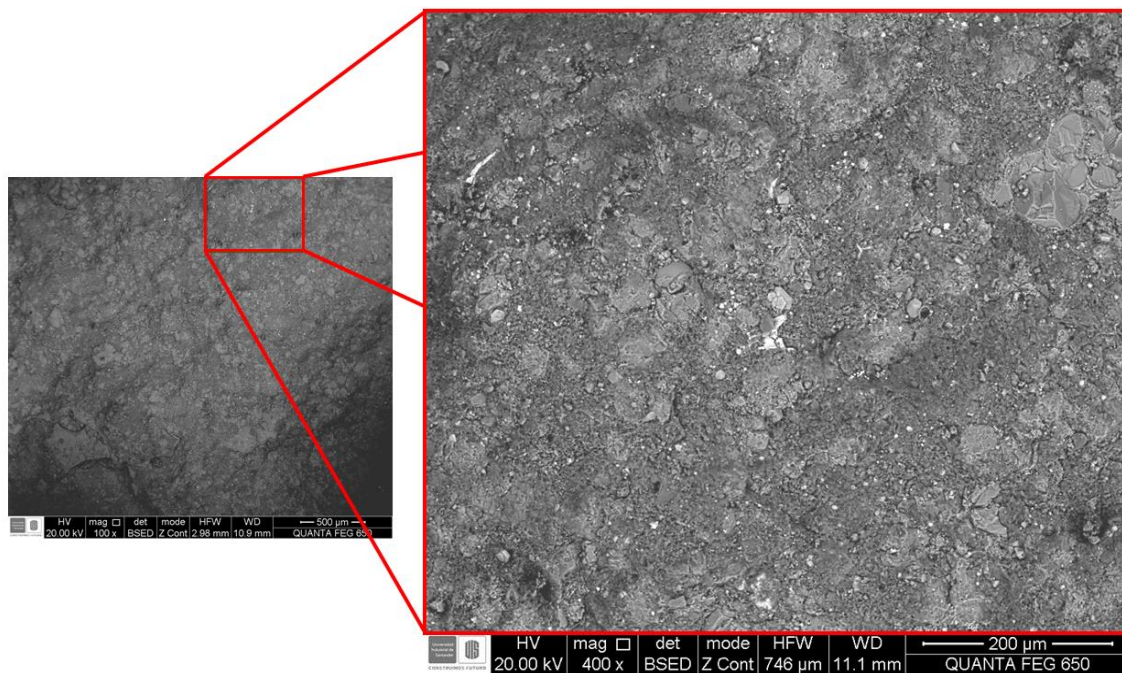


Figura 22. Espectro EDS de los fragmentos de fósiles en wackestones.

Descripción: se observa el fragmento fósil asociado a un foraminífero y además presenta textura de disolución por presión, también cabe resaltar el contacto agudo o marcado entre el fósil y la micro-esparita puede ser causado por un evento de recristalización.

**6.1.2 Micrita Lodosa.** Este litofacie se caracteriza por contener un alto contenido de minerales carbonatadas, cuarzos microcristalinos ( $<2 \mu\text{m}$ ) minerales arcillosos, fragmentos de fósiles recristalizados, presenta también contenidos de sulfuros como la pirita, fosfatos como el apatito, calcita (predominante micritas), materia orgánica solidificada y ocasionalmente se observa también algunos óxidos como producto de alteración de sulfuros. En las Figuras 23 se observa la microfotografía en rasgos generales con su respectivo acercamiento. A partir de este acercamiento sobresalen las morfologías de diversos minerales que se describen a continuación.



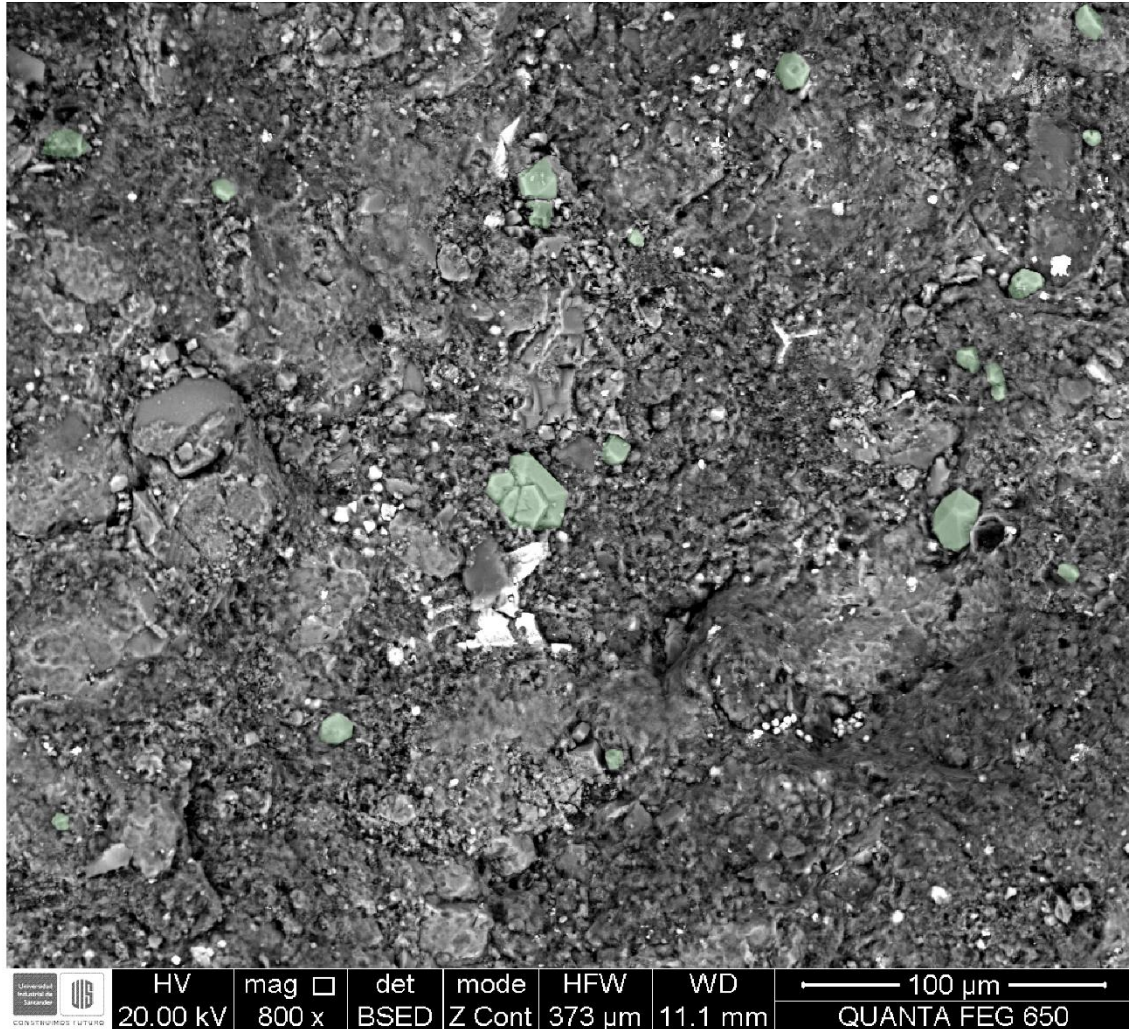
*Figura 23.* Acercamiento de microfotografía de la micrita lodosa.

Descripción. En la imagen de la derecha se observa los diversos minerales con sus morfologías características, que se detallan a continuación.

### **Apatitos.**

En la Figura 24. Se muestran los cristales de apatitos, de color verde, estos cristales tienden a ser euhedrales a subhedrales y presentan hábitos cristalinos hexagonales. En esta figura se

sombraron a los más sobresalientes, los tamaños de estos cristales tienen un rango de diámetro de 5-27  $\mu\text{m}$ . Algunos de estos cristales presentan pequeñas fracturas irregular a concoidea, y suelen estar acompañadas por cristales pequeños de cuarzo microcristalino, el cual se evidencia en el espectro del EDS, presenta unas anomalías de Si, Al y Mg. En la Figura 25 muestra dos puntos de análisis en dos cristales diferentes de apatitos. En estos espectros muestra los picos de mayor altura relativamente son Ca y P, siendo estos los elementos principales de la fórmula química de los apatitos y presenta también una composición elemental de menor proporción que son: Si, Al, Mg, Fe, K y F. esto se puede deber a la presencia de minerales arcillosos que se encuentran bordeando los cristales de apatito.



*Figura 24.* Cristales de apatitos en micritas lodosas.

Descripción: en la imagen se muestran los cristales de apatito sombreados de color verde, sus formas de cristales son subhedrales a euhedrales, y es muy común observarlos con su hábito hexagonal.

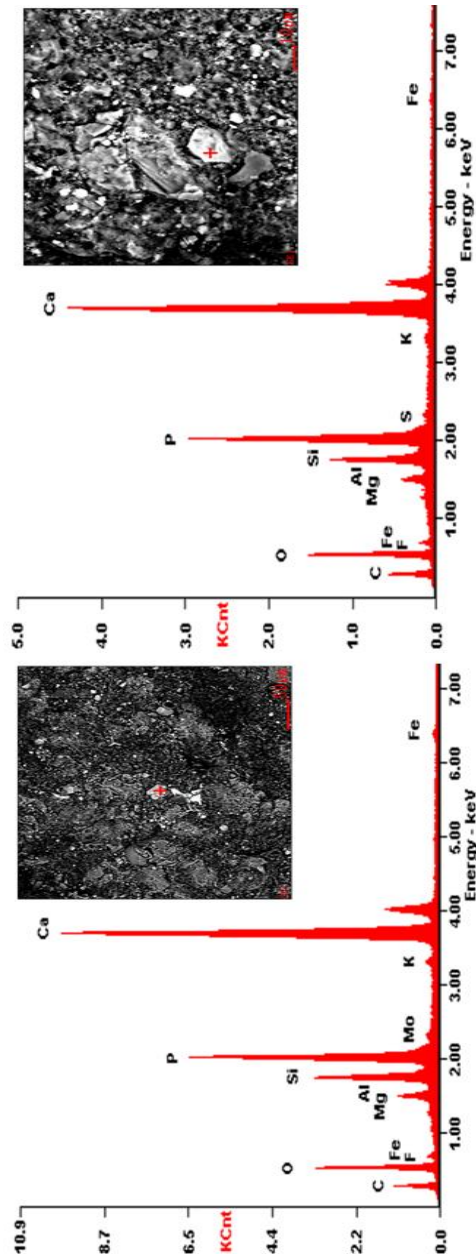


Figura 25. Espectro EDS de cristales de apatitos en micritas lodosas.

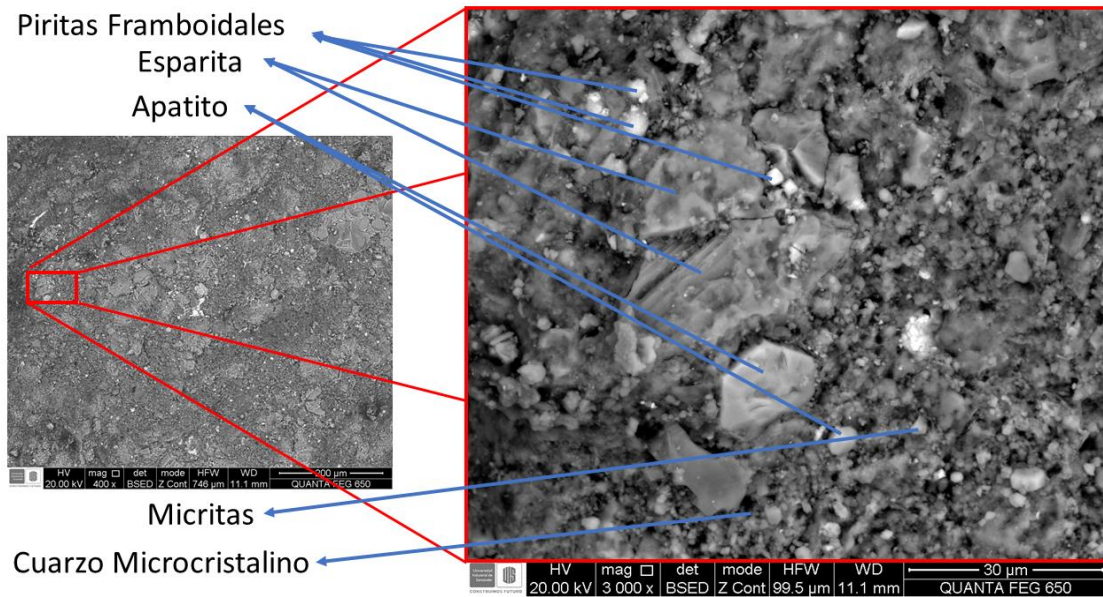
**Matriz. (Minerales Arcillosos, cuarzo micro-cristalino y Micritas.)**

La matriz está conformada principalmente por tres componentes principales, que son los minerales arcillosos, cuarzo microcristalino y micritas, la matriz es la más predominante en la

muestra, a continuación se describirá cada componente por separado. En la Figura 29 se puede observar la distribución de la matriz de la roca sombreada de color amarillo claro.

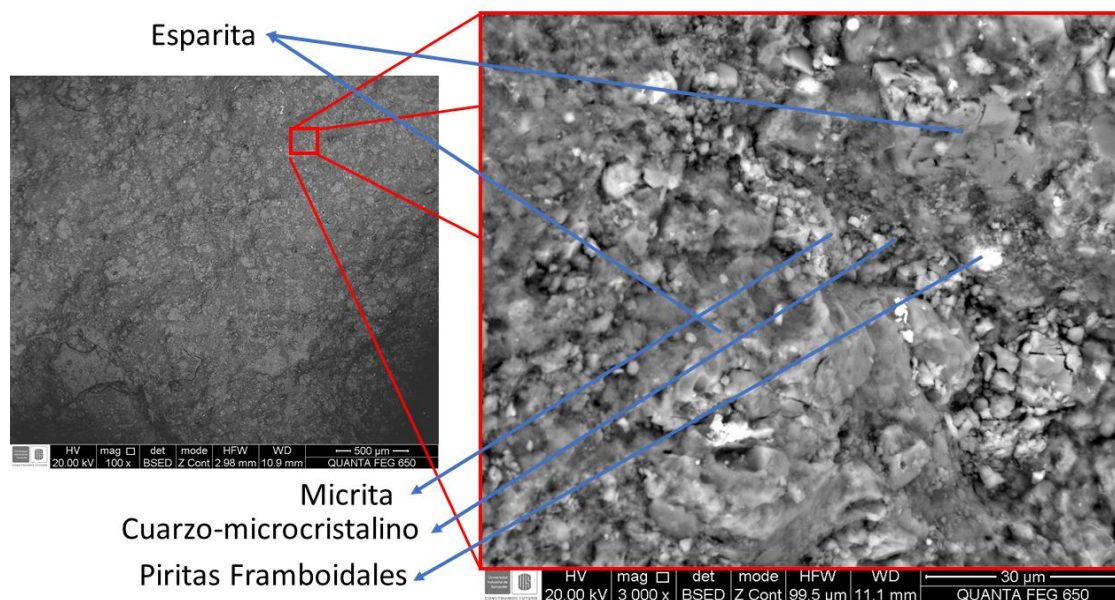
- **Minerales Arcillosos:** estos minerales tienden a tener morfologías hojosas y suelen hacer “recubrimientos” sobre cristales de esparitas y cristales de apatitos, estos minerales generalmente se encuentran cementando a los cristales ya mencionados. En la Figura 28 se puede observar estos “recubrimientos” de minerales arcillosos sobre un cristal de esparita. En las Figuras 30 y 31 se observan un acercamiento más detallado a estos minerales arcillosos.
- **Micritas:** estas presenta un forma de cristal entre subhedral a anhedral, su rango de diámetro es de 1-3.5  $\mu\text{m}$ , con un promedio aproximado de 2.5  $\mu\text{m}$ . Las aristas de los cristales tienden a ser angulares y planos. Y presenta unos contactos puntuales a coalescentes entre los mismos cristales.
- **Cuarzo microcristalino:** tiene una forma de cristal subhedral-anhedral, generalmente presenta bordes sub-redondeados, estos cristales tienden a tener un diámetro  $<2 \mu\text{m}$ . estos cristales suelen estar juntos a las micritas y tiene cumplen el rol de cemento.

En las Figuras 26 y 27 se observan partículas de micritas que tienen un rango de diámetro de 2.5 - 5  $\mu\text{m}$ , y estas se encuentran rellenando fracturas y bordean a los cristales de esparitas, los cristales de micritas tienden a ser subhedrales y subangulares. Estas micritas tienden a estar acompañadas por los cuarzos microcristalinos que tiene unos diámetros  $<2 \mu\text{m}$ , subredondeados y se logran diferenciar de las micritas por la longitud de los diámetros y además por la forma de los cristales. Además en estas figuras se observa también cristales de apatitos y esparitas que tienen un rango de diámetro de 14-15  $\mu\text{m}$  y 10-16  $\mu\text{m}$  respectivamente.



*Figura 26.* Componentes minerales predominantes en las micritas lodosas.

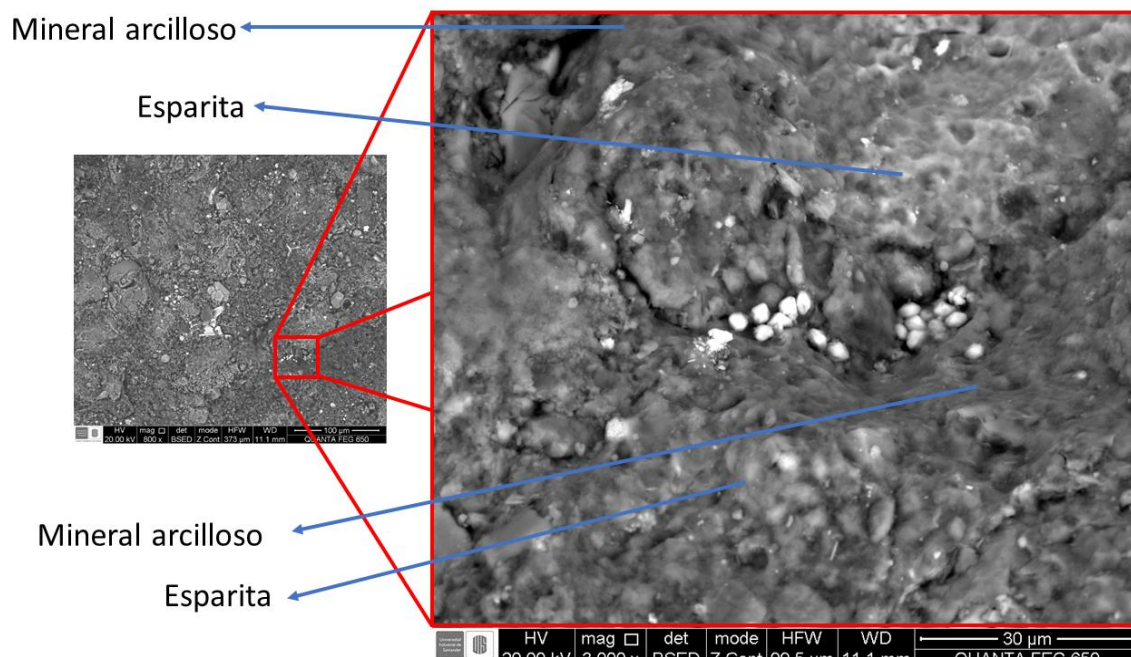
Descripción: se observa los minerales (micritas, cuarzo microcristalino, esparitas y apatitos) que predominan en la muestra, también se observa las piritas framboidales que son minerales accesorios.



*Figura 27.* Matriz relleno y bordeando los cristales de esparitas en micritas lodosas.

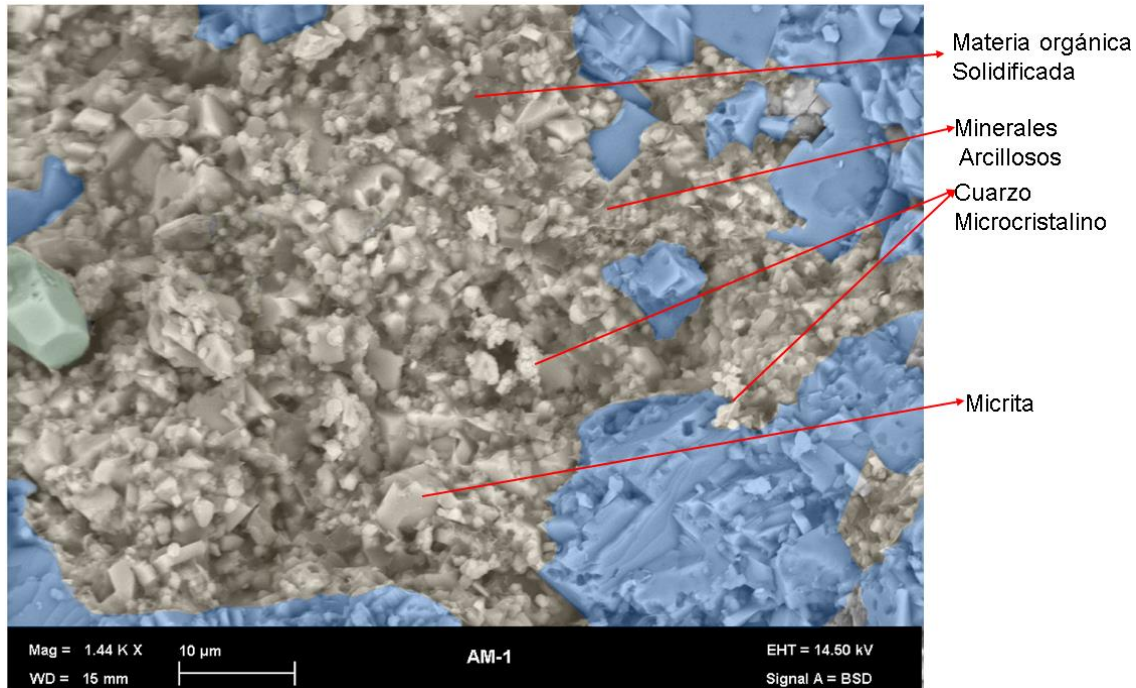
Descripción: en la figura se observa la matriz bordeando en medio de dos cristales de esparitas.

Nota. En la parte inferior derecha se observa un fragmento de esparita fracturado y es debido al proceso de preparación de la muestra.



*Figura 28.* Mineral arcilloso de la matriz de la micrita lodosa.

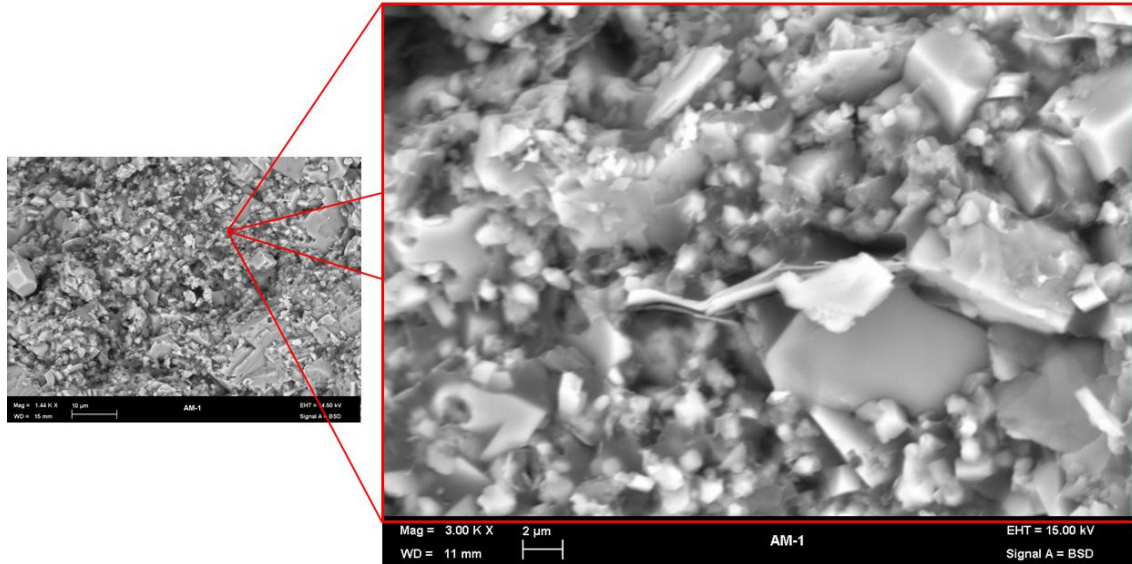
Descripción: se observa un acercamiento de la matriz donde hay predominio de los minerales arcillosos, la morfología de dicho mineral tiende a ser un “recubrimiento” sobre los cristales de esparita aledaños. Se observa también en el centro de la imagen algunos óxidos esféricos (alteraciones de piritas)



*Figura 29.* Minerales predominantes de la micrita lodosa.

**Descripción:** Se observa la composición mineral más predominante de la micrita lodosa, las micro-esparitas se encuentran sombreadas de color azul, los apatitos se encuentran sombreados de color verde y la matriz de color amarillo claro. La matriz está compuesta por micritas, cuarzo microcristalino ( $<2 \mu\text{m}$ ), minerales arcillosos y por materia orgánica solidificada.

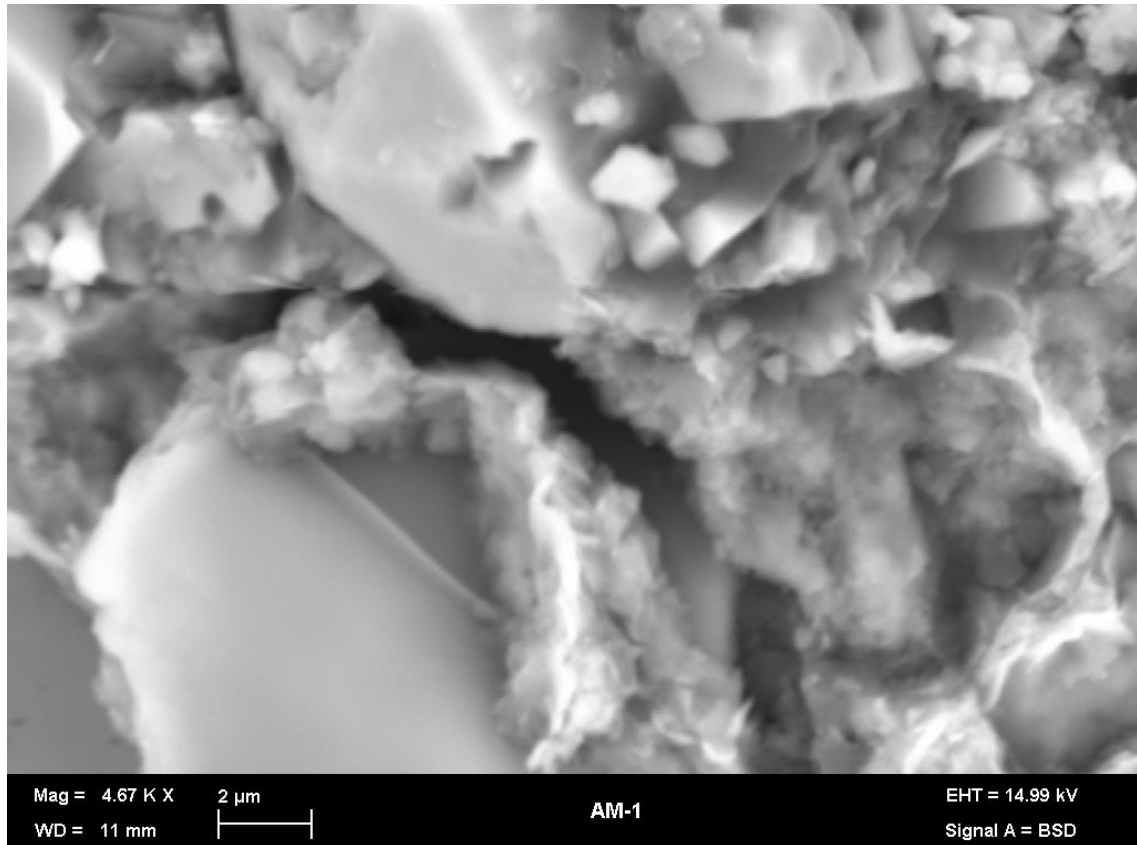
En la Figura 29 se observa la distribución de la matriz sombreada de color amarillo claro, compuesta principalmente por micrita y cuarzo microcristalino, y se observa también minerales arcillosos con una morfología de “cabellos” (Ver Figura 30 y 31) para su respectivo acercamiento. Estos minerales arcillosos también cumplen el papel de cemento entre los cristales de micro-esparitas y micritas. Se observa también la materia orgánica solidificada relleno de los poros intercristalinos. Las micro-esparitas se encuentran sombreada de color azul, estas micro-esparitas tienen a ser subhedrales y además exhiben aristas angulares y rectas. Los apatitos observados se encuentran sombreados de color verde claro, tienden a ser euhedrales a subhedrales, presentan un hábito tabular y tienden a presentar caras hexagonales.



*Figura 30.* Acercamiento a la matriz de la micrita lodosa.

Descripción: Se observa un acercamiento de la matriz, el cual se enfoca en el mineral arcilloso que presenta una morfología de “cabellos”. Este mineral se encuentra junto a las micritas y microesparitas y también junto a los cuarzos microcristalinos.

En la Figura 32.B se observa el espectro EDS cuyo punto de análisis está ubicado en la matriz da la muestra, en que predominan estos minerales arcillosos sobre las micritas. La composición elemental predominante es Si, Al y en menor proporción se encuentra Ca, K, Mg entre otros. En el punto de análisis hay un predominio de minerales de arcilla sobre las micritas. Por medio del espectro EDS no se puede determinar el tipo de arcilla.

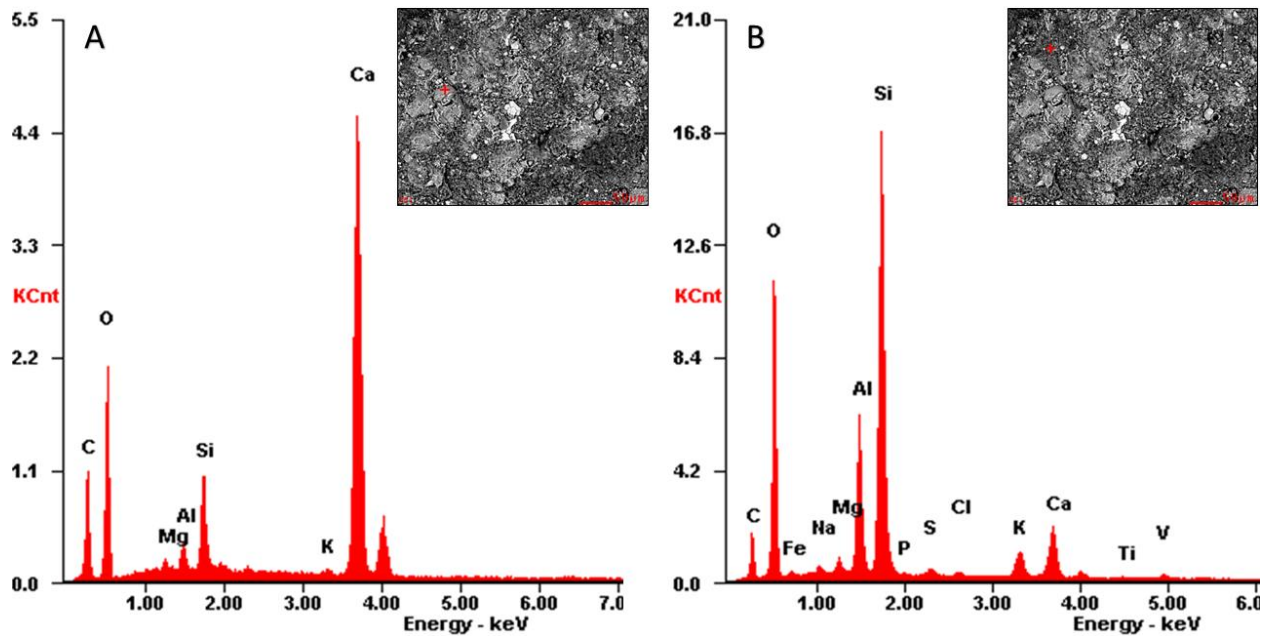


*Figura 31.* Acercamiento a los minerales arcillosos de la micrita lodosa.

Descripción: Acercamiento a los minerales arcillosos que se encuentran cementando los bordes de los cristales de micro-esparitas y también rellenando poros.

### **Esparitas.**

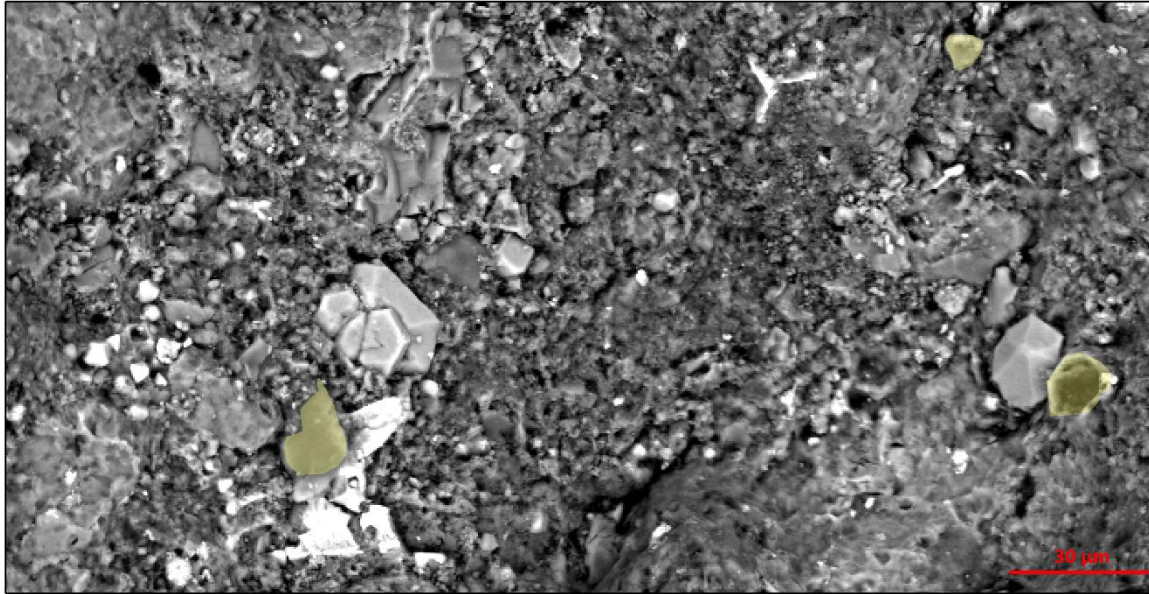
Los cristales tienen una forma de cristal subhedral hasta anhedral, el cual tienen un rango de diámetro de 15 hasta 32  $\mu\text{m}$ . En las Figuras 26, 27, 28 y 29, se pueden observar los cristales de esparitas bordeados por minerales arcillosos y algunos cristales exhiben un hábito tabular. En la Figura 32.A se observa el espectro EDS que nos muestra la composición elemental de las esparitas. En este espectro EDS podremos ver los altos picos del Ca, y en menor altura los de Si, Mg, Al y K. los bajos contenidos de Si, Al, se puede deber a la presencia de minerales arcillosos que se encuentran sobre el carbonato.



*Figura 32.* Espectros EDS con punto de análisis en las esparitas y en los minerales arcillosos  
 Descripción. A. se observa el espectro EDS de un cristal de esparita el cual el pico de Ca es prominente. B. Se observa el espectro EDS de la matriz predominante en minerales arcillosos sobre las micritas, los picos de los elementos más sobresalientes son Si, Al, Mg y K.

### Cuarzo.

En la Figura. 33 se observa escasos cristales de cuarzo visibles, de color Amarillo claro, también se observa que un cristal de cuarzo está recubierto por materia orgánica solidificada, los cristales detríticos tienden a ser subredondeados, con un rango de diámetro aproximado de 12 a 19  $\mu\text{m}$ . En la Figura. 36.A. se observa el espectro del EDS el cual el punto de objetivo muestra una composición elemental predominante de Si, Ca, Al, y en menor proporción K. La presencia anómala de Ca, Al, P, se puede deber a la presencia de los apatitos adyacentes y los minerales arcillosos que bordean el cristal de cuarzo.



*Figura 33.* Cristales de cuarzo en micritas lodosas.

Descripción: los cristales de cuarzo están sombreados de color amarillo claro, algunos de ellos tienen recubrimientos de materia orgánica solidificada, estos cuarzoes tienden a ser angulosos a subredondeados.

### **Óxidos (Alteraciones de Sulfuros).**

En la Figura. 34. Se puede observar los óxidos señalados con polígonos de color rojo claro, el cual se encuentra generalmente sobre minerales de carbonatos, incluso ocasionalmente se encuentra junto a los minerales arcillosos y micritas. Estos óxidos presentan generalmente se presentan como agregados alargados y/o como “manchas” y ocasionalmente se presenta morfologías esféricas. Estos óxidos alargados tienen un rango de diámetro mayor de 20-40  $\mu\text{m}$ . En la microfotografía también se puede observar las dos morfologías que presentan estos óxidos mencionados. Mientras que en la Figura. 35. Se hace un acercamiento a los óxidos con morfología esférica. Los espectros de EDS se pueden observar la composición elemental de estos óxidos el cual en la Figura. 36. B. Estos óxidos esféricos tienen un rango de diámetro de 2-4  $\mu\text{m}$ . Estos óxidos esféricos son producto de alteraciones de la pirita.

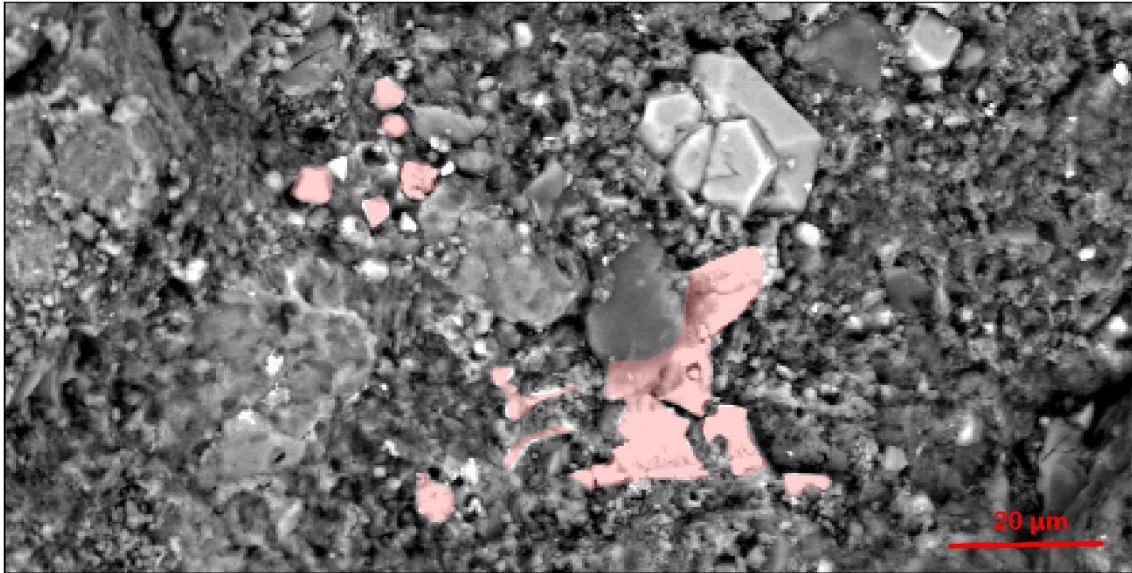


Figura 34. Óxidos en micritas lodosas.

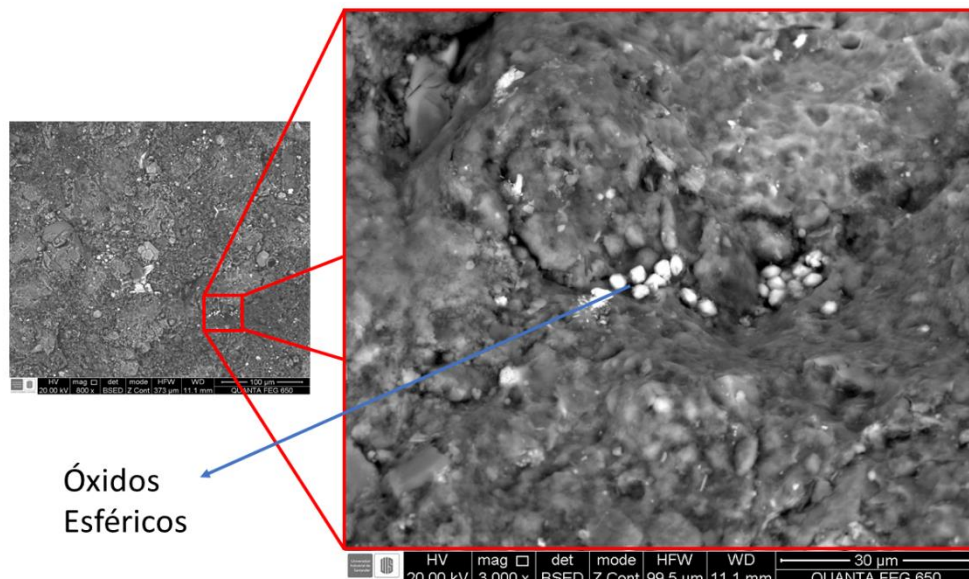
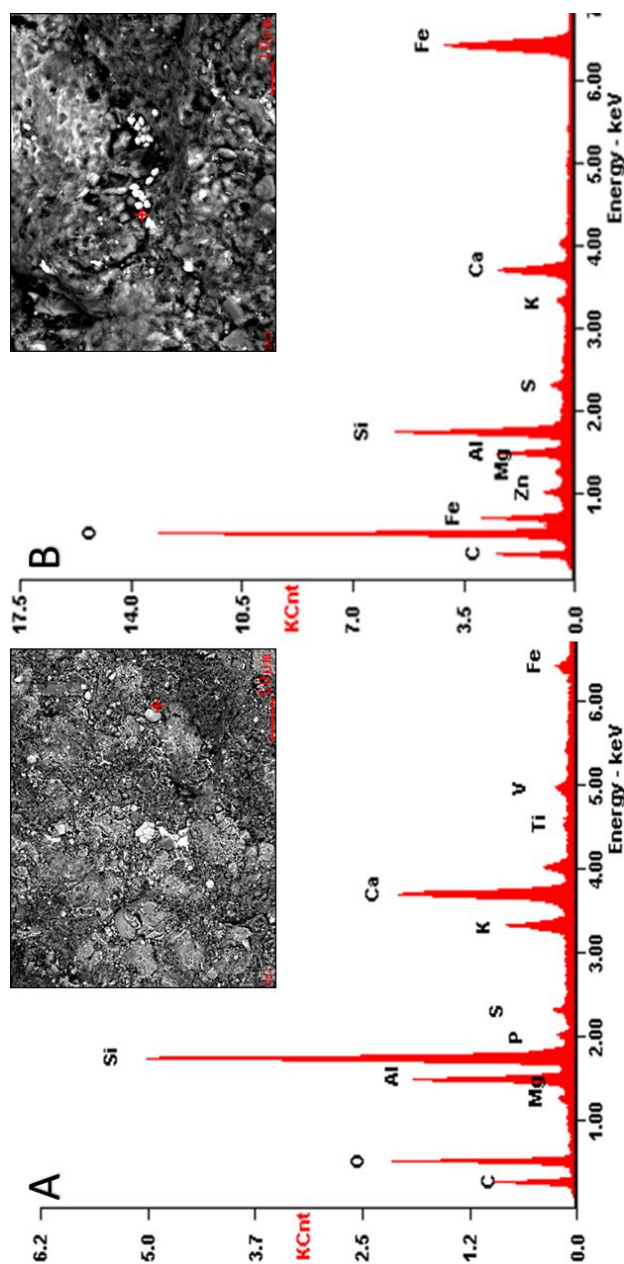


Figura 35. Óxidos con morfología esférica en micritas lodosas.

Descripción: se observa los óxidos sombreados de color rojo claro, este oxido exhibe una morfología alargada. Estos óxidos se encuentran bordeados por minerales arcillosos y micritas (matriz) junto a los cristales de apatito y de cuarzo.

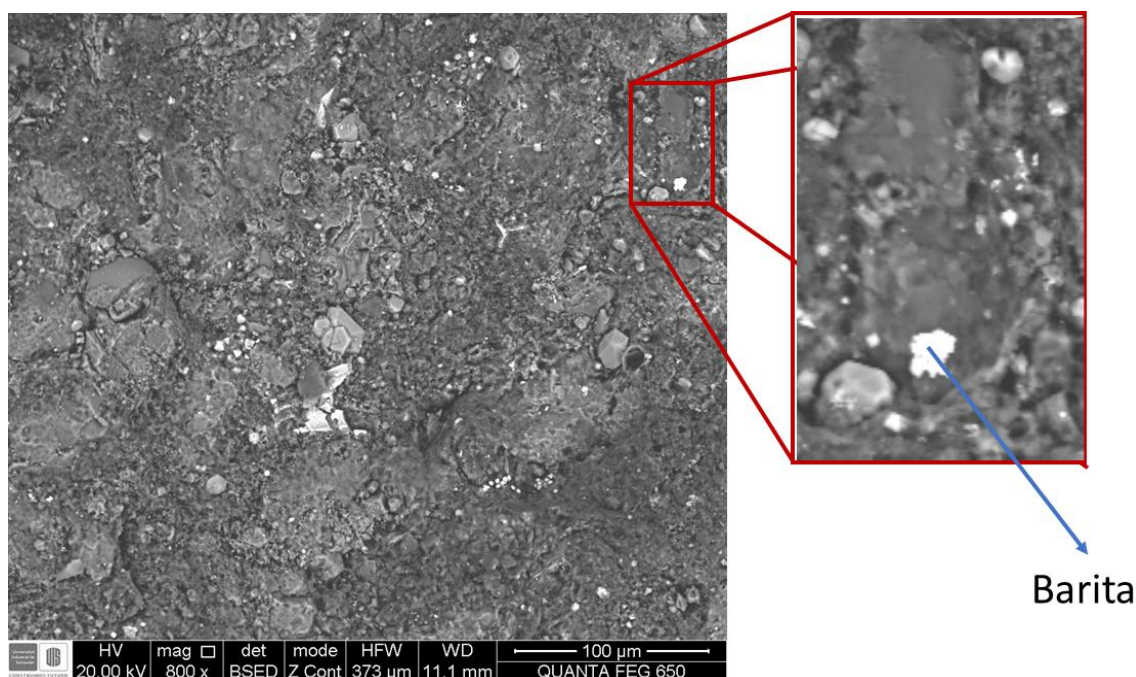


*Figura 36.* Espectros EDS de los minerales de cuarzo y óxidos (alteraciones) en las lodolitas calcáreas.

Descripción: A. Se observa el espectro EDS cuyo objetivo es un cuarzo recubierto por materia orgánica solidificada, adyacente al cristal de cuarzo se encuentra otro cristal de apatito y la matriz (micritas y minerales arcillosos). B. Se observa el espectro EDS de los óxidos que posiblemente sean el producto de la alteración de las piritas.

**Baritina (Barita).**

La barita que se encuentra en la muestra se puede observar en la Figura. 37, el cual se encuentra como un agregado, y para lograr su identificación se tuvo que recurrir a su espectro de EDS (Ver Figura No. 43), presenta anomalías de Si y Ca, se puede deber a la presencia de minerales arcillosos y micritas que se encuentran alrededor de esta. No se le pudo determinar su hábito cristalino ya que a la hora de la preparación de la muestra pudo disgregarse.

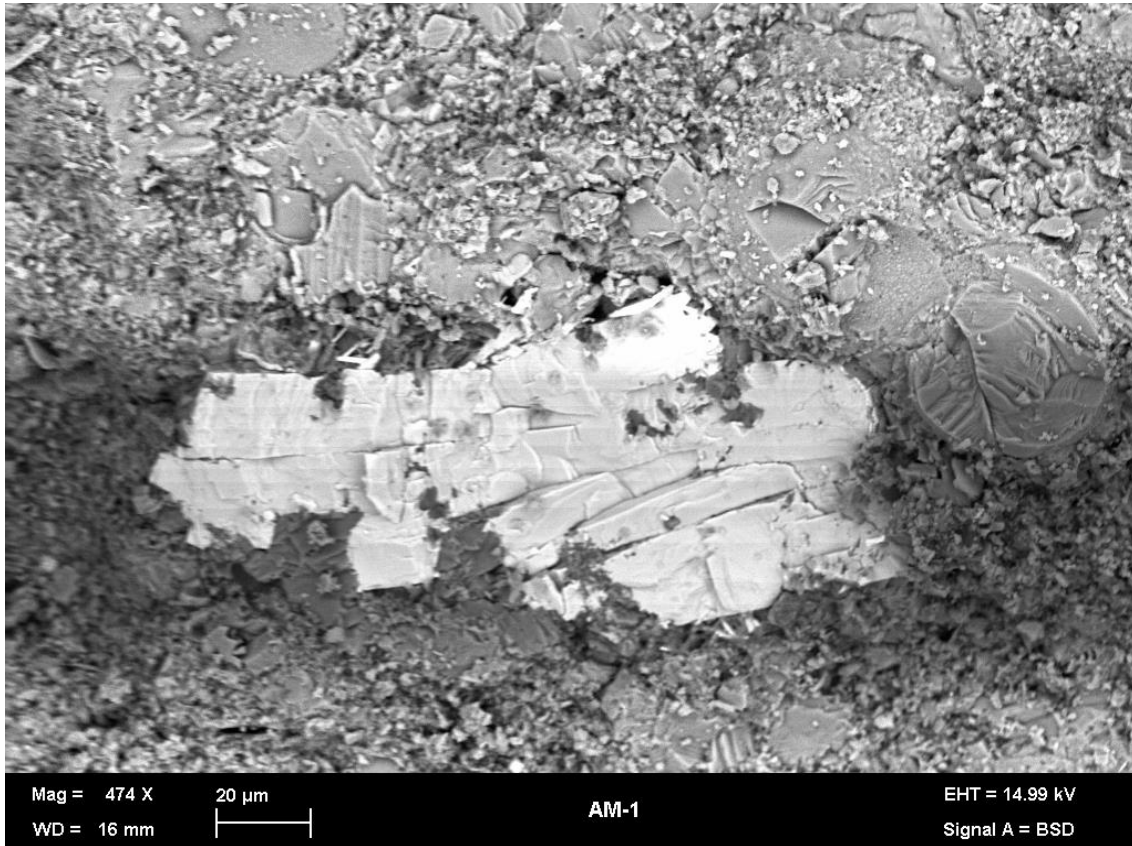


*Figura 37.* Fragmento de cristal de barita en micritas lodosas.

Descripción: En el acercamiento de la imagen se puede observar el fragmento de barita, el cual se tuvo que recurrir al espectro EDS para su reconocimiento, también se observa en la parte inferior izquierda de la imagen un cristal de apatito.

En la Figura. 38 se puede observar la barita que tiende a ser tabular y alargado con un rango de diámetro de 150 y 69 μm. y en la Figura. 43 (Derecho) se puede observar su espectro EDS. Los picos de los elementos que sobre salen son O, S y Ba, siendo correspondientes a la fórmula química

general de la barita. Se observa también anomalías de Si y Ca, esto se puede deber a la presencia de micritas y cuarzos microcristalinos que bordean a la barita.



*Figura 38.* Barita que se encuentra en la micrita lodosa.

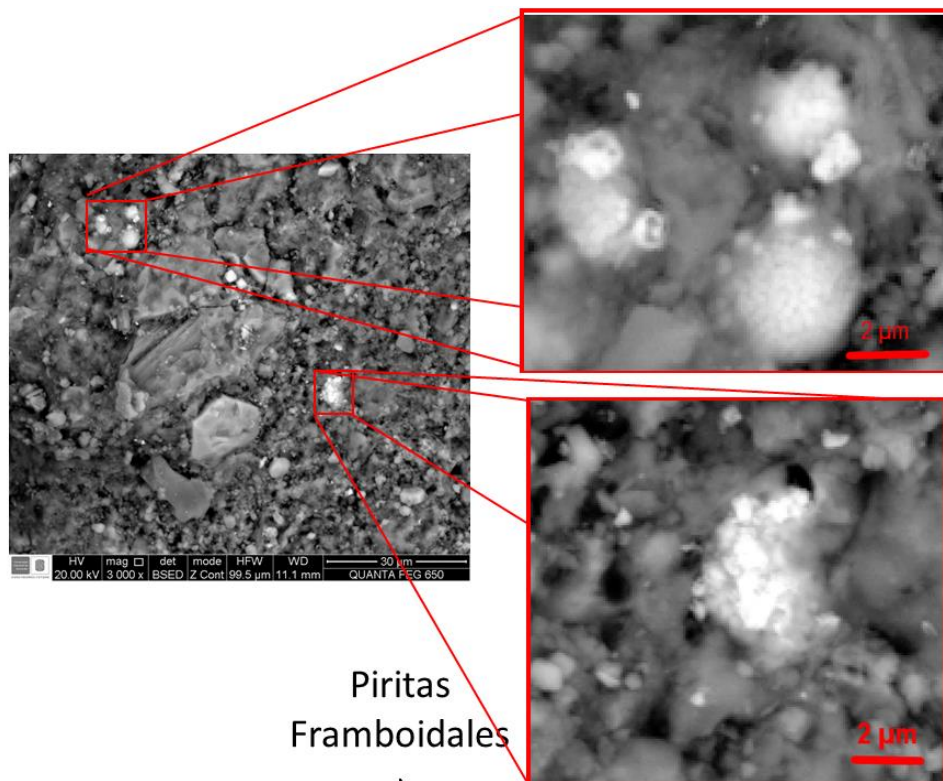
Descripción: Se observa el mineral de barita en el centro de la microfotografía. Este mineral tiende a tener un hábito tabular y alargado,

### **Piritas Framboidales.**

En las Figuras. 39 y 40 se pueden observar las piritas framboidales, y se pueden reconocer por su morfología característica, estas piritas suelen estar sobre o acompañadas de minerales arcillosos y micritas (matriz). Estas piritas tienen un rango de diámetro de 2.5-3.5 µm. En la Figura. 40 también se observan en la parte inferior de la microfotografía sulfuros ya alterados.

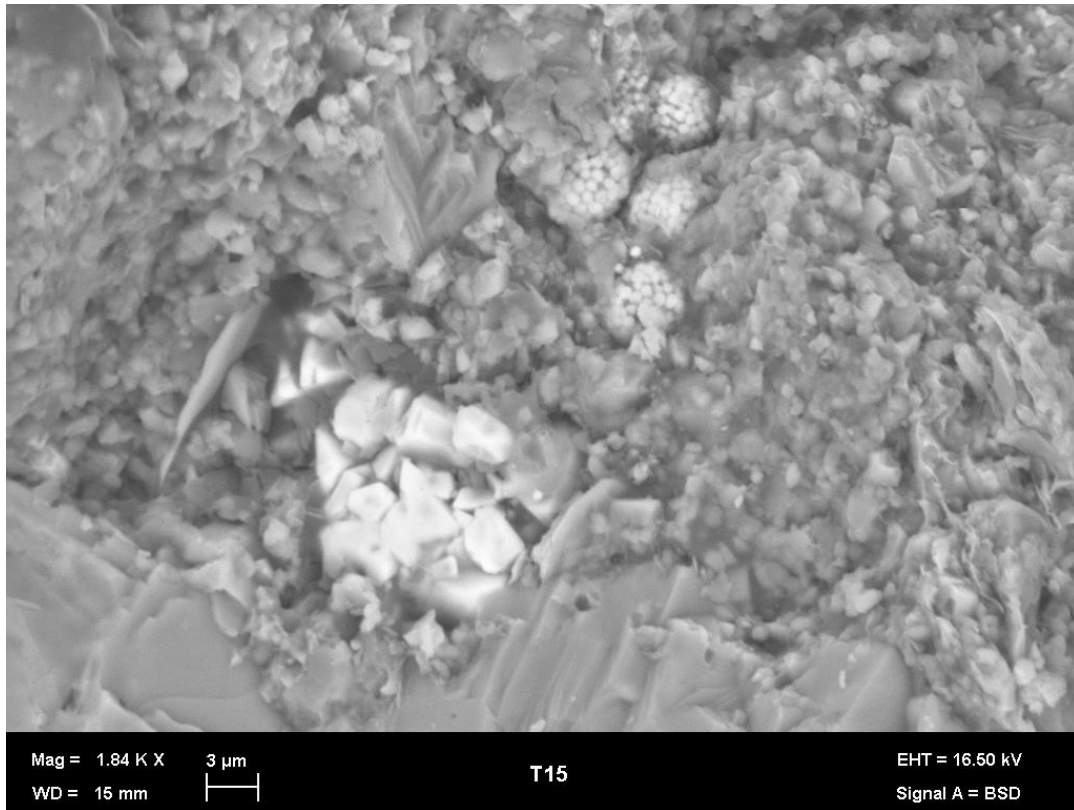
### Fragmentos Fósiles.

Se puede observar fragmentos de fósiles, el cual presenta similitudes a fragmentos y cámaras de los foraminíferos. Se pueden observar en la Figura. 41 se muestran sombreadas de color azul claro. Los diámetros de estos fragmentos de fósiles tienen un rango de 50-200  $\mu\text{m}$ . En la figura también se observa un acercamiento de la microfotografía. Estos fragmentos fósiles tienen una composición predominante de Calcio. En las Figuras. 42 A y B se observan fragmentos de foraminíferos recristalizados y presentando también texturas de disolución. En la Figura. 42. C se observan los coccolitos.



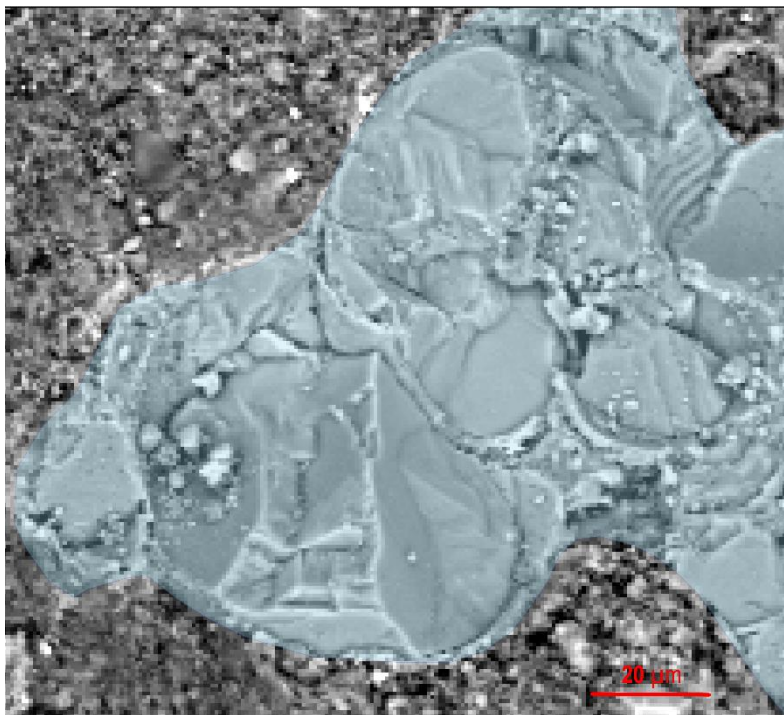
*Figura 39.* Piritas Framboidales en micritas lodosas

Descripción: Se observa los acercamientos de las microfotografías que muestran las piritas framboidales, estas suelen encontrarse sobre la matriz (minerales arcillosos y micritas)



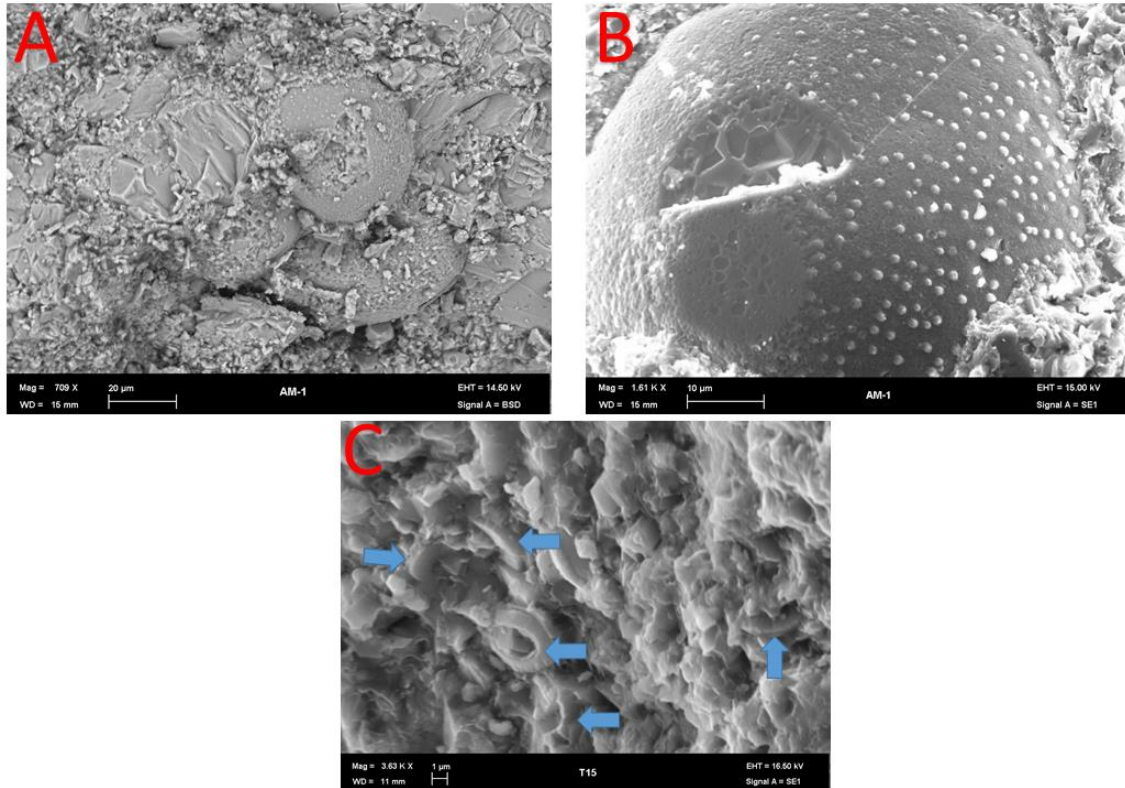
*Figura 40.* Piratas Framboidales en la micrita lodosa.

Descripción: En la microfotografía se observa en la parte superior las piratas framboidales en medio de la matriz, en la parte inferior se observa algunos sulfuros alterados y en la parte derecha de la microfotografía se observa minerales arcillosos.



*Figura 41.* Fragmentos fósiles recristalizados en micritas lodosas.

Descripción: en la microfotografía se observa sombreado con color azul claro fragmentos de fósiles recristalizados el cual se asocia a fragmentos de cámaras de foraminíferos.



*Figura 42.* Fragmentos Fósiles recrystalizados en micritas lodosas.

Descripción: A. Se observan los fragmentos fósiles de foraminíferos, nótese también la textura de disolución. B. Se observa una cámara de foraminífero recrystalizada y C. se observan coccolitos, dentro de la matriz de la muestra y estos se encuentran distribuidos de forma aleatoria.

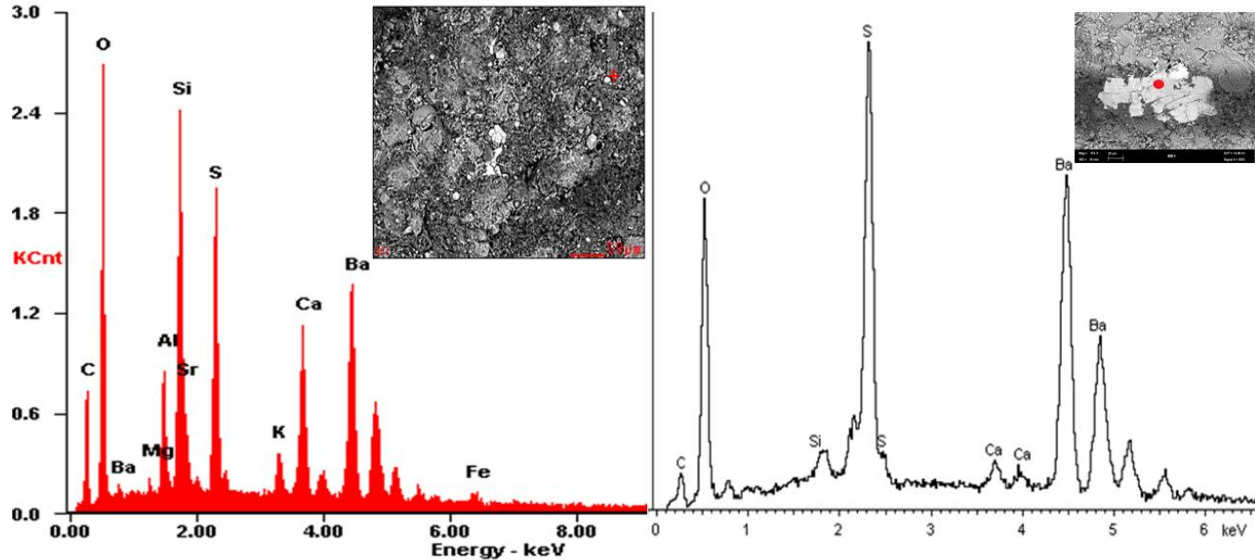


Figura 43. Espectro EDS de la Baritina (barita) en las micritas lodosas.

Descripción: se observa el espectro EDS de la baritina siendo los elementos más importantes el S y Ba, la anomalía del Si, Al Ca, K y Mg puede deberse a la presencia de minerales arcillosos y cristales de micritas (matriz).

**6.1.3 Arcillolita Calcárea.** En esta litofacie predomina una matriz que está compuesta principalmente por minerales arcillosos, cuarzo microcristalino y carbonatos con textura de micritas subhedral. Como minerales accesorios se encuentran las piritas framboidales, apatitos subhedrales y en algunos casos ya se encuentran óxidos (alteración de algunos sulfuros). Se observan también múltiples fósiles de organismos foraminíferos, el cual sus cámaras se encuentran recristalizadas en calcita.

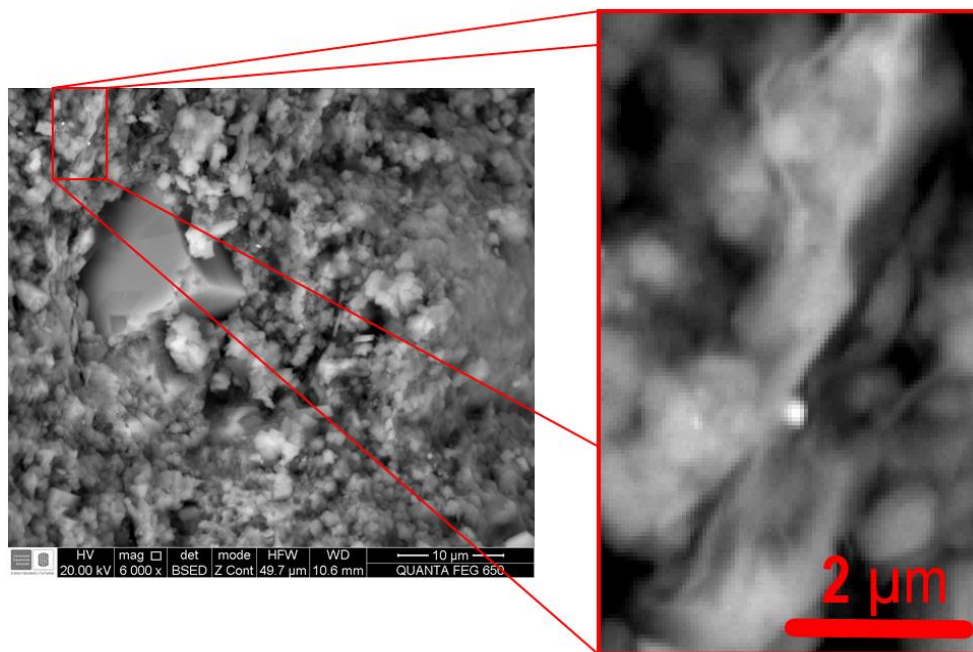
**Matriz (Minerales Arcillosos, cuarzo micro-cristalino, micritas y apatitos).**

La matriz está compuesta principalmente por minerales arcillosos, cuarzo microcristalino, micritas y apatitos (ocasionalmente), y esta matriz es la más predominante en toda la muestra. A continuación se describe cada mineral por separado.

- **Minerales arcillosos:** estos minerales presentan una morfología de “cintas alargadas” se encuentran en la matriz de la muestra y van rellenando poros y/o también cumple el rol de cemento entre los cristales de micritas. En la Figura. 44 se puede observar estos minerales arcillosos. En la Figura. 45 A y B se observa la distribución y arreglo de microfábrica de estos minerales arcillosos, del tipo borde cara. Y también se logra evidenciar una orientación preferencial.
- **Micritas:** presentan una forma de cristal subhedral y anhedral, la morfología de estos cristales suele ser prismáticos triangulares y/o romboédricos. Estos cristales presentan un rango de diámetro de 1.2-3  $\mu\text{m}$  con un promedio aproximado de 2  $\mu\text{m}$ . Los contactos entre otros cristales de micritas tienen a ser coalescentes a puntuales. En base a la clasificación de Folk (1974) y Flügel (2010) estas se clasifican como micritas y en base a la clasificación de microtextura y morfología de Deville de Periere et al. (2011) se denomina micrita apretada, subhedral compacta. (Ver Figura. 46). En la Figura. 47 A, B y C se muestra los cristales de micrita subhedrales e incluso euhedrales.
- **Apatito:** la forma de estos cristales tienden a ser subhedrales y ocasionalmente a euhedrales, generalmente presenta unos hábitos cristalinos hexagonales y tabulares, estos cristales tienen un rango de diámetro de 3.5-12  $\mu\text{m}$ , los apatitos se encuentran ocasionalmente en la matriz de la muestra. En las Figura. 48 y 49 los cristales de apatitos se encuentran sombreados de color verde claro. En la Figura. 51 se observa el espectro de EDS característico de este mineral.
- **Cuarzo Microcristalino:** la forma de estos cristales tienden a ser anhedrales, y usualmente presentan bordes subredondeados. Estos cristales tienen diámetros  $<2 \mu\text{m}$  y suelen acompañar a los cristales de micritas y a los minerales arcillosos, este cuarzo micro o

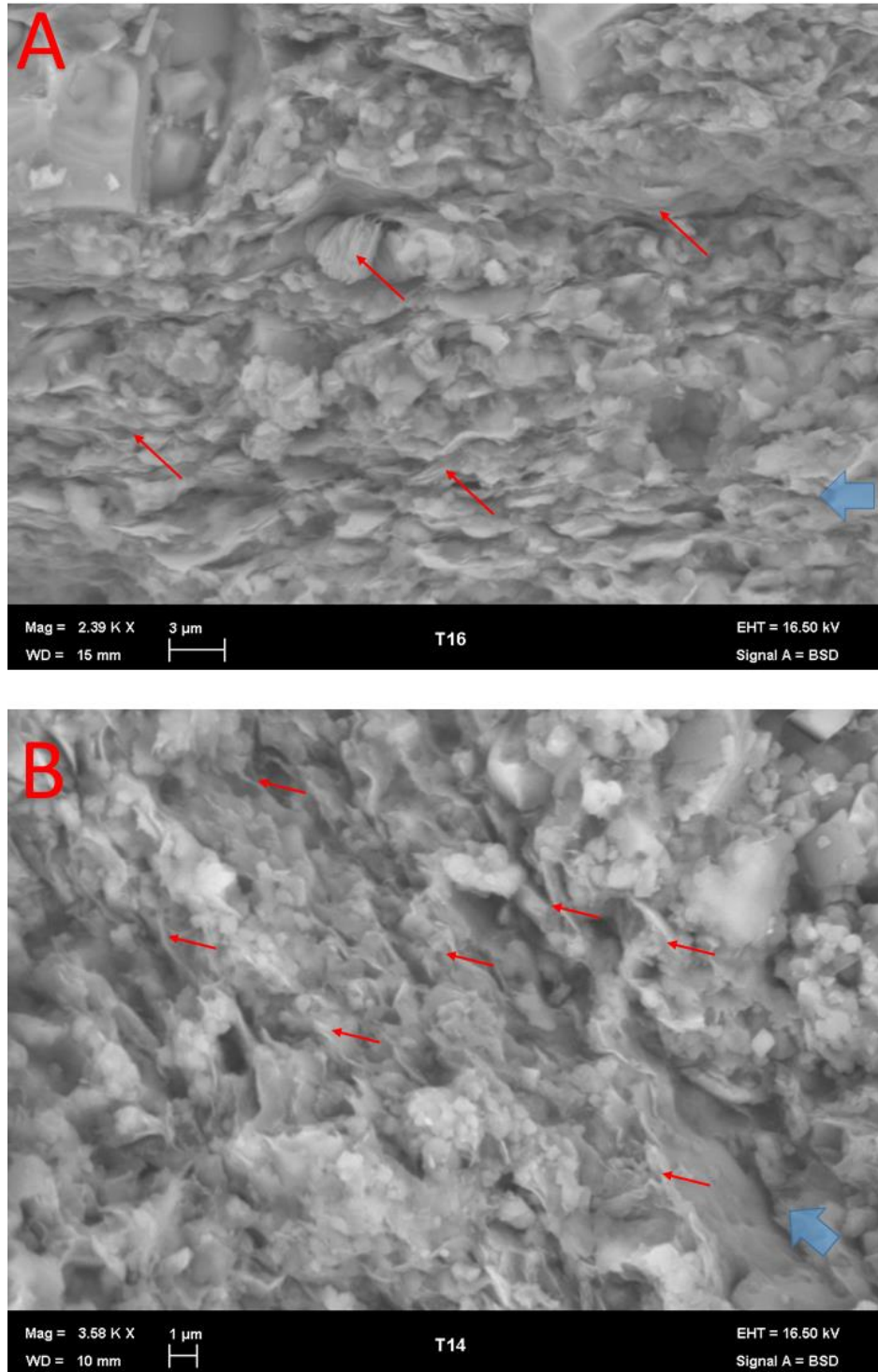
criptocristalino suele cumplir el rol de cemento igual que los minerales arcillosos. (Ver Figura. 46). En la Figura. 48. A. el cuarzo microcristalino se encuentra señalado por la flecha roja. En la Figura. 50. Se observa el cuarzo microcristalino junto a los minerales arcillosos.

En la Figura. 51 A y B se observa el espectro EDS cuyo punto de análisis se encuentra en la matriz específicamente en los minerales arcillosos, y su composición elemental predominante es el Si, Al, K, y O y en menor proporción se encuentra Ca y las anomalías de Ca se debe a las micritas que se encuentra adjuntas a estos minerales.



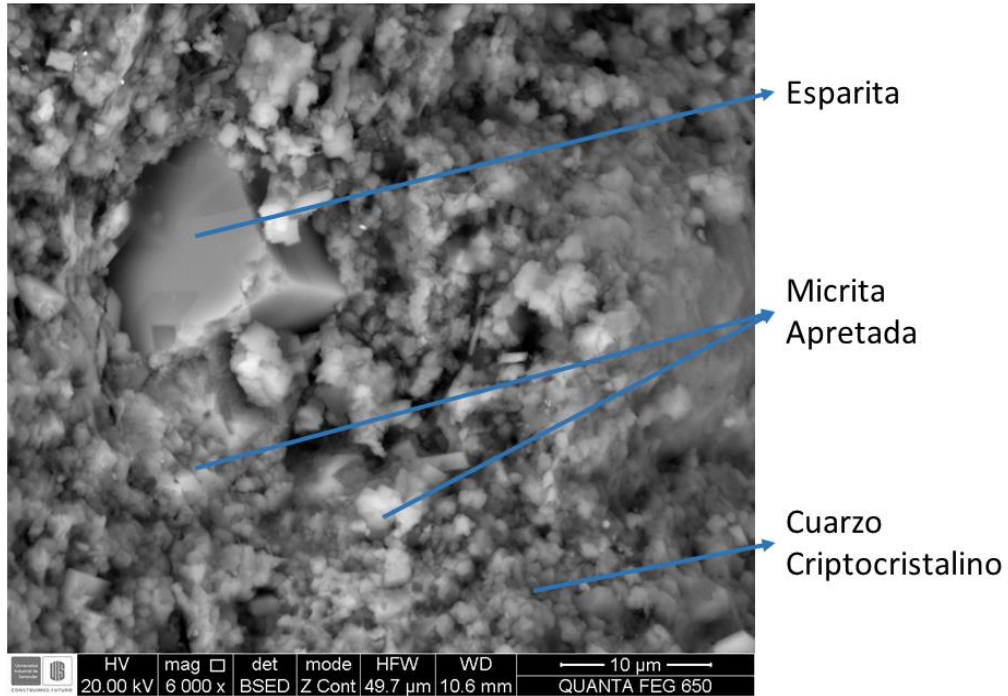
*Figura 44.* Mineral arcilloso en matriz de la Arcillolita calcárea.

Descripción: se observa el espectro EDS de la baritina siendo los elementos más importantes el S y Ba, la anomalía del Si, Al Ca, K y Mg puede deberse a la presencia de minerales arcillosos y cristales de micritas (matriz).



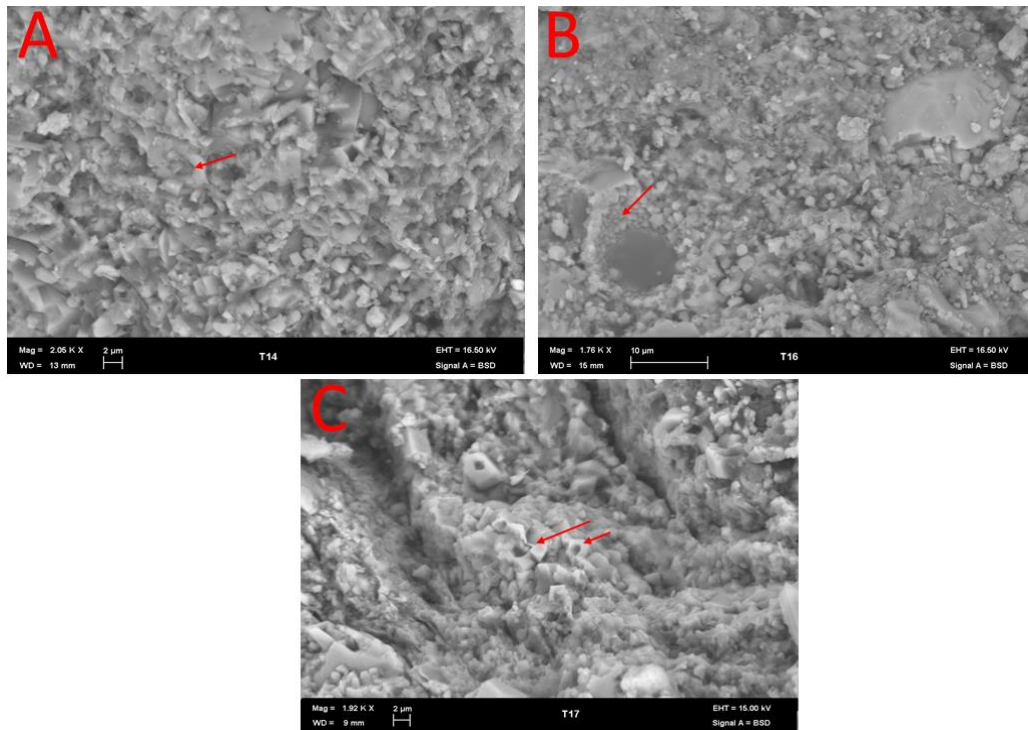
*Figura 45.* Microfábrica y orientación de los minerales arcillosos de arcillolitas calcáreas.

Descripción: en las microfotografías A y B se observa cómo se encuentran dispuestos los minerales arcillosos (Ver Flechas rojas), estos minerales arcillosos tienden a tener un arreglo de microfábrica tipo borde cara. La flecha azul va en la dirección preferencial de estos minerales arcillosos.



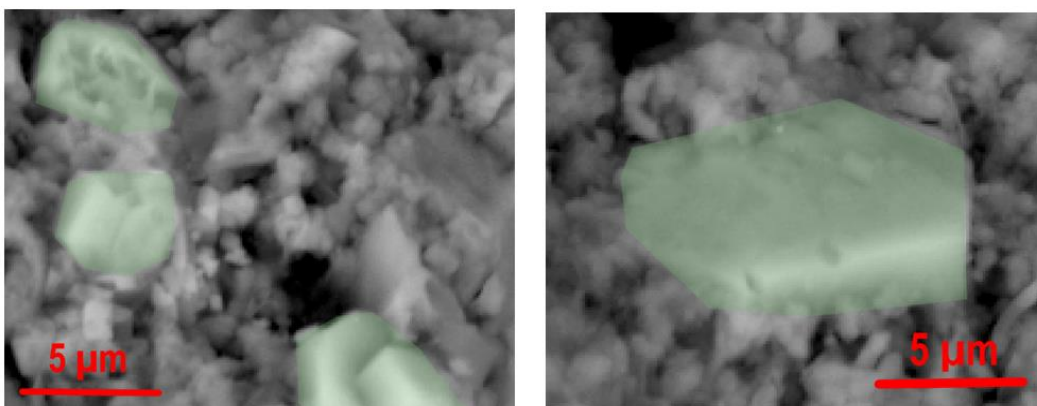
*Figura 46.* Cristales de esparita, micritas y cuarzo criptocristalino en Arcillolita calcárea.

Descripción: en la microfotografía se observa el cristal de esparita subhedral con hábito cristalino romboédrico, cristales de micritas subhedrales con hábito cristalino prismático triangular y los granos de cuarzo criptocristalino subredondeados.



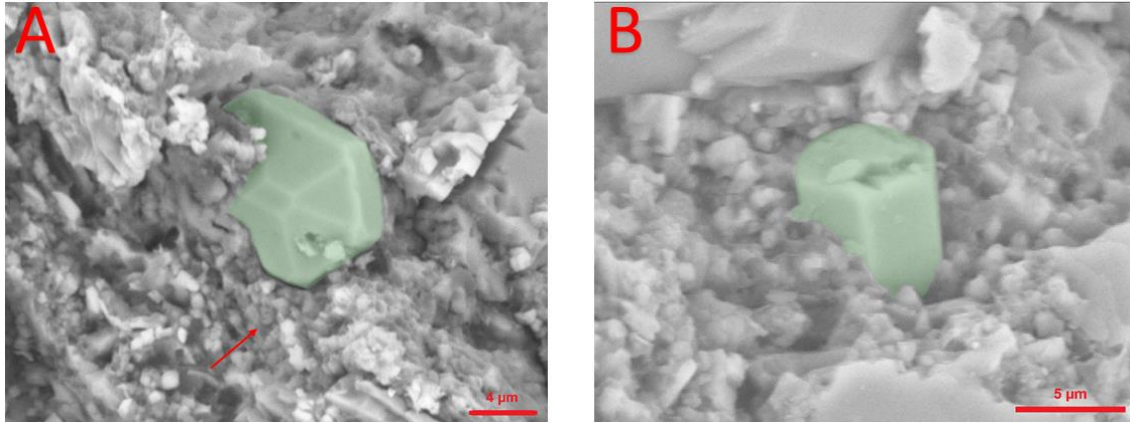
*Figura 47.* Cristales de Micritas en la matriz de la arcillolita Calcárea.

Descripción: A. se observa cristales de micritas subhedrales, la flecha roja señala un fragmento de cocolito. B. La flecha roja señala los cristales de euhedrales de micritas que son producto de la recristalización de un fragmento fósil. C. se observa cristales de subhedrales de micritas, la flecha roja señala fragmentos de cocolitos.



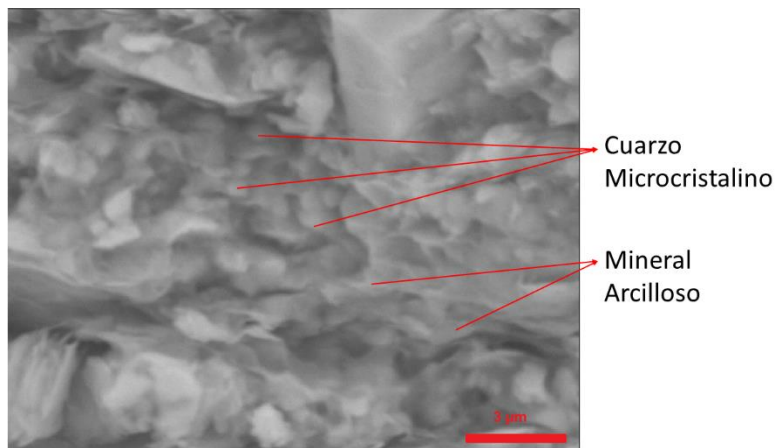
*Figura 48.* Cristales de apatitos en Arcillolita calcárea.

Descripción: en la microfotografía se observa los cristales de apatitos que están sombreados en verde claro, la forma de los cristales tiende a ser subhedrales y con un hábito cristalino hexagonal.



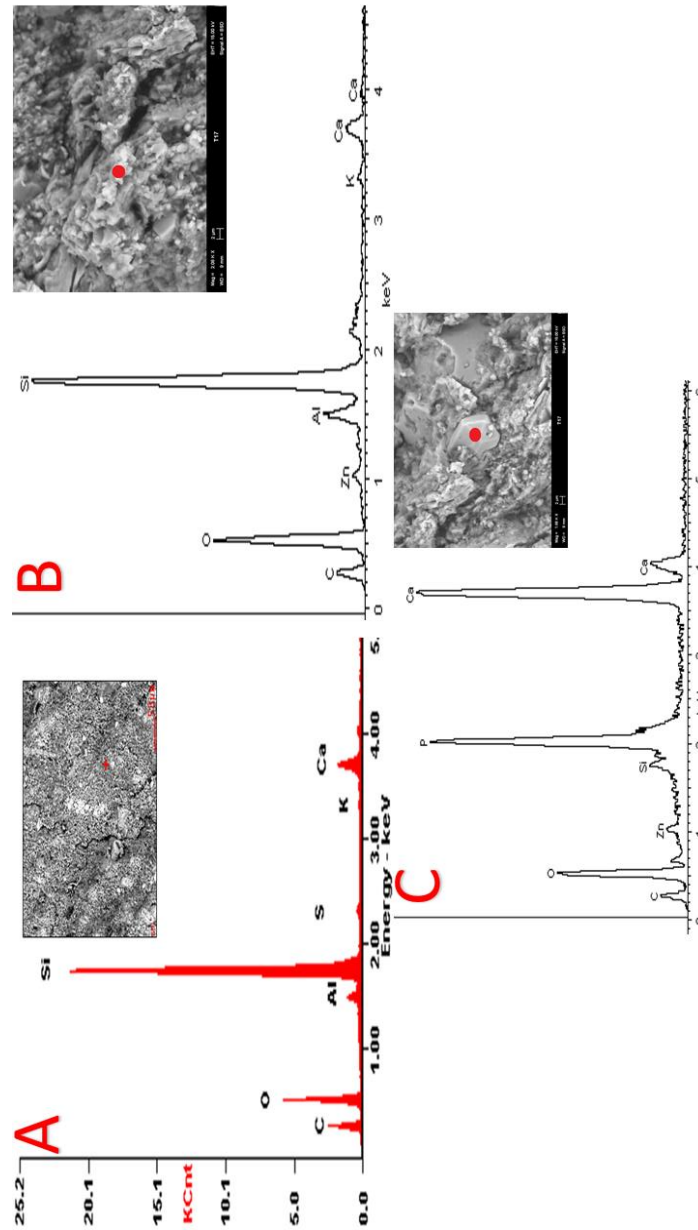
*Figura 49.* Cristales euhedrales de apatitos en Arcillolitas calcáreas.

Descripción: A. se observa el cristal de apatito euhedral sombreado de color verde, con una forma hexagonal. Nótese la flecha roja que señala a los granos de cuarzo microcristalino ( $< 2 \mu\text{m}$ ). B. se observa un cristal de apatito subhedral con una morfología tabular.



*Figura 50.* Cuarzo microcristalino y minerales arcillosos en arcillolitas calcáreas.

Descripción: Se observa cómo se encuentran distribuidos el cuarzo microcristalino con los minerales arcillosos



*Figura 51.* Espectro EDS cuyo punto de análisis es la matriz de la Arcillolita calcárea.

Descripción: Los espectros EDS A y B corresponden a los minerales arcillosos que se encuentran en la matriz de la muestra, los elementos predominantes son Si, Al, O y K. El espectro EDS C tiene como punto de objetivo un cristal de apatito, los elementos predominantes son Ca, P y O, y estos son coherentes con la fórmula química general de este mineral.

**Fragmentos de Fósiles Recristalizados.**

En las Figuras. 52 A. y B se puede observar en los polígonos de color azul y verde claro los fragmentos de fósiles ya recristalizados, se pueden inferir que la mayoría de los fósiles corresponden a fragmentos de cámaras de foraminíferos. Los tamaños de estos fragmentos de fósiles tienen un promedio de 196  $\mu\text{m}$ , con un rango de diámetro de 115-246  $\mu\text{m}$ . En las Figuras. 53 A, B y C se puede apreciar también la transición de estos fragmentos fósiles de foraminíferos comienzan a recristalizar en cristales euédrales de micritas e incluso se observa ocasionalmente a formar cristales de microesparitas. Cabe resaltar también como la materia orgánica solidificada toma la forma de una impresión de los fragmentos fósiles. Se observa también que presentan texturas de disolución.

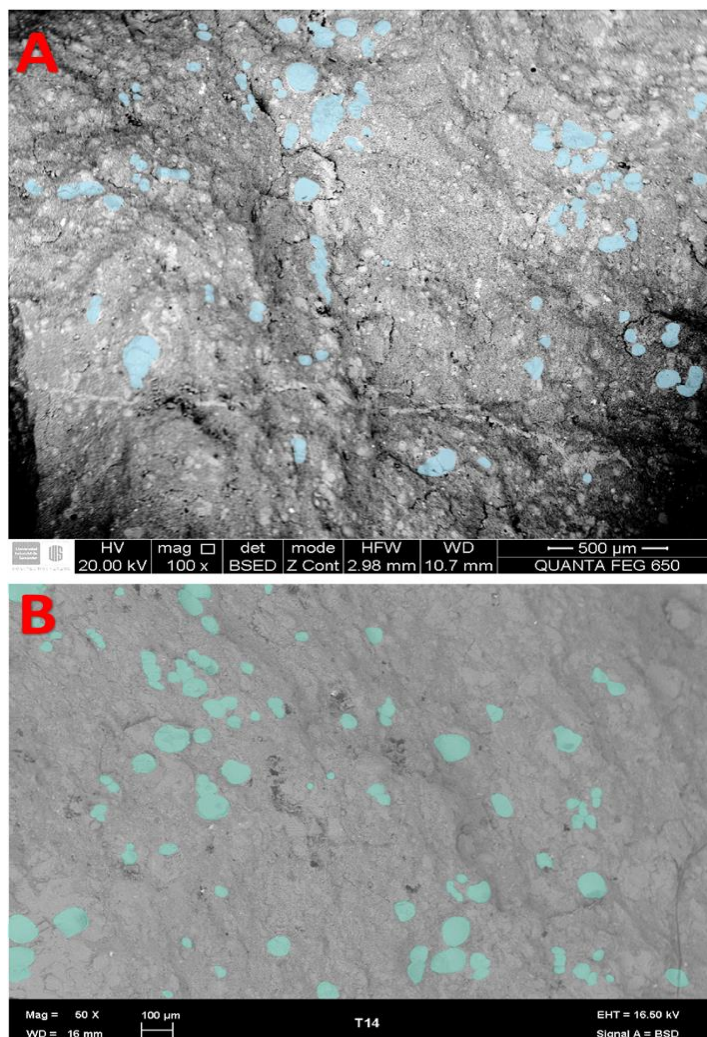
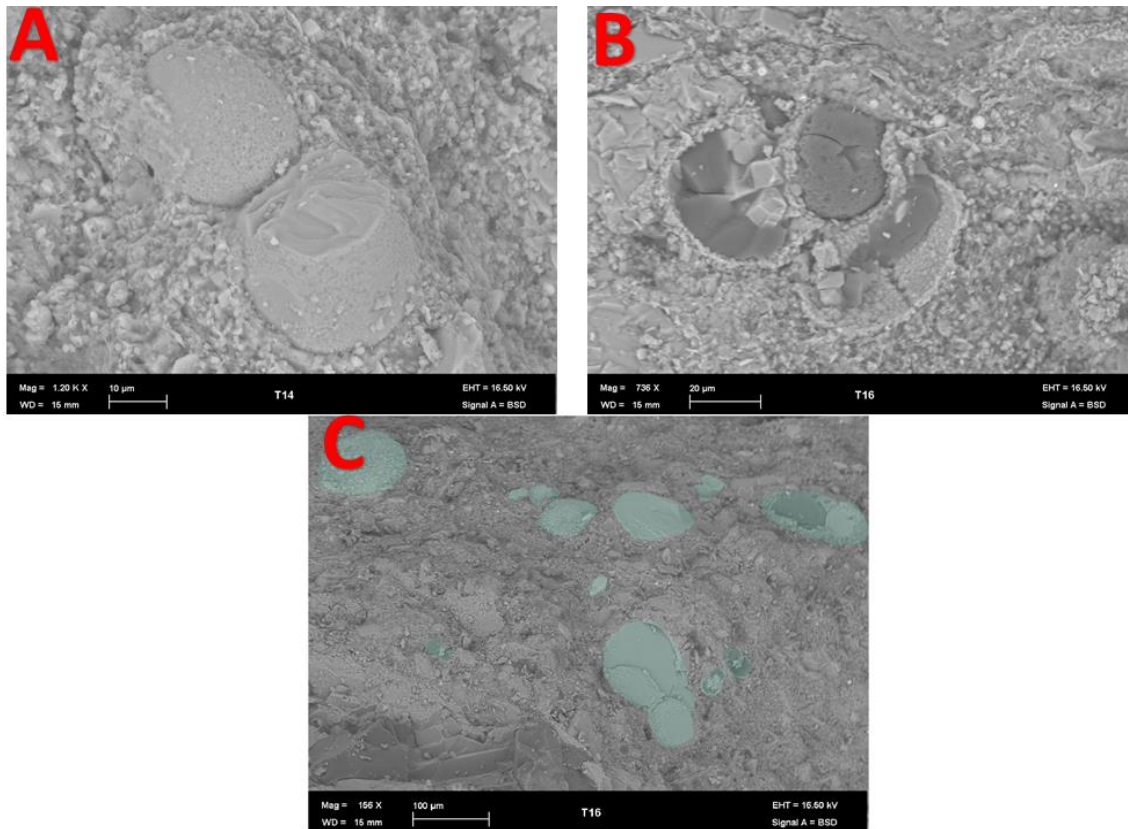


Figura 52. Fragmentos de Fósiles recristalizados en arcillolitas calcáreas.

Descripción: se observa en la microfotografía fragmentos de fósiles recristalizados sombreados de color azul claro. En su mayoría corresponden a cámaras de foraminíferos.



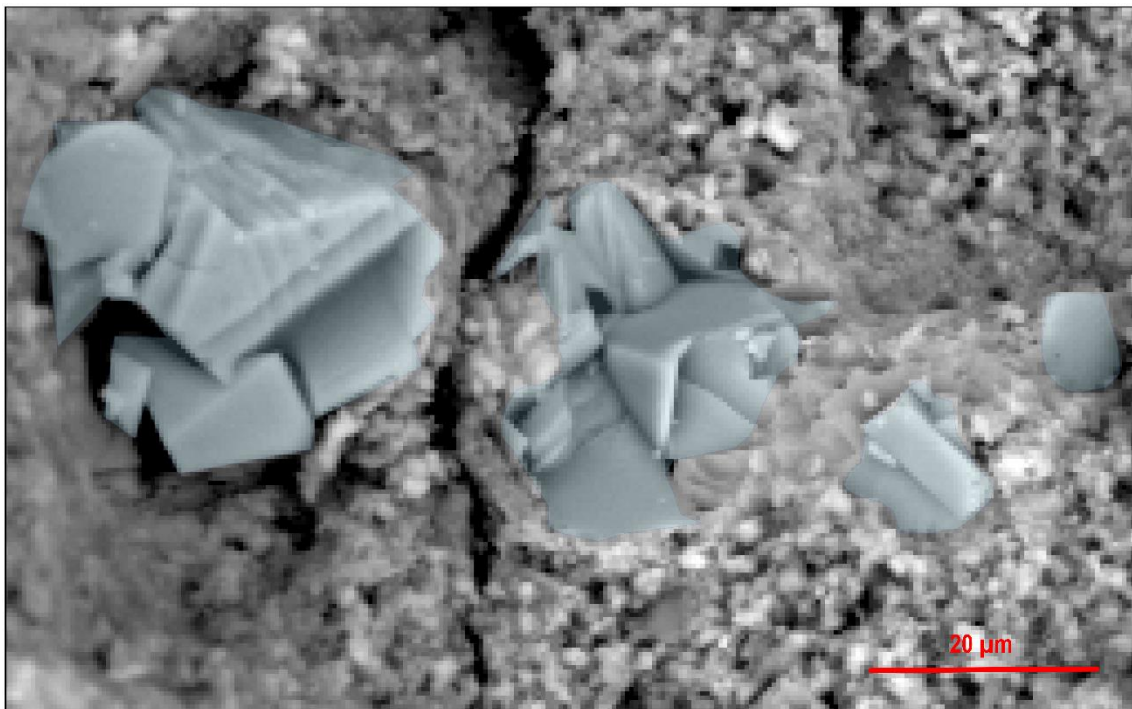
*Figura 53.* Fragmentos Fósiles recrystalizados en arcillolitas calcáreas.

Descripción: A. Se observa los fragmentos de conchillas de foraminíferos recrystalizadas y presentan además texturas de disolución. B. Fragmento fósil asociado a conchillas de foraminíferos el cual presenta la transición de recrystalización a cristales de micritas y también se observa que es rellena de materia orgánica y además preserva parcialmente el molde de la conchilla del foraminífero. C Se observa fragmentos fósiles recrystalizados sombreados de color verde claro.

### **Esparitas.**

Estas esparitas tienen una forma de cristal euédrico y subhedral, como se observa en la Figura. 38, los cristales tienen un rango de diámetro de 10-39 μm, con un promedio aproximado de 23 μm, los cristales de esparita presentan un hábito cristalino romboédrico y también prismático triangular, en la Figura. 54 se puede observar que estos cristales se encuentran sombreada de color azul claro. En esta imagen también se observa la matriz compuesta por cristales de micrita y cuarzo

microcristalino bordeando los cristales de esparita. En la Figura. 56. A. se muestra el espectro EDS cuyo punto de análisis es un cristal de esparita. La composición química elemental predominante es Ca, seguido por el Si y en menor proporción Al y Mg. El espectro EDS va de acuerdo con la composición elemental de la calcita, la anomalía de Si se puede deber a la presencia de minerales arcillosos que se encuentran rodeando a este cristal de esparita



*Figura 54.* Cristales de esparitas en la Arcillolita calcárea.

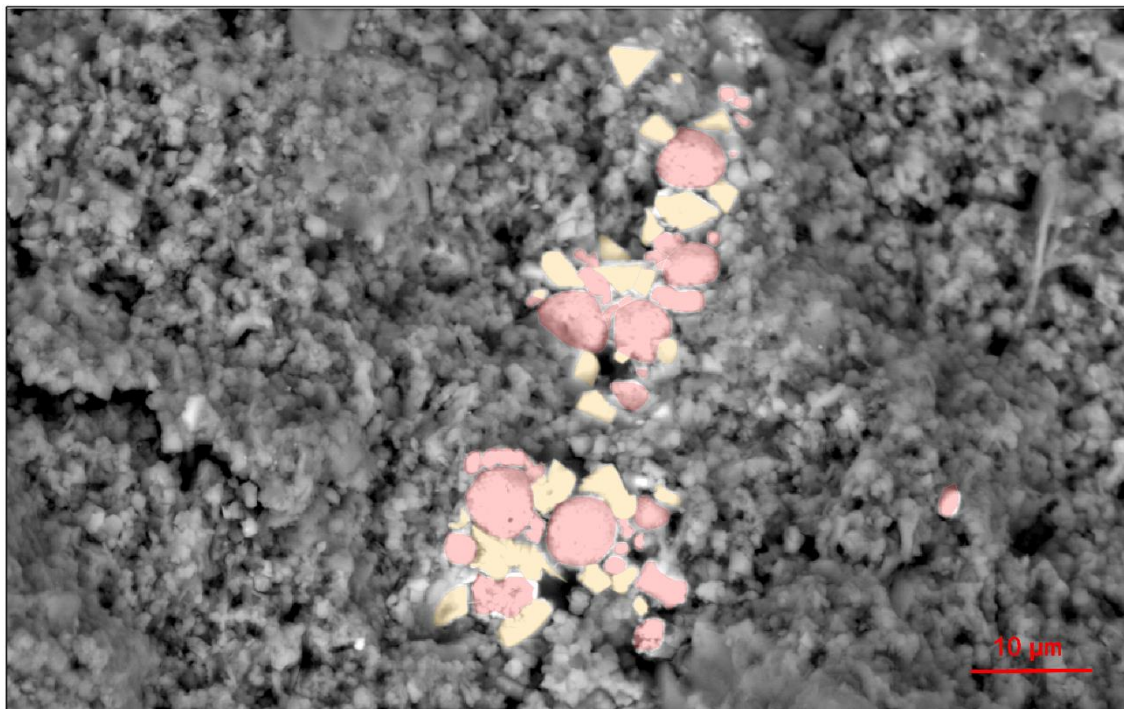
Descripción: en la microfotografía se observa los cristales de esparitas que tienden a presentar un hábito cristalino prismático triangular y romboédrico.

#### **Sulfuros (Piritas y/o Esfalerita).**

Los sulfuros presentes corresponden a piritas y esfaleritas, se reconocen por sus morfologías típicas (caso de piritas) y también se reconocen por su espectro EDS (caso de las esfaleritas). A continuación se describirán cada una:

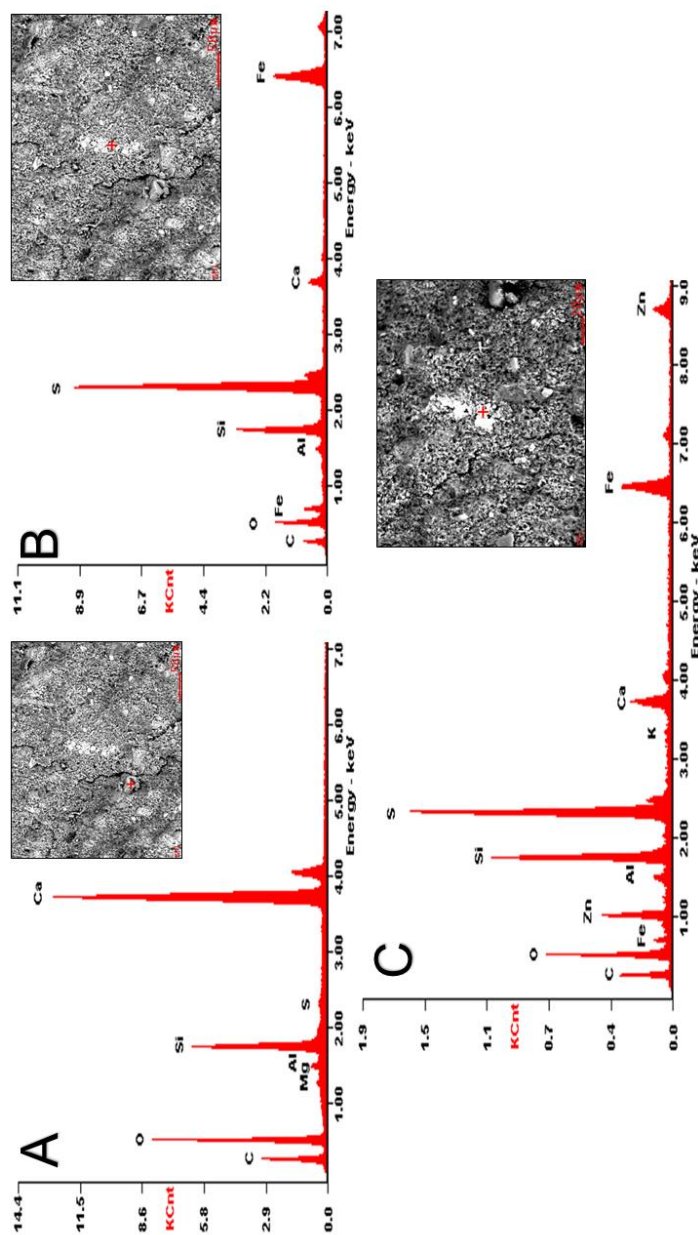
- irita: este mineral presenta cristales subhedrales a anhedrales el cual presenta hábito cristalino ovalado y también se presenta morfologías framboidales, el rango de diámetro de estas piritas es de 4.8 – 14.4  $\mu\text{m}$ , y tienen un diámetro promedio de 8.47  $\mu\text{m}$ . Las piritas suelen encontrarse como mineral accesorio dentro de la matriz de la muestra. en la Figura. 55 se observan las piritas sombreadas de color rojo claro. El espectro EDS tomado va de acuerdo con la fórmula química elemental de la pirita, las anomalías de Ca y Si se puede deber la matriz que se encuentra alrededor de estas piritas. (Ver Figura. 56).
- Esfalerita: este mineral presenta cristales anhedrales y subhedrales, tienden a presentar un hábito tetraédrico, su rango de diámetro es de 0.5-3  $\mu\text{m}$ . Suelen estar acompañando a las piritas framboidales y suele ser mineral accesorio sobre la matriz de la muestra. para su reconocimiento se requirió el espectro EDS. En la Figura. 55 se puede observar sombreados de color naranja claro los cristales de esfaleritas. Y en la Figura. 56 se puede ver el espectro EDS de las esfaleritas.

En este espectro EDS se puede observar también anomalías de Fe, Si, K, Ca y Al y esto se puede deber a la matriz (micritas, cuarzos criptocristalinos y/o minerales arcillosos) que se encuentra alrededor y la presencia de Fe se puede explicar por las piritas que se encuentra adjuntas a las esfaleritas.



*Figura 55.* Piritas y Esfaleritas en Arcillolitas Calcáreas.

Descripción: en la microfotografía se observa las piritas framboidales sombreadas de color rojo claro y las esfaleritas se encuentran sombreada de color naranja claro. Se logran diferenciar por sus morfologías y sus respectivos espectros EDS.



*Figura 56.* Espectro EDS de la Esparita, Pirita y Esfalerita en Arcillolita Calcárea.

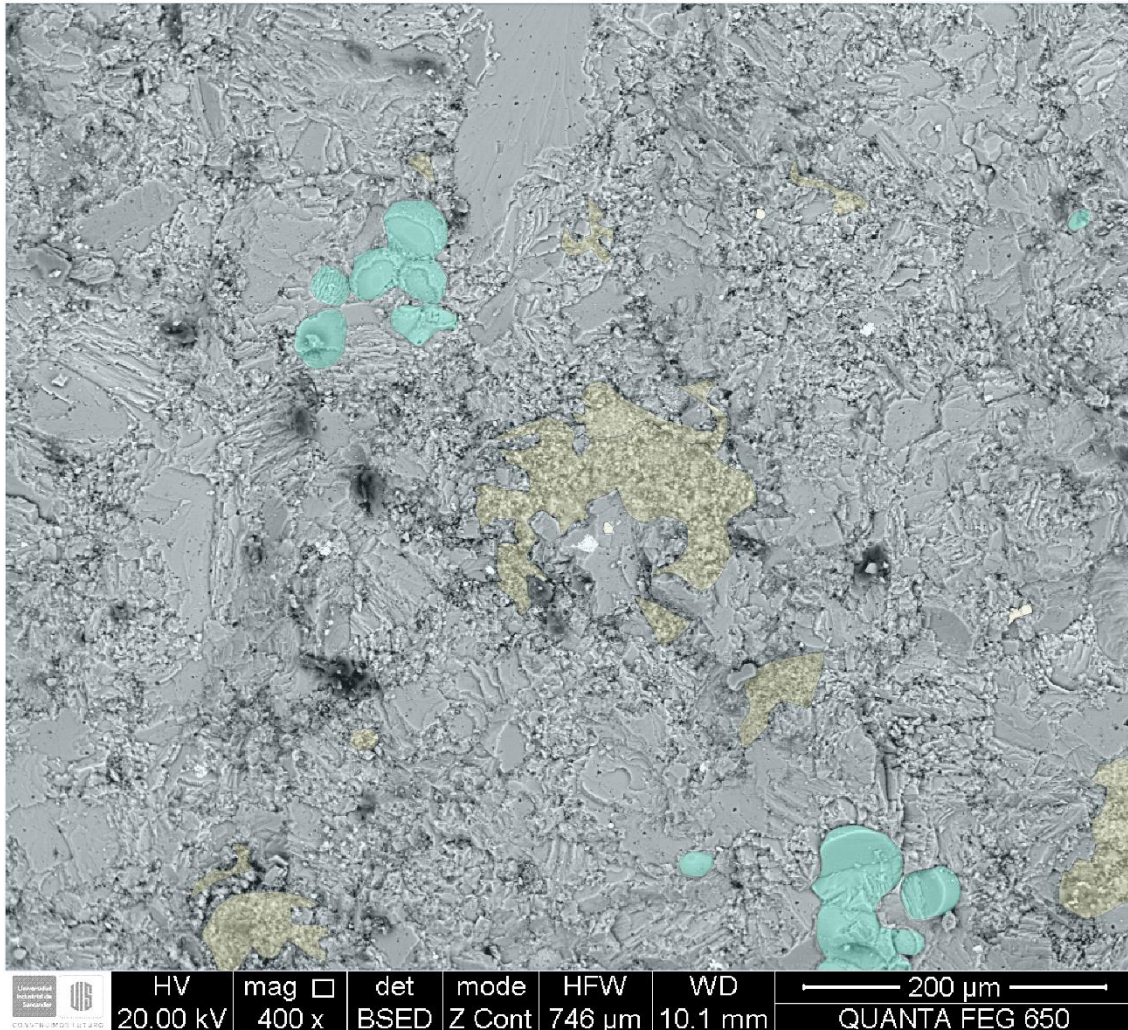
Descripción: A. se observa el espectro EDS de los cristales de esparita en el que predomina el Ca y presenta algunas anomalías de Si, Al y Mg que puede deberse a la matriz de la muestra. B. Se observa el espectro EDS de la pirita el cual predomina el S y Fe, también se observa anomalías de Si, Al y Ca y puede deberse a la composición de la matriz y C. se observa el espectro EDS de la esfalerita ya que predomina el S y Zn y presenta anomalías de Si, Ca, Al, K (composición de la matriz) y Fe debido a las piritas que se encuentran adjuntas.

**6.1.4 Esparita.** Esta litofacie se caracteriza por su alto contenido de micritas apretadas el cual predominan las de contacto tipo fusionada sobre las de tipo coalescente según la Clasificación de microtexturas micríticas de M. Deville de Periere et al. (2011). Los cristales de estas micritas tienden a ser subhedrales, se encuentran fragmentos de fósiles tipo foraminíferos recrystalizados, minerales accesorios tales como sulfuros y barita. La matriz está compuesta por micritas apretadas coalescentes junto a cuarzos microcristalino. Esta litofacie está compuesta principalmente por:

- Esparitas.
- Matriz (micritas y cuarzos microcristalinos).
- Fragmentos fósiles recrystalizados.
- Sulfuros (piritas y esfaleritas)
- Baritina (Barita).

#### **Esparitas.**

Las esparitas están conformados por cristales subhedrales y anhedrales, tienen un diámetro mínimo de 55  $\mu\text{m}$ . Estas esparitas presentan unos contactos entre ellas fusionados y generalmente casi indistinguible. En la Fig. 57 se puede observar los cristales sombreados en azul, anhedrales de esparitas. También es observado fragmento de fósiles recrystalizados, sombreados en color verde, se observa también materia orgánica solidificada, el cual se muestra como “parches” de color negro. Las esparitas son las más predominantes en toda la muestra. En la Figura. 62-B se puede observar el espectro EDS las esparitas, los picos más altos corresponden al Ca y en menor proporción a los picos de Si, Al y Mg que se puede explicar por la presencia de cuarzos microcristalinos.



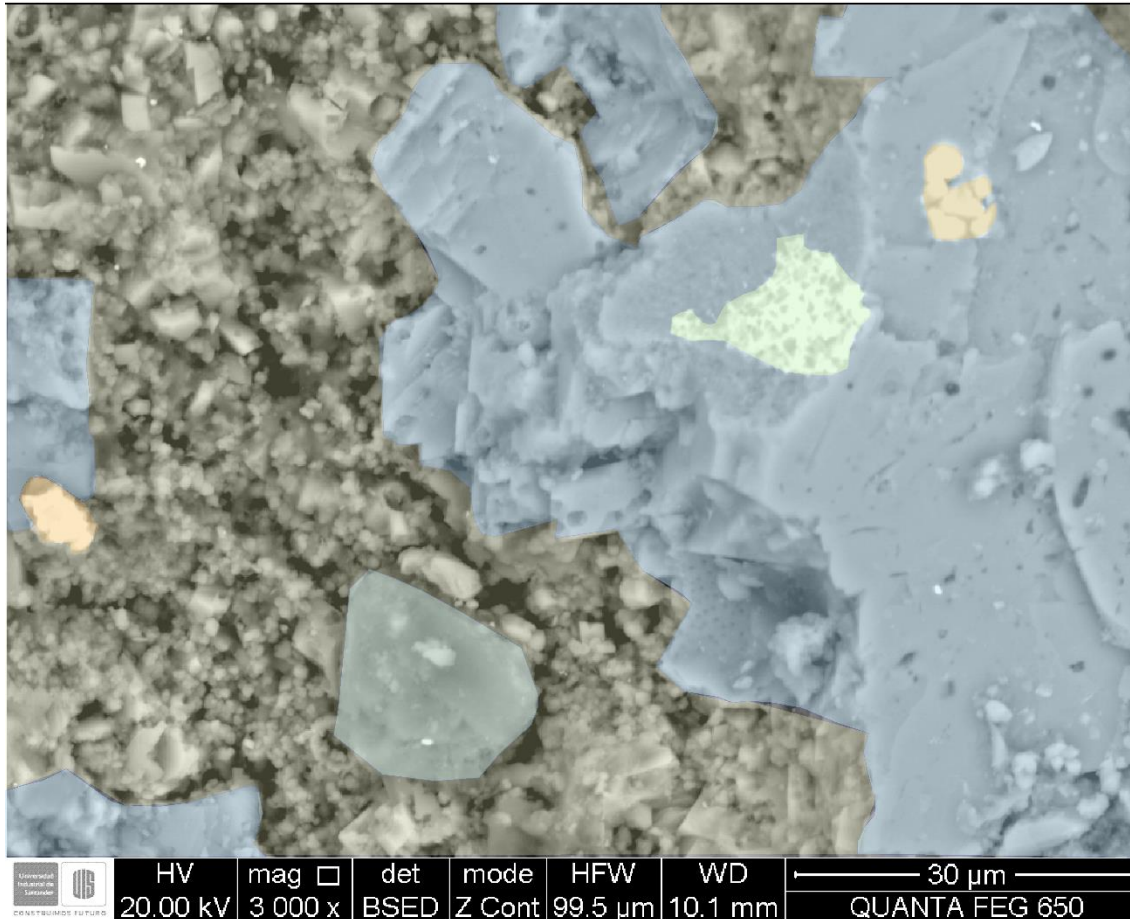
*Figura 57.* Cristales de esparitas en la esparita.

Descripción: los cristales de esparita se encuentran sombreados de color azul claro, puede evidenciarse que los contactos entre otros cristales son difusos y casi indistinguible. La matriz (micritas y cuarzo criptocristalino) se encuentra sombreada de amarillo y los fragmentos de fósiles recrystalizados se encuentran sombreados de color verde turquesa la mayoría de los fósiles corresponden a cámaras de foraminíferos. Nota: las “sombras” negras corresponden a materia orgánica solidificada

### **Matriz.**

La matriz está compuesta principalmente por micritas, cuarzo micro-cristalino y ocasionalmente minerales arcillosos. El cual hay un mayor predominio de la micrita sobre el

cuarzo-microcristalino. La forma de los cristales de micritas son subhedrales, bajo la *Clasificación de microtexturas micríticas, según M. Deville de Periere et al 2011*, estas micritas son clasificadas como micritas apretadas con contactos coalescentes entre ellos mismos. El rango del diámetro de estos cristales de micritas es de 3-9  $\mu\text{m}$  y con un promedio de tamaño de cristal de 5  $\mu\text{m}$ . Bordeando a las micritas se encuentra también cuarzo micro-cristalinos, su forma de cristal es anhedral, estos tienden a tener unos bordes sub-redondeados y sus diámetros de cristales es  $< 2 \mu\text{m}$ . Entre los contactos de estas micritas y cuarzos micro-cristalinos se observan algunos poros, que tienen un rango de diámetro de 0.7-6  $\mu\text{m}$ , con un promedio de 2.17  $\mu\text{m}$ . Los minerales arcillosos se presentan ocasionalmente bordeando a los granos de cuarzo-microcristalino y cristales de micritas. (Ver Figura. 58.)

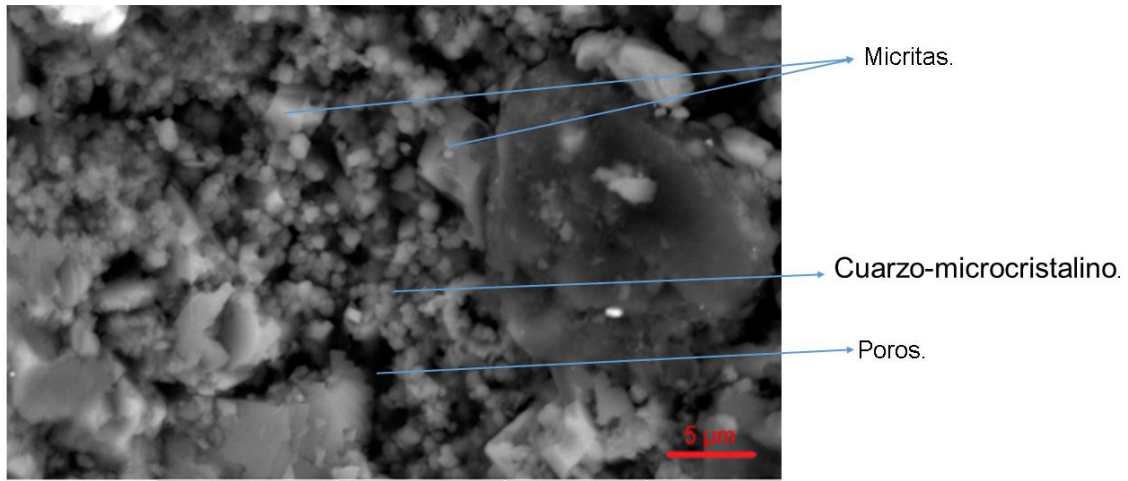


*Figura 58.* Matriz (micritas y cuarzo microcristalino) de la esparita.

Descripción: Se observa la matriz sombreada de color amarillo claro, el cual está compuesta principalmente por micritas y cuarzo criptocristalino, estos se pueden diferenciar por su morfología angulosa (micritas) y subredondeadas (cuarzo microcristalino). Las esparitas se encuentran sombreadas de color azul claro y suelen estar acompañadas por esfaleritas (sombra de color naranja) y de baritina (sombreado de color verde claro).

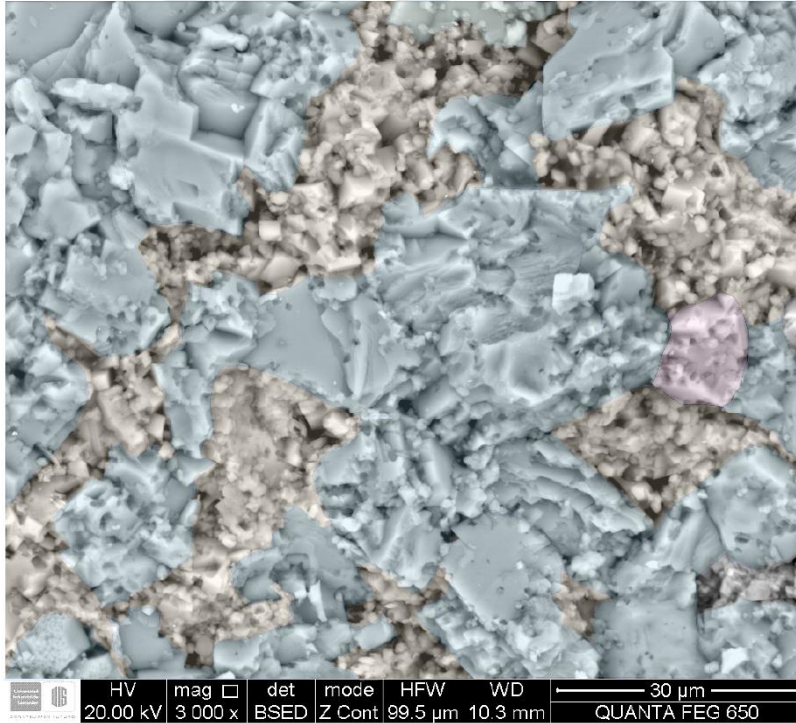
En la Figura. 59 se puede observar los cuarzos microcristalinos y las micritas, estos pueden ser diferenciados por las formas de los cristales de cada uno y además los cuarzos microcristalinos generalmente tienen los bordes sub-redondeados y tienden a tener a ser más pequeños que las micritas. Se puede observar también la presencia de poros, entre los contactos de los cristales de las micritas. . En la Figura. 60 se observa la matriz el cual se señala a partir de sombras de color

azul claro (esparitas), color amarillo claro (micritas y cuarzo microcristalino “matriz”) y de color morado claro (apatito).



*Figura 59.* Composición mineralógica predominante de la matriz de la Esparita.

Descripción: Acercamiento de la Figura. No. 39. Se observa con mejor detalle la forma de los cristales de los cuarzos micro-cristalinos y los cristales de micritas y también se señalan los poros que se forman entre los contactos de los cristales.



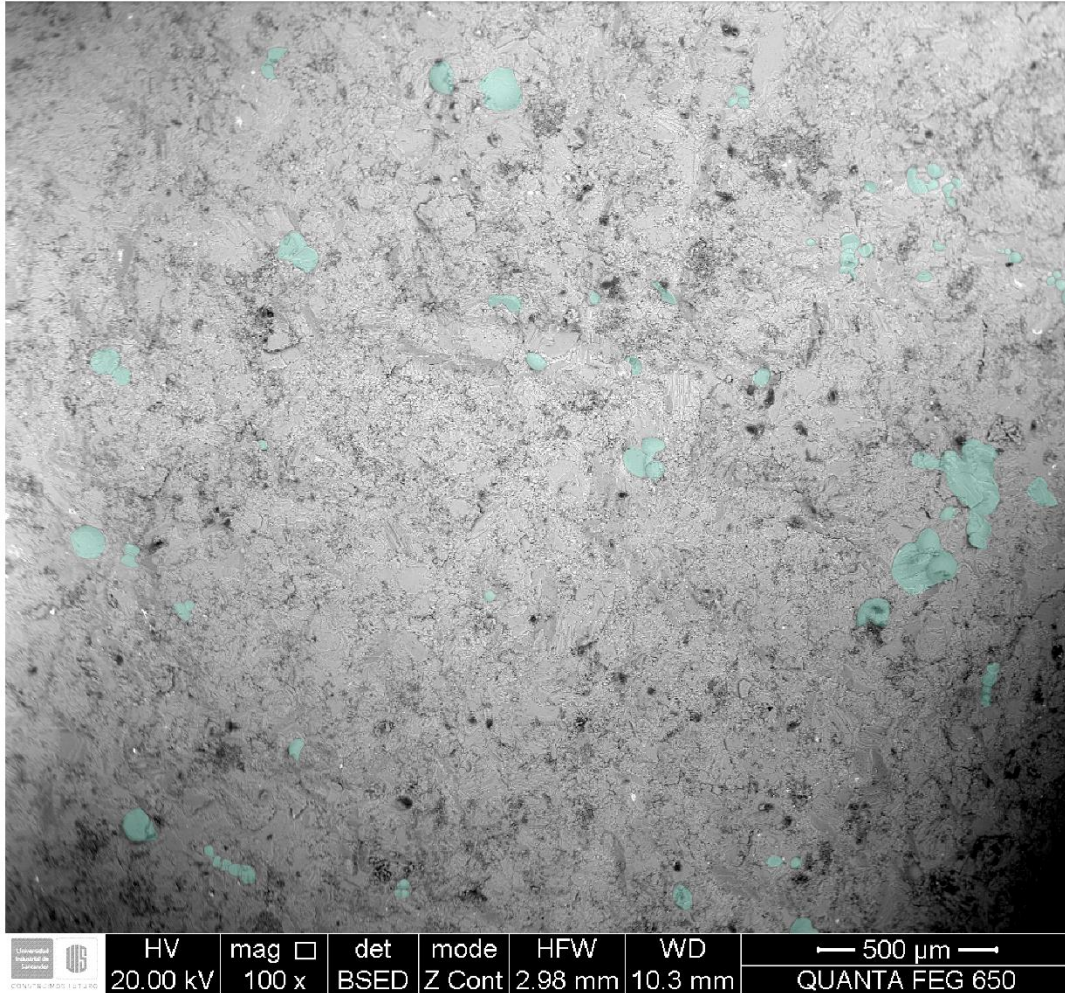
*Figura 60.* Cristales de esparitas, apatitos y matriz de la muestra de esparita.

Descripción: Se muestra sombreada las esparitas (Color Azul claro), la matriz compuesta por micritas y cuarzo microcristalino (Amarillo Claro) y apatito (Color morado claro)

En la Figura.62 A se observa el espectro EDS el cual su punto de análisis es en la matriz, y muestra una composición predominante de Si, Ca y en menor proporción Al y Mg. Con la ayuda del espectro se puede confirmar la presencia de cuarzo microcristalino y de las micritas

### **Fragmentos Fósiles.**

Los fragmentos fósiles encontrados tienden a estar re-cristalizados en carbonatos, y en gran mayoría corresponden a foraminíferos, en la Figura. 57 se puede observar sombreados de color verde claro. Estos fósiles tienen un rango de diámetro de 20-55  $\mu\text{m}$ , con un promedio aproximado de 34  $\mu\text{m}$ . En la Figura. 61 se puede observar estos fósiles sombreados de color verde claro.



*Figura 61.* Fragmentos fósiles recristalizados de la muestra de Esparita.

Descripción: Se observa los fósiles (sombreados verde claro) más sobre salientes de la muestra, el cual la mayoría son fragmentos de conchillas de foraminíferos recristalizados.

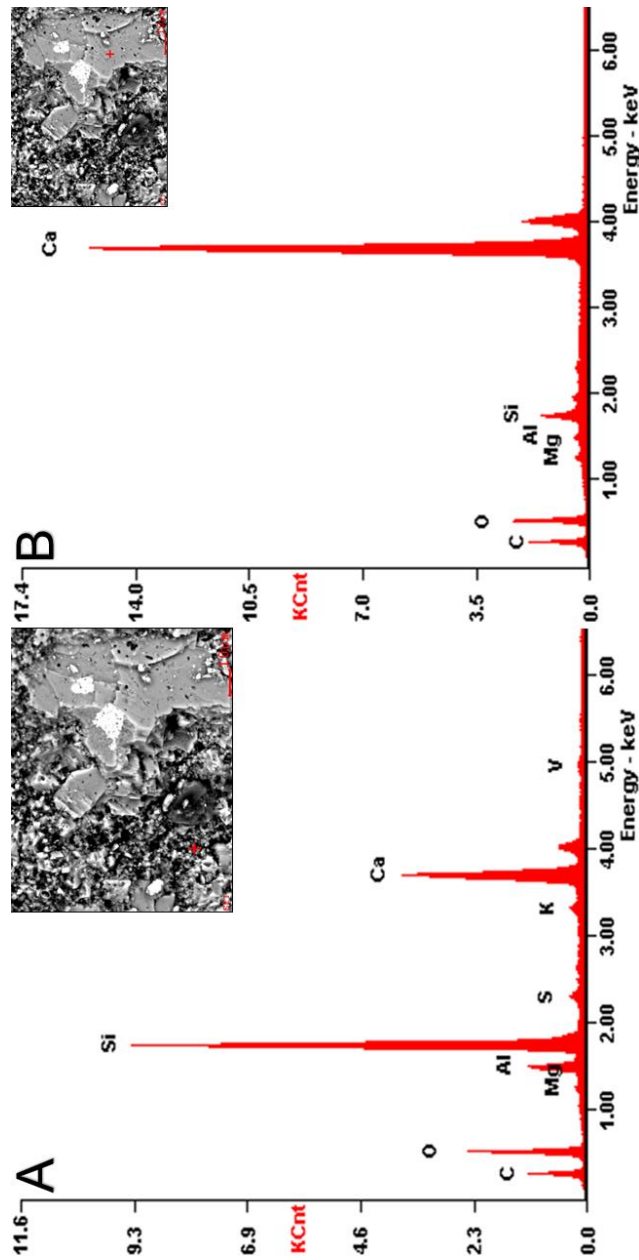


Figura 62. Espectro EDS de la matriz y de los cristales de esparita en la muestra esparita.

### Barita.

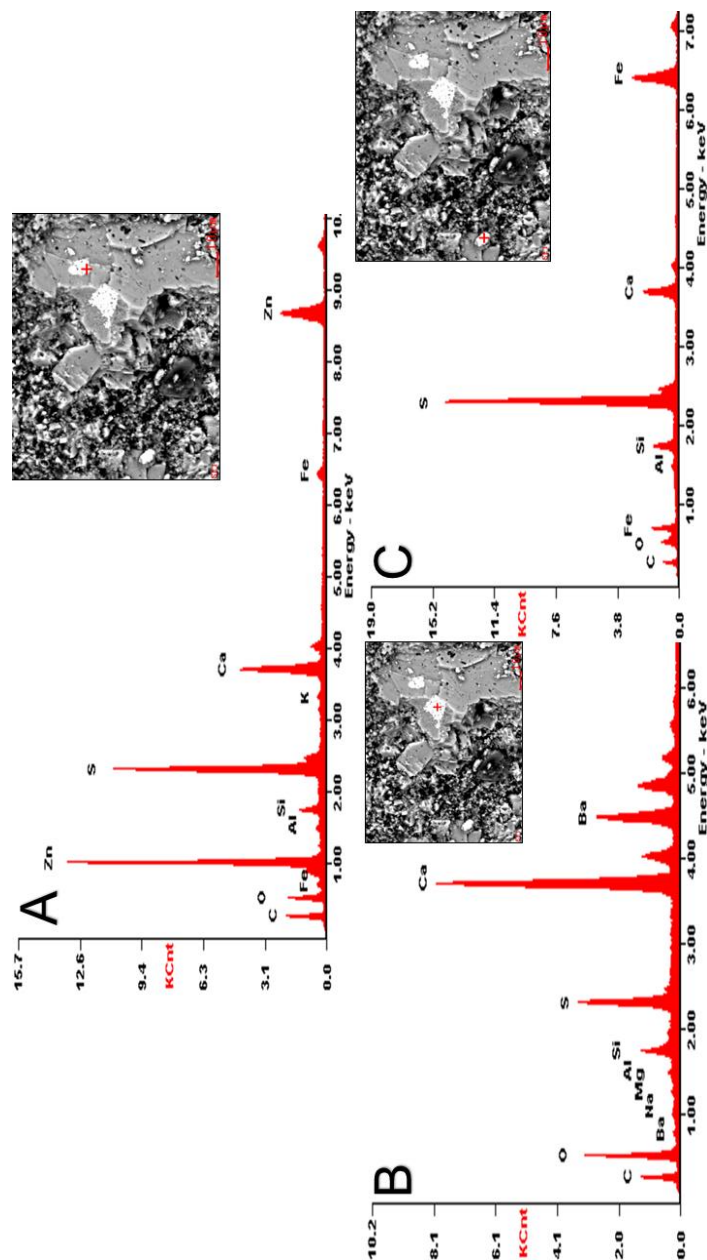
La barita está presente como un mineral agregado, el cual presenta una morfología de “enrejado” y es un mineral accesorio, en la Figura. 58 sobre un cristal de esparita, para su identificación se tuvo que recurrir al espectro EDS (Ver Figura. 63 B.), y se reconoce por su alto

contenido de S y Ba, siendo estos dos los elementos básicos de la fórmula química de la barita. El contenido de Ca se puede deber a la esparita que encuentra allí.

### **Sulfuros.**

En las microfotografías se puede observar dos tipos de sulfuros esfaleritas (blenda) y piritas, estas se pueden diferenciar a partir de sus morfologías y sus respectivos espectros EDS.

- Las esfaleritas presentan como agregados con morfologías angulosas y tienden a presentar un hábito tetraédrico. Tienen un rango de diámetro de 2-4  $\mu\text{m}$ . suele encontrarse sobre las esparitas, este mineral puede considerarse como mineral accesorio. (Ver Figura. 58). El espectro EDS muestra altos contenidos de S y Zn que corresponden a la fórmula química de este tipo de sulfuro, mientras que la anomalía de Ca se debe al cristal de esparita que se encuentra adjunto. En la Figura. 63.A se puede observar el espectro EDS de este tipo de sulfuro.
- Las piritas se encuentra esporádicamente como un agregado masivo y se encuentra generalmente sobre esparitas. En la Figura. 58 se puede observar los dos tipos de sulfuros, suelen estar sobre los cristales de esparitas y ocasionalmente sobre la matriz. En la Figura. 63. C se observa el espectro EDS de este tipo de sulfuro muestra altos contenidos de S y Fe que corresponden a la fórmula química de la pirita y la anomalía de Ca se puede deber a las micritas de la matriz.



*Figura 63.* Espectros EDS de la esfalerita, barita y pirita en la muestra de Esparita.

Descripción: A. Espectro EDS de la esfalerita, los picos de los elementos más sobresalientes son los del Zn, S, y los de menor proporción son Ca, Al y Fe. La esfalerita está representada con los picos de Zn y S, el cual va acorde con su fórmula química. Las anomalías de Ca se puede deber a la presencia de la esparita que se encuentra adjunto. B. Espectro EDS de la barita. Los picos de los elementos más sobresalientes son los del Ca, S y Ba, y los de menor proporción son Si. La barita está representada con los picos de S y Ba, el cual va acorde con su fórmula química. Las anomalías de Ca se puede deber a la presencia de la esparita que se encuentra adjunto. C. Espectro

EDS de la pirita. Los picos de los elementos más sobresalientes son los del S y Fe los de menor proporción son Ca, Al. Los picos de S y Fe van de acuerdo con la fórmula química de la pirita. Las anomalías de Ca se puede deber a la presencia de la esparita que se encuentra adjunto.

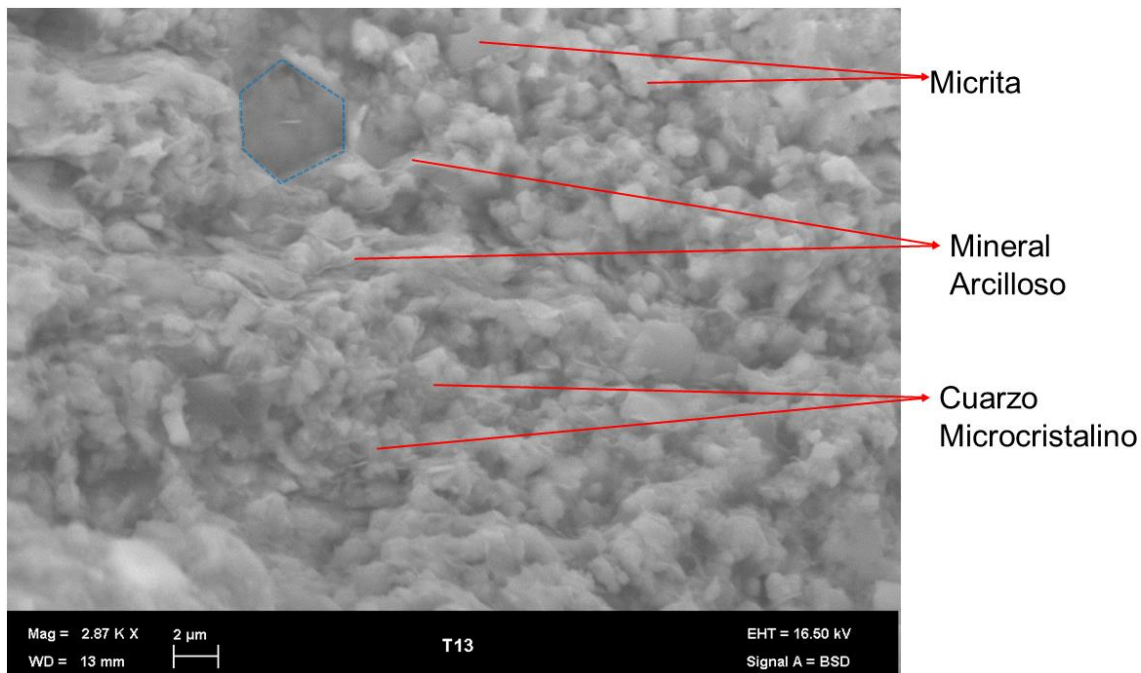
**6.1.5 Biomicroesparita Packestone.** Esta litofacies contiene un alto contenido de micritas, microesparitas y fragmentos fósiles recristalizados, en moderada proporción se observa cuarzo microcristalino junto a minerales arcillosos. Estos minerales son los minerales que componen la matriz de la muestra. En menor proporción se encuentran los minerales apatitos, barita y sulfuros. A continuación se describe cada uno por separado.

**Matriz (Micritas, Microesparitas, minerales arcillosos, cuarzo microcristalino).**

La matriz está compuesta principalmente por micritas y minerales arcillosos, cuarzo microcristalino, y apatitos (ocasionalmente), y esta matriz es la más predominante en toda la muestra. Los minerales más predominantes son:

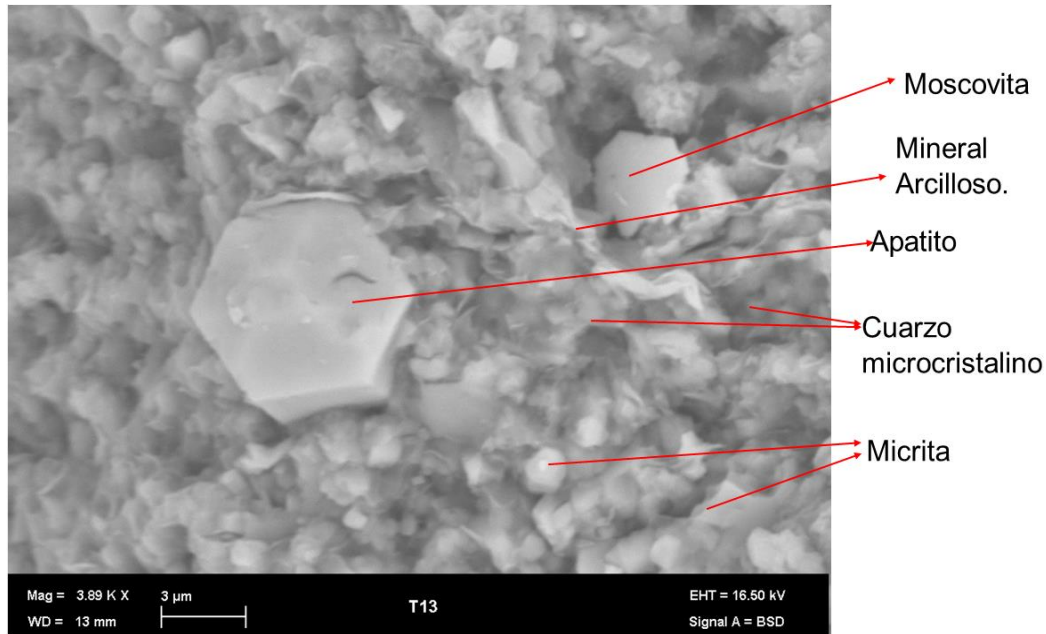
- **Micritas:** presentan una forma de cristal subhedral y anhedral. Estos cristales presentan unos contactos intercristalinos rectos y coalescentes. presentan un rango de diámetro de 2-6  $\mu\text{m}$  con un promedio aproximado de 3.5  $\mu\text{m}$ . En base a la clasificación de Folk (1974) y Flügel (2010) estas se clasifican como micritas y en base a la clasificación de Deville de Periere et al. (2011) se denomina micrita apretada, subhedral compacta. Ver Figura. 64 y 65.
- **Minerales Arcillosos:** estos minerales presentan una morfología de “cintas alargadas” que cumplen el rol de rellenar los poros y/o también como de cemento entre los cristales de micritas. En las Figuras. 64 y 65 se observa la distribución y la microfábrica de estos minerales arcillosos, es del tipo borde cara.

- Cuarzo Microcristalino: la forma de estos cristales suelen ser anhedrales, y generalmente presentan bordes subredondeados y algunas veces se observan subangulares. Estos cristales tienen diámetros  $< 2 \mu\text{m}$  y suelen estar juntos a los cristales de micritas y a los minerales arcillosos, este cuarzo microcristalino suele cumplir el rol de cemento igual que los minerales arcillosos. (Ver Figura. 64 y 65).



*Figura 64.* Componentes principales de la matriz en Biomicroesparita Packestone.

Descripción: en la microfotografía se observa la composición predominante en la matriz de la muestra. Se logra diferenciar los componentes por sus morfologías; las micritas tiende a tener aristas angulares y/o rectas, el cuarzo microcristalino tiende a ser subredondeado y los minerales arcillosos tienen una morfología tipo “cintas alargadas”, Nótese las líneas punteadas de color azul que señalan el molde de un cristal hexagonal de apatito.



*Figura 65.* Componentes principales de la matriz en Biomicrosparita Packestone.

Descripción: en la microfotografía se observa las morfologías de los minerales arcillosos (Cintas alargadas), los cristales de micritas que tiende a ser subhedral con unas aristas angulosas, el cuarzo microcristalino que presenta unos cristales subredondeados. Se observa también un cristal de apatito hexagonal euédrico y también se observa una lámina de moscovita que se logra identificar también con su espectro EDS.

### **Apatito.**

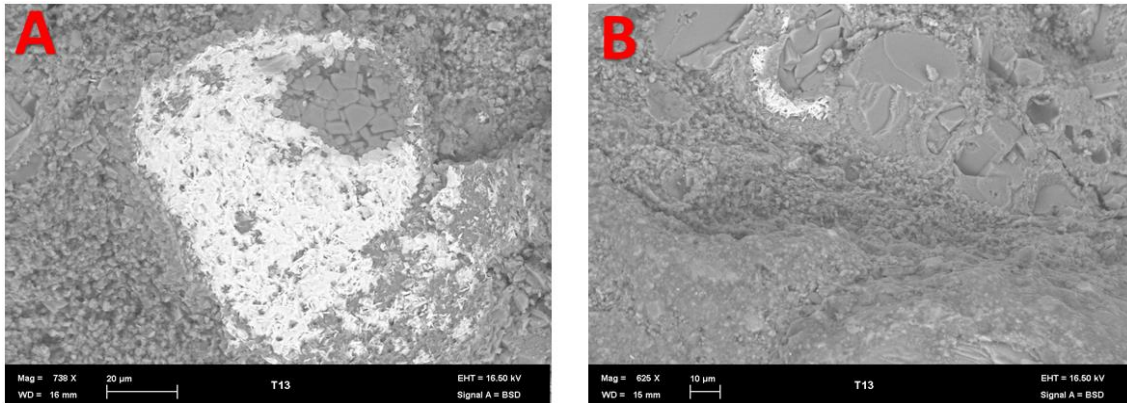
En la Figura. 65. Se el cristal de apatito, que tiende a ser y presenta hábitos cristalinos hexagonales., los tamaños de estos cristales tienen un rango de diámetro de 7-8  $\mu\text{m}$ . Usualmente los cristales de apatitos se encuentran como mineral accesorio dentro de la matriz de muestra.

### **Moscovita.**

En la Figura. 65 se alcanza a observar esta mica que tiene forma de cristal euédrico y con un hábito cristalino tipo laminar. El diámetro de esta mineral es de 3.5  $\mu\text{m}$ . Esta mica se logra identificar con mayor certeza a partir de su espectro EDS (Ver Figura. 69).

**Barita.**

En la Figura. 66 A y B se puede observar la barita el cual suelen bordear a fragmentos de fósiles, y se considera como mineral accesorio.

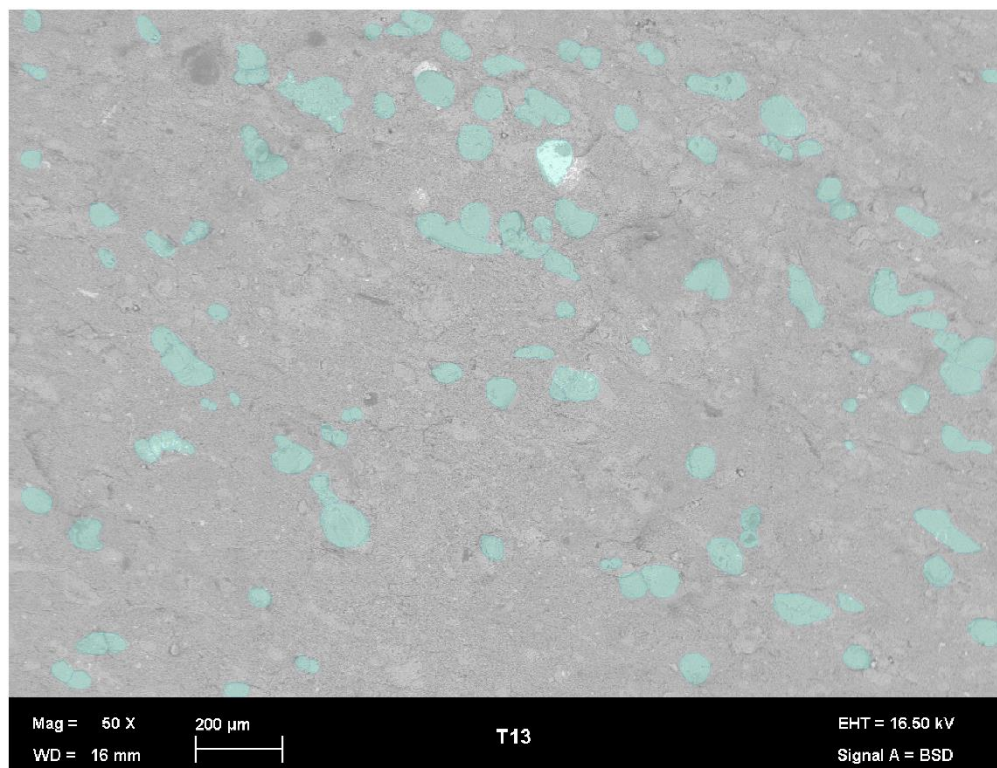


*Figura 66.* Baritina en la Biomicrosparita Packestone.

Descripción: en las Figuras A y B, se puede observar la barita recubriendo parte interna y externa de fragmentos fósiles recristalizados.

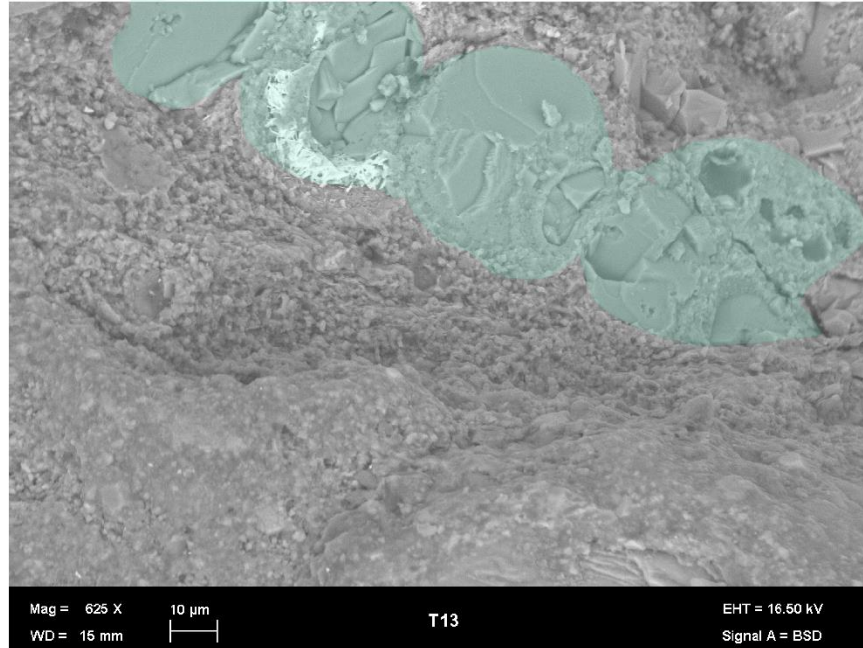
**Fragmentos Fósiles recristalizados.**

Se puede observar fragmentos de fósiles, el cual se asocian a los fragmentos y cámaras de los foraminíferos. Se pueden observar en las Figuras. 67 y 68 se muestran sombreadas de color verde claro. Los diámetros de estos fragmentos de fósiles tienen un rango de 50-200  $\mu\text{m}$ . En la figura también se observa un acercamiento de la microfotografía. En la Figura. 68 se puede observar también fragmentos fósiles recristalizados y cabe notar que algunos poros son rellenados por materia orgánica solidificada.



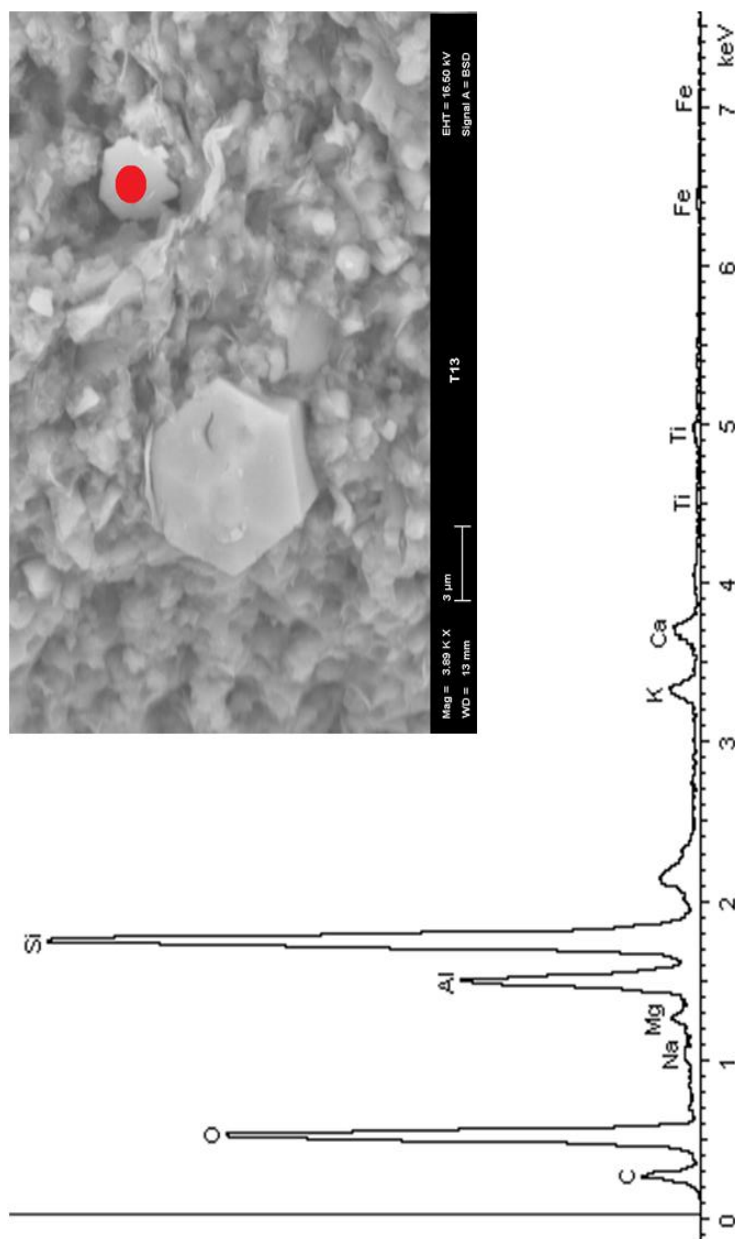
*Figura 67.* Fragmentos fósiles recristalizados en bioturbadas Packstone.

Descripción: se sombrea de color azul claro los fragmentos fósiles más sobresalientes de la muestra. La mayoría de estos fragmentos recristalizados pertenecen a cámaras de foraminíferos.



*Figura 68.* Fragmento fósil recristalizado en bioturbada packstone.

Descripción: Se observa el fragmento fósil sombreado de color verde claro, se puede apreciar como la barita bordea la parte exterior de una de las cámaras del fósil y también como la materia orgánica solidificada rellena los poros generados dentro del fósil.



*Figura 69.* Espectro EDS de la mica Moscovita en biomicroesparita packestone.

Descripción: se observa el espectro EDS de la moscovita cuyo elementos predominantes son Si, Al, O, K y en menor proporción Mg, Ca y Fe.

## 6.2 Análisis de Difracción de Rayos X (XRD o DRX).

Los análisis realizados por medio de la difracción de rayos X (DRX) tienen como objetivo determinar los minerales arcillosos y la fracción mineral de tamaño  $< 4 \mu\text{m}$  que componen al Miembro Galembo de la Formación La Luna. Las muestras que fueron analizadas pertenecen a la litofacie de arcillolita calcárea, ya que por medio de la microscopia de barrido (SEM) se pudo observar que hay una mayor proporción de dichos minerales en comparación a las demás litofacies. En total se analizaron 4 muestras.

Los procedimientos de preparación realizados para cada muestra fueron 3; el “air dried” o secado a temperatura ambiente, el de atmosfera de etilenglicol y la de calcinado a  $500^{\circ}\text{C}$ . A partir de estos procedimientos se puede observar las variaciones en los difractogramas de algunos minerales arcillosos, logrando identificarlos. Se realiza estos análisis para hacer un reconocimiento cualitativo de los minerales arcillosos y si hay otra fase mineral también poder reconocerlas.

A partir de la información recopilada a partir de Moore & Reynolds, R (1997), y el manual de laboratorio para difracción de rayos X de Poppe, V. et al, (2001) se muestra la Tabla No. 4 con los minerales arcillosos y otras fases minerales observadas a partir de los difractogramas. También se podrán observar con mayor detalle en Anexos B.

Tabla 4.

*Fases minerales más sobresalientes con sus respectivos picos.*

		<b>Pico 001</b>	<b>Pico 002</b>	<b>Pico 003</b>
<b>Illita</b>	2 $\theta$	8,824 $\approx$ 8,826	-	26,657 $\approx$ 26,674
	d	10,0 Å	-	3,34 Å
<b>Caolinita</b>	2 $\theta$	12,384 $\approx$ 12,400	-	-
	d	7,13	-	-

		Pico 100	Pico 011	Pico 104
<b>Calcita</b>	2 $\Theta$	-	-	29,450 $\approx$ 29,464
	d	-	-	3,029 $\approx$ 3,030
<b>Cuarzo</b>	2 $\Theta$	20,880 $\approx$ 20,898	26,657 $\approx$ 26,674	-
	d	4,247 $\approx$ 4,250	3,33 $\approx$ 3,34	-

Descripción: en esta tabla se presentan las fases minerales más representativas de las muestras analizadas. En la tabla se puede observar el rango de 2 $\Theta$  en que se encuentra cada fase mineral y el valor de d que corresponde a cada una.

#### Illita.

Este mineral se reconoce principalmente por los picos 001 y 003, como se observa en la Tabla No. 4 además en las Figuras. 70, 71, 72 se pueden observar los picos 001 y 003 de la illita el cual es señalado en el recuadro de color rojo se observa que los difractogramas de “air dried”, el de etilenglicol y el de la calcinada no se observa algún cambio significativo. En la Figura. 73 se observa solamente el pico 003. También se tiene en cuenta que en el pico 003 presenta una interferencia con el pico 011 del cuarzo.

#### Caolinita.

Este mineral es identificado por el pico 001, como se observa en la Tabla. 4. La caolinita se alcanza a identificar gracias a la comparación de los difractogramas de “air dried” con respecto a la calcinada. En las Figuras. 70, 71 y 72. Se observa los picos de las caolinitas en los recuadros de color azul claro. Debido a que la caolinita al someterse a temperaturas superiores a 550° C esta se vuelve amorfa y en los difractogramas de calcinada desaparece el patrón de difracción del pico 001 como en este caso.

### Calcita.

Esta fase mineral es identificada a partir del pico *104* (Ver Tabla. 4), que se encuentra en el rango de  $2\theta$   $29,450 \approx 29,464$  en el cual es muy predominante en la muestra. Los picos en los difractogramas de “air dried”, la de etilenglicol y calcinada no presenta grandes variaciones en los difractogramas. En las Figuras 70, 71 72 y 73 se alcanza a observar en los recuadros de color verde.

### Cuarzo.

Esta fase mineral es identificada por los picos *100* y *011* (ver Tabla. 4). Cabe notar que el pico *011* interfiere con el pico *003* de la illita. Los picos de los difractogramas no representan grandes cambios con respecto al “air dried”, la de etilenglicol y la calcinada. Las Figuras. 70, 71 72 y 73 se observan los picos señalados con el recuadro amarillo.

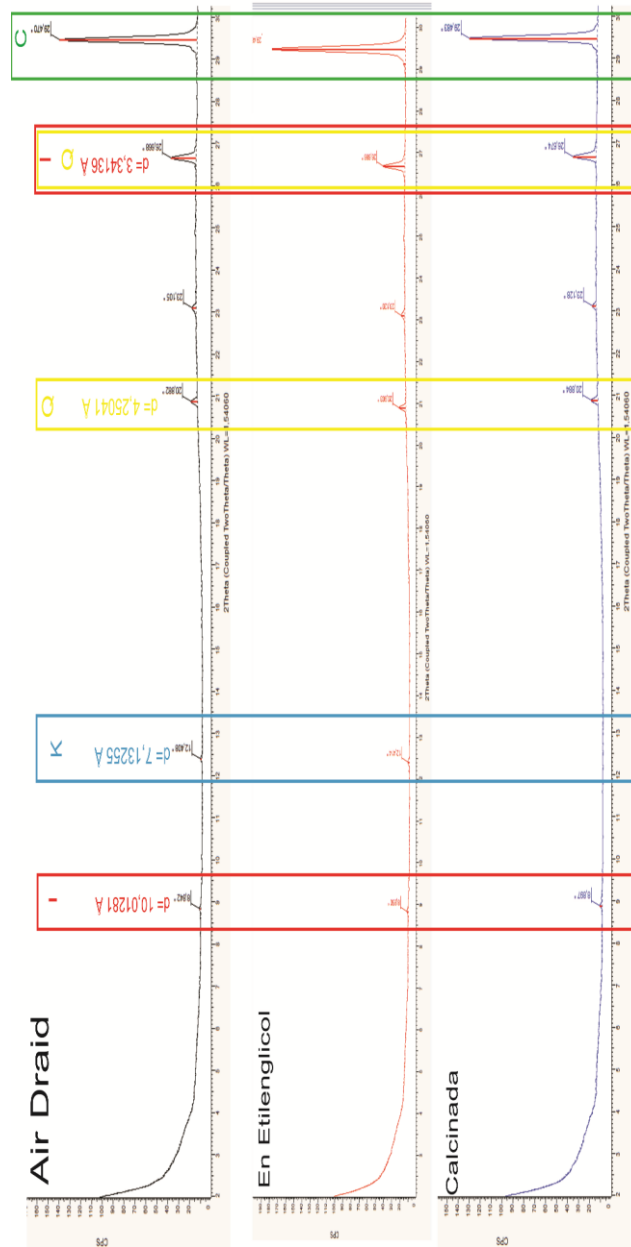
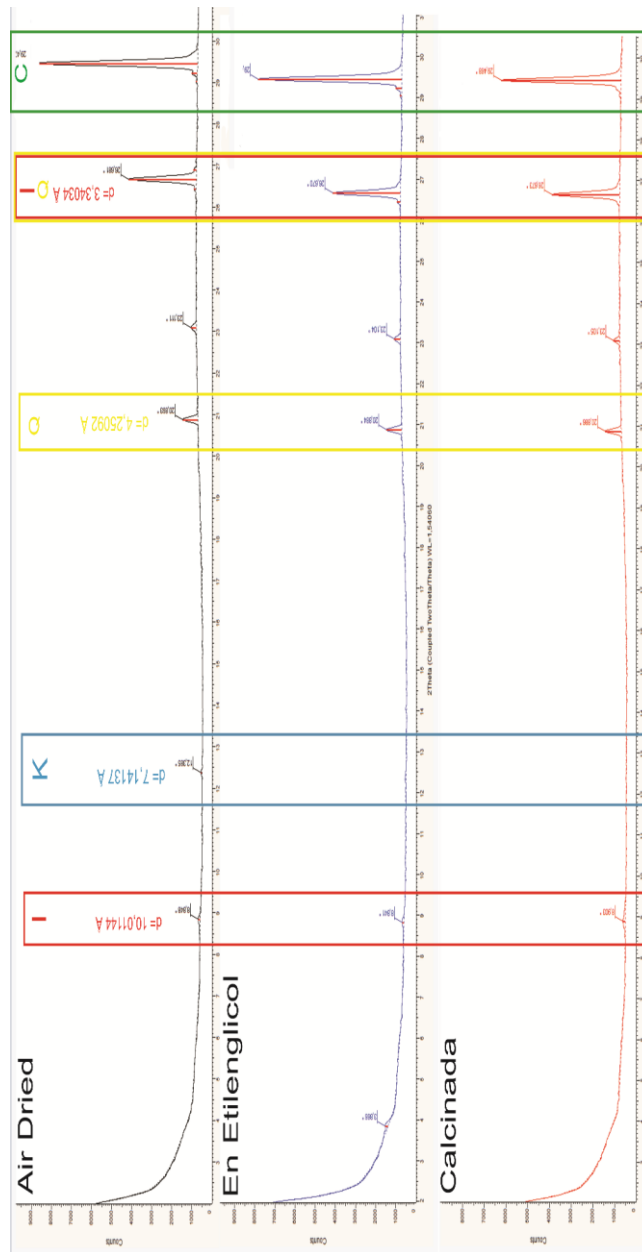


Figura 70. Difractograma de DRX de la litofacie arcillolita calcárea.

Descripción: en la figura se muestra los 3 difractogramas (“Air Dried”, “etilenglicol” y la “Calcinada”) de una muestra de lodolita calcárea. Las fases minerales principales están señaladas con los recuadros de color rojo (illita), Azul (caolinita), amarillo (cuarzo) y Verde (calcita)



*Figura 71.* Difractograma de DRX de la litofacie arcillolita calcárea.

Descripción: en la figura se muestra los 3 difractogramas (“Air Dried”, “etilenglicol” y la “Calcinada”) de una muestra de lodolita calcárea. Las fases minerales principales están señaladas con los recuadros de color rojo (illita), Azul (caolinita), amarillo (cuarzo) y Verde (calcita).

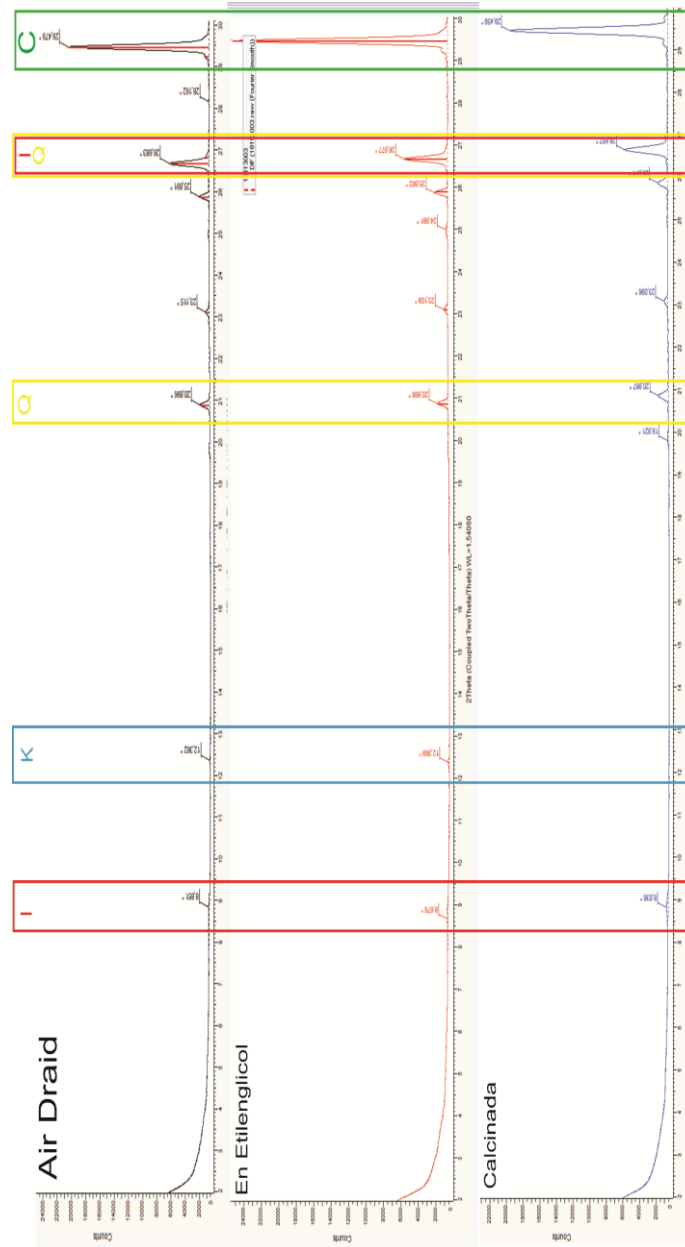


Figura 72. Difractograma de DRX de la litofacie arcillolita calcárea.

Descripción: en la figura se muestra los 3 difractogramas (“Air Dried”, “etilenglicol” y la “Calcinada”) de una muestra de lodolita calcárea. Las fases minerales principales están señaladas con los recuadros de color rojo (illita), Azul (caolinita), amarillo (cuarzo) y Verde (calcita).

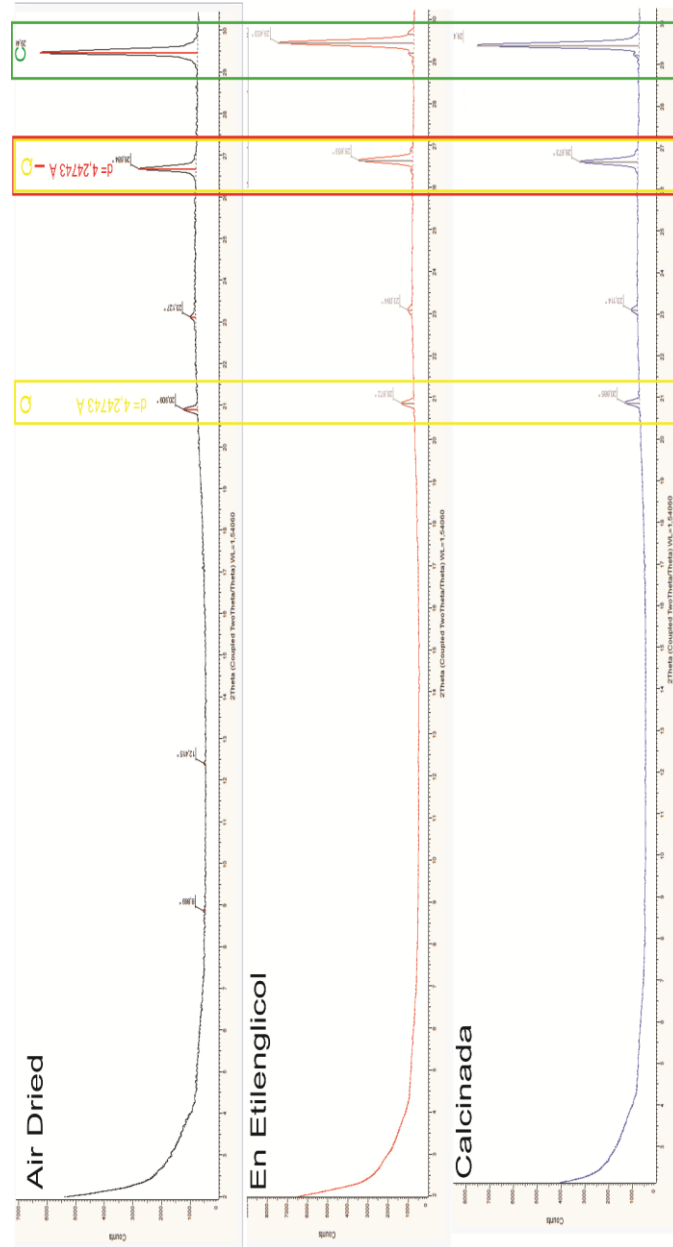


Figura 73. Difractograma de DRX de la litofacie arcillolita calcárea.

Descripción: en la figura se muestra los 3 difractogramas (“Air Dried”, “etilenglicol” y la “Calcinada”) de una muestra de lodolita calcárea. Las fases minerales principales están señaladas con los recuadros de color rojo (illita), amarillo (cuarzo) y Verde (calcita).

**6.2.1 Índice de Cristalinidad.** Ya identificados los minerales arcillosos presentes en las muestras se puede determinar el índice de Kübler a las illitas y el índice de cristalinidad de la caolinita, para así determinar, a que profundidad se generó las illitas y también saber de forma cualitativa que tan lejos se encontraba el área de aporte de sedimentos a la cuenca. Para determinar FWHM se utiliza el software de Diffrac.eva

Índice de Kübler.

Para determinar este índice se mide el FWHM del pico 001 de la illita, se realizaron dichas medidas en 2 muestras diferentes pertenecientes a la litofacilidad de lodolita calcárea. En las Figuras. 74 y 75, se puede observar que los valores correspondientes a FWHM son 0.102 y 0.196.

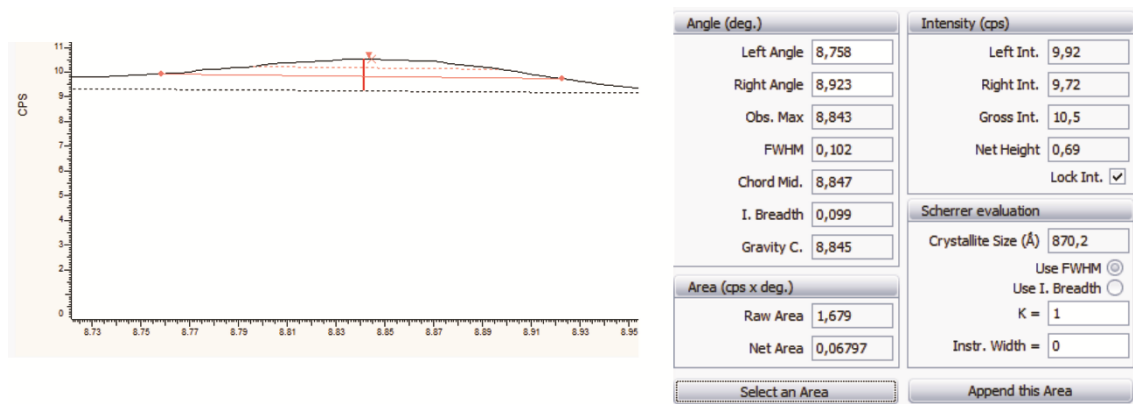


Figura 74. Medida del FWHM del pico 001 de la illita.

Descripción: se observa la interfaz del software diffrac.eva mostrando los valores y parámetros como el FWHM y entre otros.

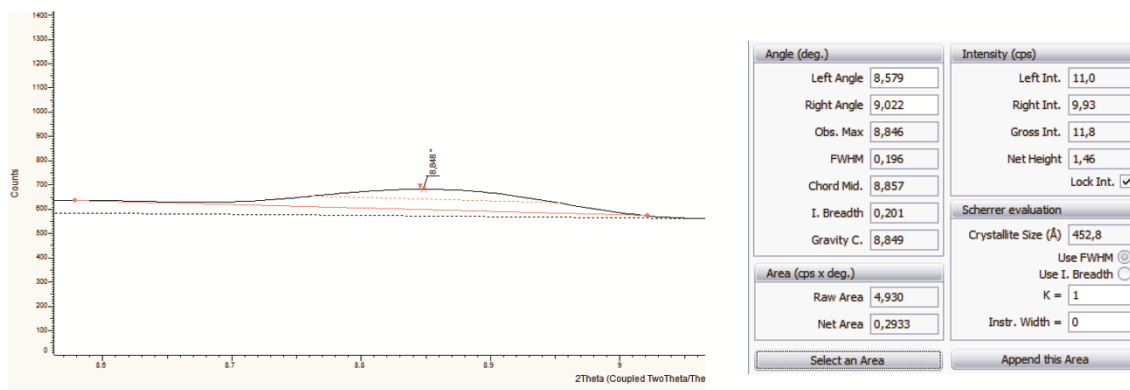


Figura 75. Medida del FWHM del pico 001 de la illita.

Descripción: se observa la interfaz del software diffrac.eva mostrando los valores de FWHM entre otros.

Índice de cristalinidad de la caolinita.

Para determinar este índice se mide el FWHM del pico 001 de la caolinita, se realizaron dichas medidas en 2 muestras diferentes pertenecientes a la litofacies de lodolita calcárea. En las Figuras.76 y 77, los valores correspondientes al FWHM son 0.119 y 0.122

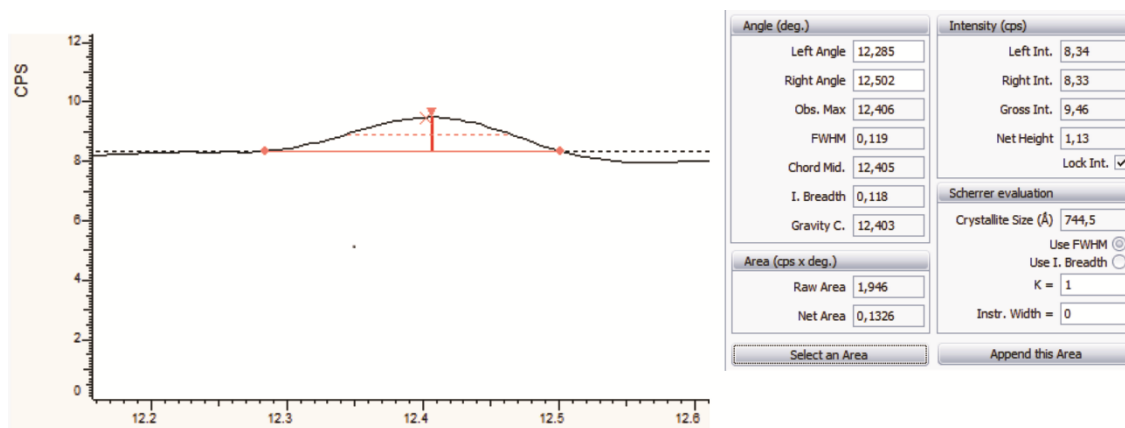


Figura 76. Medida del FWHM del pico 001 de la Caolinita.

Descripción: se observa la interfaz del software diffrac.eva mostrando el pico 001 de la caolinita y mostrando los principales parámetros como el FWHM y entre otros.

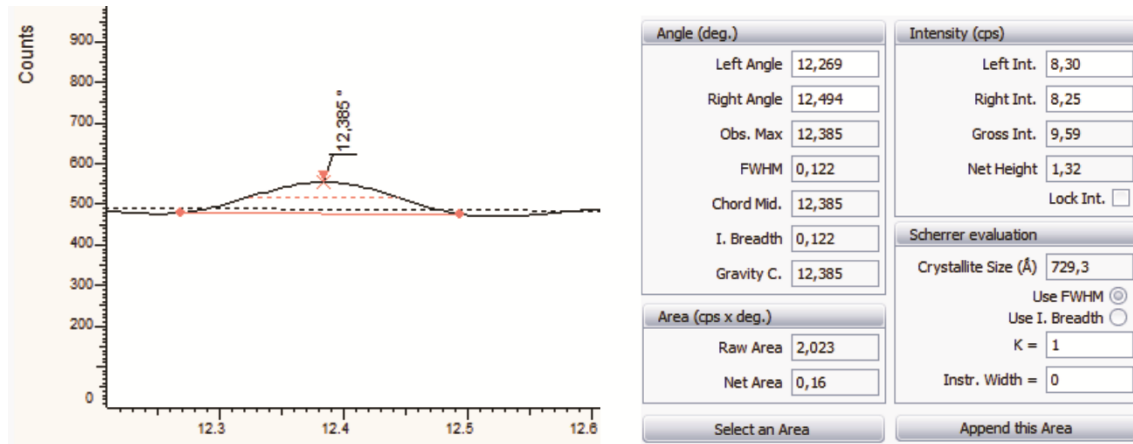


Figura 77. Medida del FWHM del pico 001 de la Caolinita.

Descripción: se observa la interfaz del software diffrac.eva mostrando el pico 001 de la caolinita y mostrando los principales parámetros como el FWHM y entre otros.

## 7. Interpretación de Datos.

### 7.1 Composición mineralógica y su procedencia.

La composición predominante en La Formación La Luna específicamente en el Miembro Galembo, tiene un predominio de carbonatos de calcio (micritas y esparitas) seguido por una composición de sílice (predominantemente por cuarzo microcristalino  $<2 \mu\text{m}$  y muy baja proporción de minerales arcillosos). Como minerales accesorios se encuentran los apatitos, barita y como minerales agregados se encuentran sulfuros y óxidos. A continuación se describe para cada litofacie que mineral es predominante y su procedencia.

Wackestones: está compuesto principalmente por carbonatos de calcio el cual está representado principalmente por cristales de esparitas y microesparitas, por fragmentos fósiles recrystalizados,

y cristales de micritas que se encuentran en la matriz. Se observa también se encuentran pseudo-esparitas. El origen principal de las micritas y esparitas es aloquímico, es decir, a partir de la desintegración de la biota bentónica. Las pseudo-esparitas se caracterizan por presentan texturas de recristalización y de disolución debido a los eventos diagenéticos. El cuarzo microcristalino que se encuentra en la se caracteriza por cristales subredondeados con unos diámetros de 0.7 a 2  $\mu\text{m}$  y este mineral tiene como origen biogénico, es decir, surge a partir de la desintegración de fragmentos de diatomeas, cocolitos y radiolarios ricos en Silice. Los cristales de apatitos autigénicos se pudo haber generado a partir de la descomposición de fragmentos óseos de peces. A Los minerales arcillosos presentes se les considera detritos, cual es el resultado de la erosión de un macizo rocoso cercano expuesto. Los sulfuros encontrados se asocia principalmente a las piritas framboidales y estas se forman en ambientes sedimentarias con unas condiciones reductoras junto a la materia orgánica, también las piritas framboidales también se pueden explicar cómo bacterias de azufre petrificadas, el cual se desencadenan por procesos controlado por bacterias o como cristalización inorgánica a partir de sulfuros de hierro (Flügel 2010). La presencia de barita se forma a por la mezcla de fluidos ricos en bario y el metano y se precipita al reaccionar con agua marina atrapada en los poros ricos por el ion  $\text{SO}_4$ . Canet C. et al. (2013), Lash G. (2015)

Micrita Lodosa: en esta litofacie predomina el carbonato de calcio (micritas y cristales de micro-esparitas, esparitas y fragmentos fósiles recristalizados) el origen de estos cristales se debe principalmente aloquímico, es decir, provienen principalmente por la desintegración de la biota bentónica, ocasionalmente se encuentran texturas de disolución en algunos cristales de esparitas. Aunque la proporción de sílice en esta litofacie no es muy alta y se puede observar al menos dos fases de sílice la primera es representada principalmente por el cuarzo microcristalino que tiende a ser redondeado cuyo diámetro es  $< 2 \mu\text{m}$  y se encuentra distribuida en toda la matriz y la

segunda se encuentra el cuarzo subangular y angular con un diámetro promedio de 12 a 19  $\mu\text{m}$ . La primera fase es aquella que se encuentra distribuida en toda la matriz y siempre suele estar acompañado por minerales arcillosos (con morfología similares a la esmectita) y puede que haya generado a partir de la sílice libre en el medio ya sea de origen biogénico o de la reacción entre esmectita/illita. La segunda es aquella que se encuentra esporádicamente y se asume por sus características morfológicas que esta fase proviene fuera de cuenca. Los apatitos se pueden haber generado por la descomposición de los restos de óseos de peces, es decir, de origen biogénico. Los sulfuros se encuentran representados por las piritas framboidales, el cual estas se formaron en condiciones reductoras y junto a la materia orgánica. Los óxidos presentes en esta litofacie se deben a la meteorización y/o descomposición de los sulfuros.

**Arcillolita Calcárea:** El contenido predominante de esta litofacie es el sílice, está representada principalmente por los minerales arcillosos como la illita que generalmente se encuentra adjunto al cuarzo microcristalino el cual actúan tanto como matriz y cemento en esta litofacie. Los minerales arcillosos (illitas) hacen recubrimientos de poros que se encuentran predominante en la matriz. Las illitas son vistas como aporte de sedimentos y no como diagenéticas, debido a que el índice de Kübler indica que este mineral se encuentra en un bajo grado de metamorfismo, el cual no es coherente en el contexto geológico de esta formación litológica, por lo tanto, se puede inferir que estas illitas pueden provenir de un macizo cercano. Mientras que el cuarzo microcristalino observado es autigénico, el cual se pudo generar a partir de la sílice libre de origen biogénico. Luego es seguida por los carbonatos de calcio tienen un origen aloquímico, representado mayoritariamente por las micritas y en menor proporción las micro-esparitas. Las micritas surgen principalmente por la desintegración de los organismos bentónicos y también se observan micro-esparitas y esparitas autigénica que se formaron a partir de recristalizaciones de

las micritas de la matriz. Se observan también texturas de disolución de algunos cristales de esparitas. Los apatitos suelen encontrarse en la matriz de la muestra junto a las micritas, estos se generaron a partir de los restos óseos de los peces y de organismos. Los sulfuros observados tales como la pirita framboidal y la esfalerita, estas generaron en condiciones reductoras y suelen estar sobre la matriz y acompañados por la materia orgánica y esta última ocasionalmente se encuentra rellenando los poros.

Esparita: están compuestas predominantemente por carbonatos de calcio representado por esparitas, fósiles recristalizados, microesparitas y micritas y en menor proporción se encuentra el cuarzo microcristalino que se encuentra como cemento y en la matriz. Estos carbonatos tienen como origen aloquímicos, proveniente de la desintegración de fragmentos de conchillas de invertebrados y como también de origen diagenético por la recristalización de algunos cristales de micro-esparita. El origen del cuarzo microcristalino se interpreta como biogénico, es decir, surge a partir de la desintegración de fragmentos de diatomeas, cocolitos y radiolarios ricos en sílice. Los minerales accesorios como los sulfuros de piritas framboidales y esfalerita se generan en condiciones reductoras y en ambientes ricos en materia orgánica. El contenido de baritina puede ser originado a partir de la presencia de metano de origen biogénico. También se encuentra apatito pero como mineral accesorio.

#### Biomicroesparita Packestone:

Esta litofacie está compuesta principalmente tanto por Sílice y Carbonatos de calcio, con proporciones muy similares en toda la muestra. Por parte de los minerales ricos en sílice se encuentra principalmente en la matriz de la muestra. Está representado por los minerales tales como el cuarzo anhedrales subangulares y otros por cuarzo microcristalino subredondeados, que suelen estar acompañados por minerales arcillosos con morfologías de “cintas alargadas”, el cual

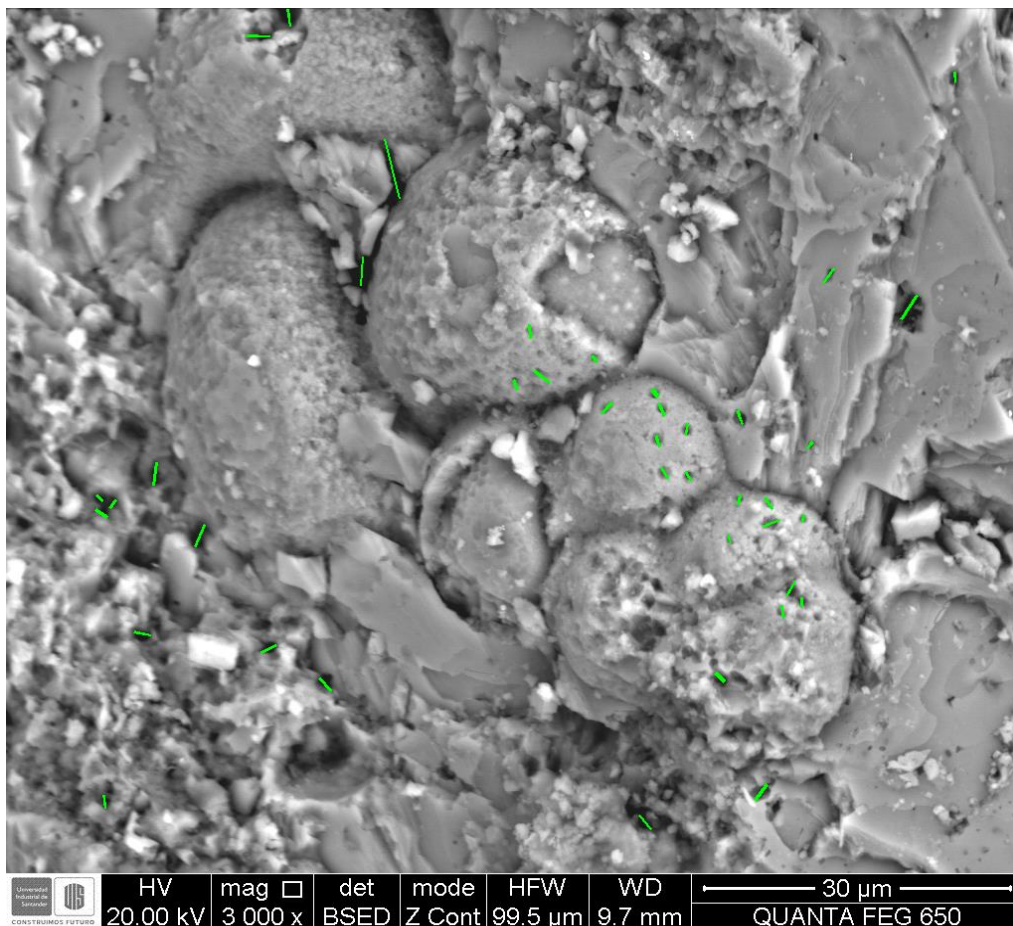
presentan una microfábrica borde-cara, también se encuentran micas del tipo moscovita como mineral accesorio. El origen de estos minerales a base de sílice puede tener dos orígenes, uno podría ser a partir de un aporte de sedimentos a partir de la erosión de un macizo rocoso y aporte de sedimentos extracuenal, la microfábrica de las arcillas puede indicar un aumento de la dinámica del medio y el otro origen de sílice puede ser a partir de la precipitación de sílice biogénico a partir de la descomposición de fragmentos fósiles. Por parte del carbonato de calcio está representado principalmente por los cristales de micritas y fragmentos fósiles recristalizados, el origen de este carbonato es aloquímico, es decir, proviene de la desfragmentación y desintegración de los fragmentos fósiles. Los cristales de apatitos encontrados son autigénicos y estos puede que se generaran a partir de los restos óseos de los peces y de organismos. La barita en esta litofacie se suele encontrar bordeando fragmentos fósiles o en si efecto recubriéndolos, esta barita se forma a por la mezcla de fluidos ricos en bario y el metano y se precipita al reaccionar con agua marina atrapada en los poros ricos por el ion  $SO_4$ . Canet C. et al. (2013), Lash G. (2015)

## **7.2 Porosidad.**

La porosidad observada varía en proporción en cada litofacie estudiada, el cual se detallará cualitativamente en función del tipo de litofacie. En las litofacies que presentan más microporosidades son las micritas lodosas, seguido por las arcillolitas y siendo la esparita la litofacie que evidencia menos microporos.

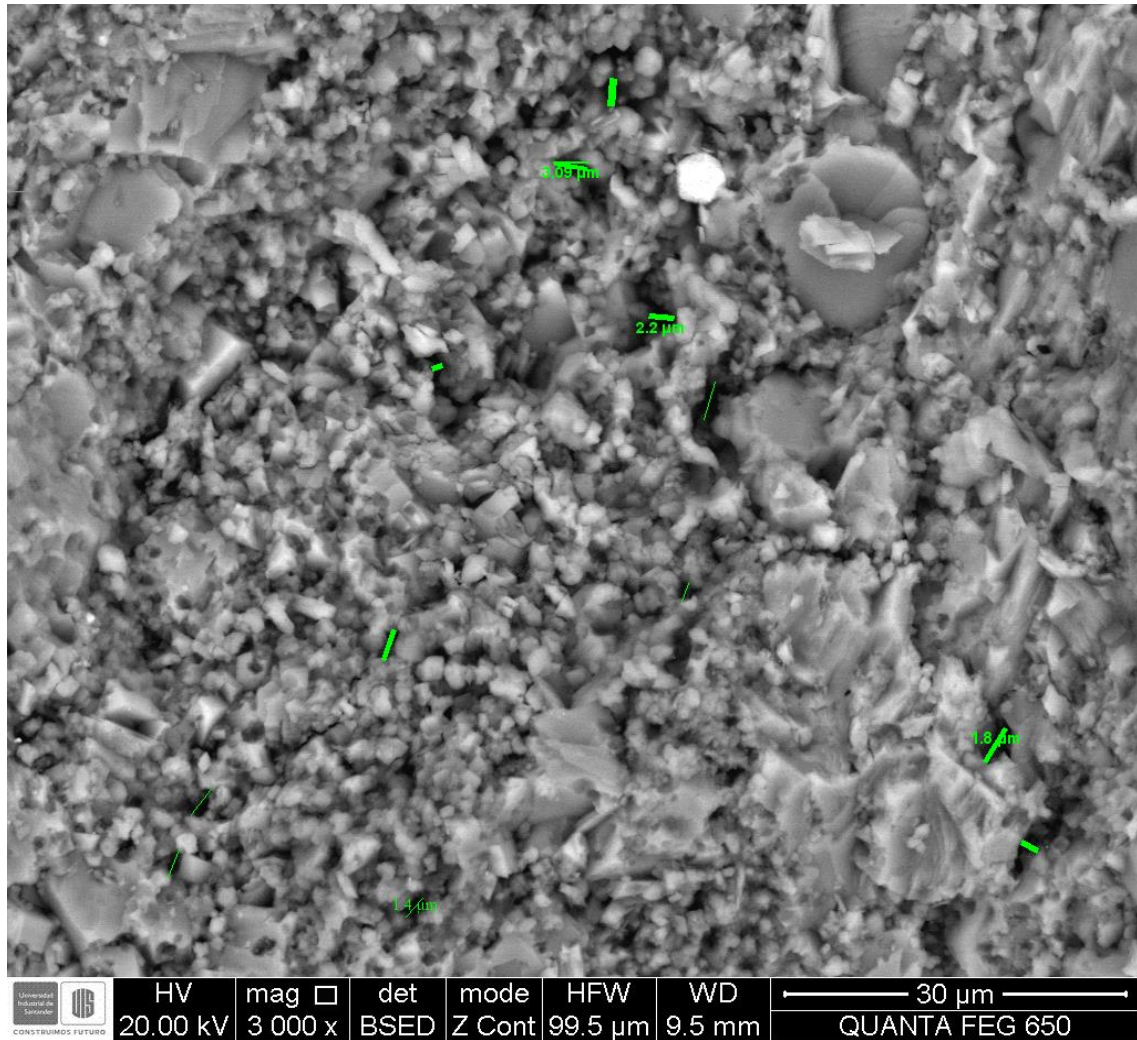
Wackestone: la porosidad se puede encontrar en la matriz el cual esta no es tan predominante en la muestra. Los microporos son generados por los contactos intercristalinos entre los cristales de micrita, y los contactos intercristalinos tiende a ser puntuales y coalescentes, estos poros

generalmente están rellenos por materia orgánica solidificada y cementados por cuarzo microcristalino y recubierto ocasionalmente por minerales arcillosos. El rango de diámetro de estos microporos es 1 hasta 3.6  $\mu\text{m}$ . La otra porosidad secundaria es generada por las texturas de disolución en fragmentos fósiles y en algunos cristales de esparitas. El rango de diámetro de estos microporos es de  $-0.8$  hasta 6  $\mu\text{m}$  y el promedio de estos 1.64  $\mu\text{m}$ . En las Figuras. 78 y 79 se pueden observar los microporos presentes en esta litofacie, estos microporos están señalados con líneas verdes.



*Figura 78.* Microporosidad secundaria en las wackestones.

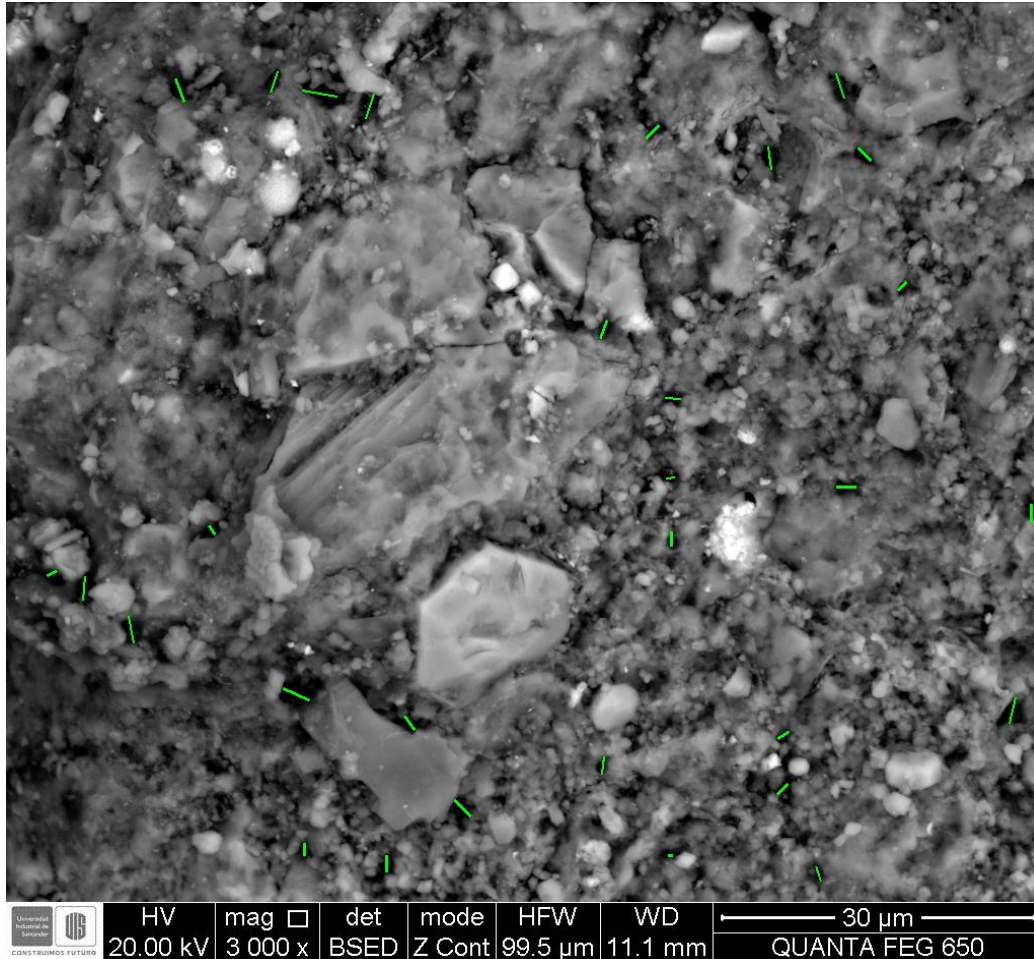
Descripción: se observa las texturas de disolución en el fragmento fósil que genera microporos secundarios. Las líneas verdes señalan la longitud de estos microporos.



*Figura 79.* Microporosidad en la matriz de las wackestones.

Descripción: Se alcanza a observar los pocos microporos distribuidos en la matriz de la muestra, señalados con las líneas verdes que representan la longitud de estos.

Micrita Lodosa: la microporosidad en esta litofacies se encuentra generalmente en la matriz, la porosidad se forma a partir de los contactos entre los cristales de micritas, cuarzo microcristalino, estos dichos contactos tienden a ser puntuales hasta coalescentes. Los microporos tienden a estar rellenos por materia orgánica y algunas veces recubiertos por minerales arcillosos. Los microporos tienen un rango de diámetro de 0.482 hasta 5.156  $\mu\text{m}$  con un promedio de 2  $\mu\text{m}$ . (ver Figura. 80).

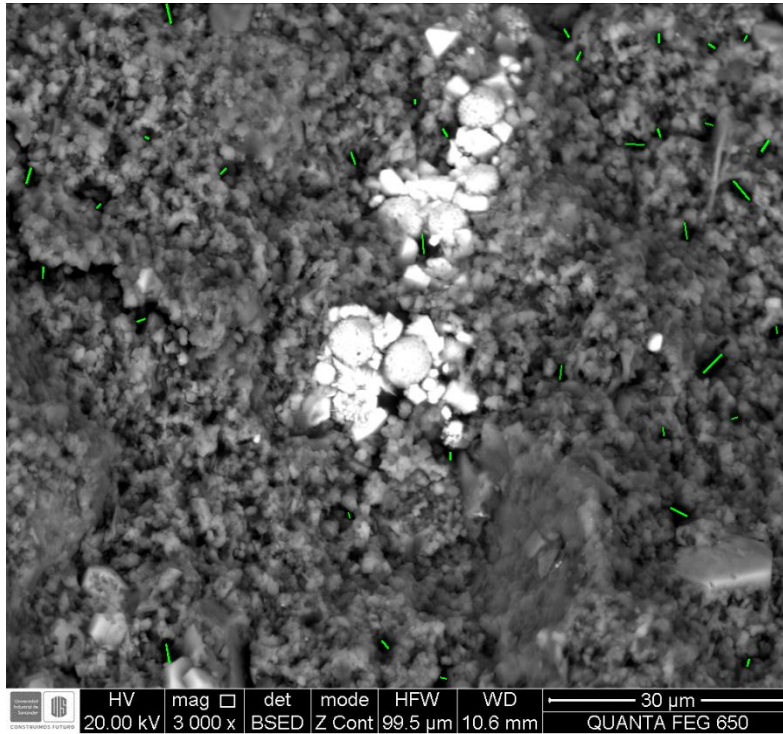


*Figura 80.* Microporosidad en la matriz de las micritas lodosas.

Descripción: Se observa que la porosidad en la litofacie de micritas lodosas se encuentra en la matriz de la muestra, estos microporos se generan principalmente por los contactos intercristalinos entre los cristales de micritas y los cuarzós microcristalinos.

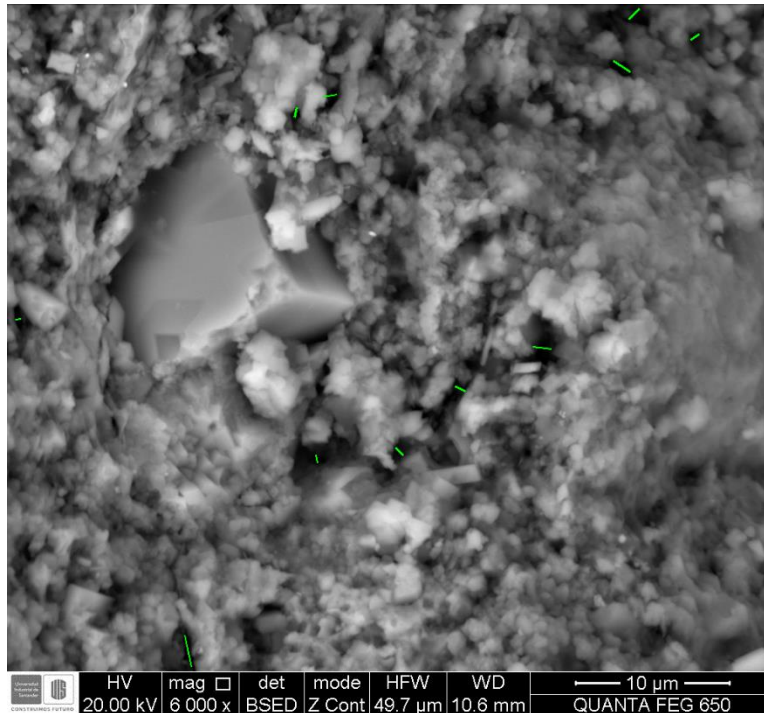
Arcillolita Calcárea: esta litofacie es matriz-soportada, y la mayoría de micro-poros se encuentran dentro de la matriz, estos microporos suelen ser intercristalinos, y se genera por los contactos puntuales y algunas veces coalescentes entre los cristales de micritas y cuarzós microcristalino. Se observa también que los microporos suele ser rellenados por materia orgánica solidificada y muchas veces cubiertos por los minerales arcillosos como la illita. Estas

microporosidades tienen un rango de diámetro de 0.4 hasta 3.6  $\mu\text{m}$ , con un promedio de 1.25  $\mu\text{m}$  (Ver Figuras. 81 y 82)



*Figura 81.* Microporosidad en la matriz de la arcillolita calcárea.

Descripción: se observa las microporosidades en la matriz de las arcillolitas calcáreas, estos microporos se generaron por los contactos intercristalinos entre las micritas y cuarzos microcristalinos

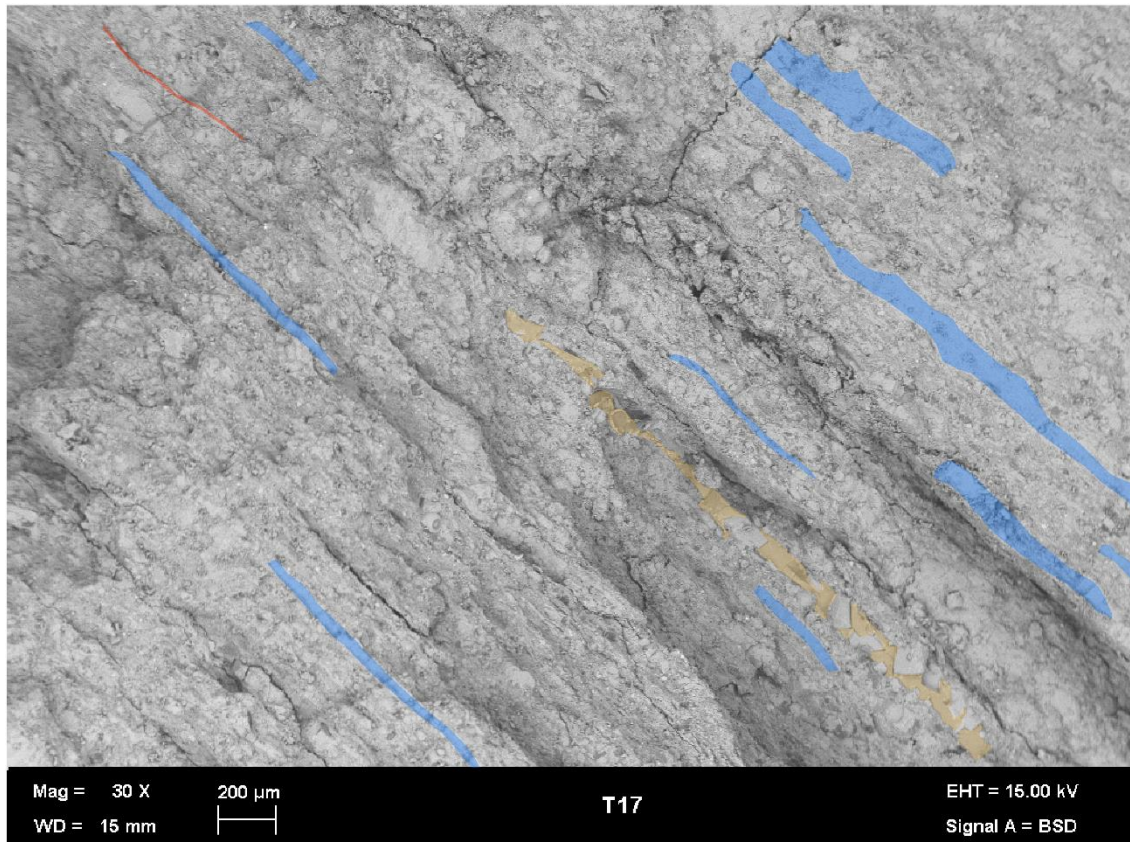


*Figura 82.* Microporosidad en la matriz de arcillolita calcárea.

Descripción: las microporosidades observadas se generan principalmente por los contactos intercrystalinos entre los cristales de micritas y cuarzo microcristalino.

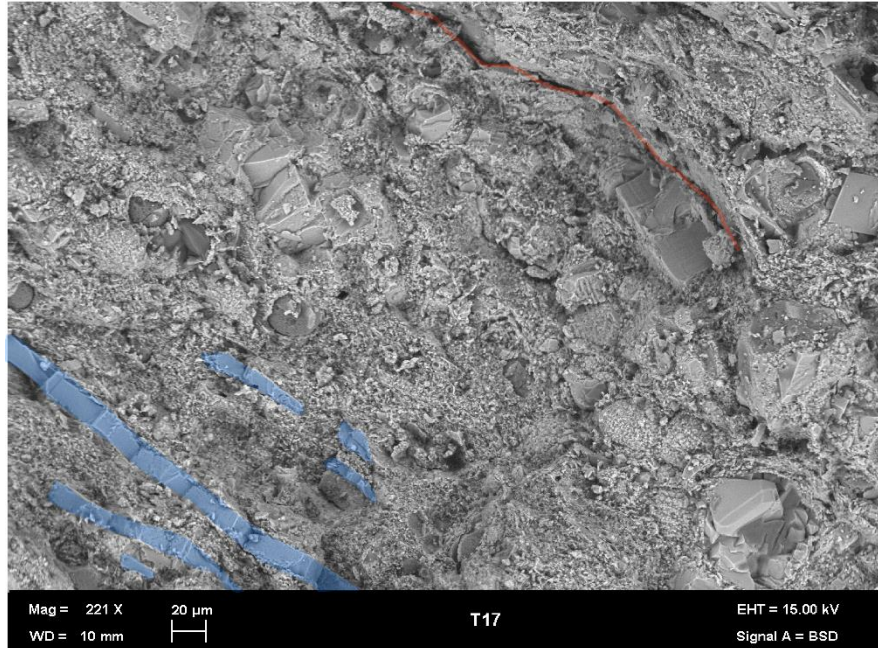
En Figura 83 se observa a rasgos generales fracturas rellenadas con calcita (sombreado de color azul claro) y planos de debilidad (línea roja) y de color naranja claro se puede observar fracturas rellenadas de materia orgánica solidificada. En la Figura 84 se observa un acercamiento a las fracturas rellenadas de calcita y un plano de debilidad que va casi paralela a la vena calcita y en la figura 85 se observa en detalle una parte de la vena rellenada por materia orgánica solidificada (sombreada de color naranja claro), en esta litofacie también se observa que esta materia orgánica solidificada toma la forma del molde negativo de los fragmentos fósiles, en base a estas observaciones podemos afirmar que las fracturas rellenas de materia orgánica y de calcita son post-diagenéticas y que la materia orgánica aprovecha los poros interconectados que se presentan en

los fragmentos fósiles, en las fracturas de la roca y en los planos de debilidad que presenta para infiltrarse.



*Figura 83.* Rasgos generales de las fracturas rellenas por calcita y materia orgánica en arcillolitas calcáreas.

Descripción: se observa a rasgos generales las fracturas y planos de debilidad (línea roja) rellenos por materia orgánica (Color naranja claro) y por calcita (Color Azul Claro).



*Figura 84.* Acercamiento a las venas de calcita en las arcillolitas calcáreas

Descripción: se observa las venas de calcita (Azul Claro) que tienden a ser paralelas y también se observa un plano de debilidad (línea roja) que tiende a tener el mismo sentido que las venas de calcita.

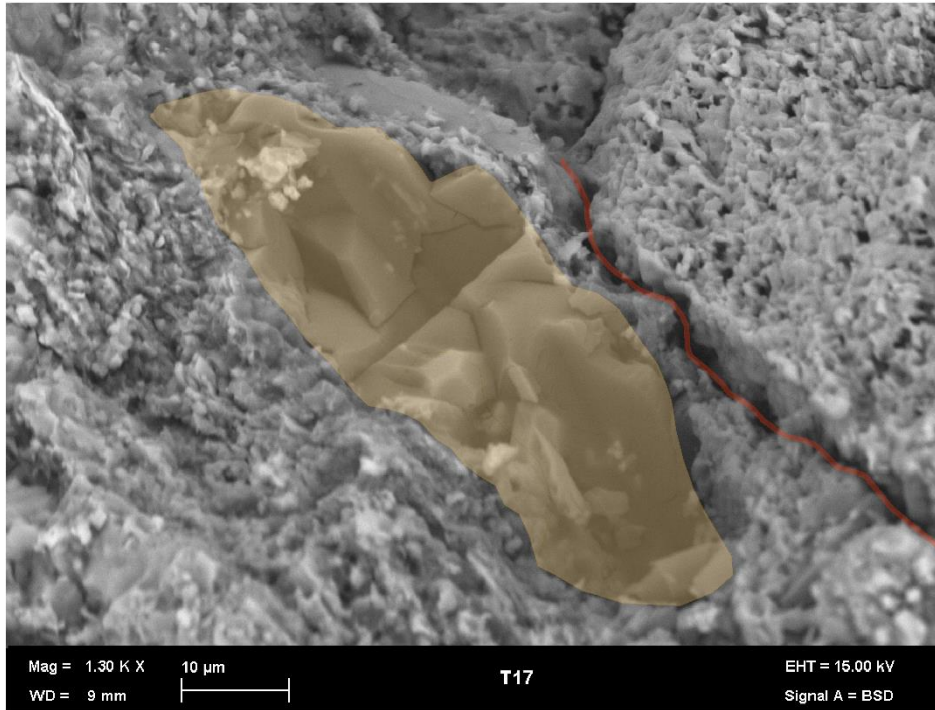
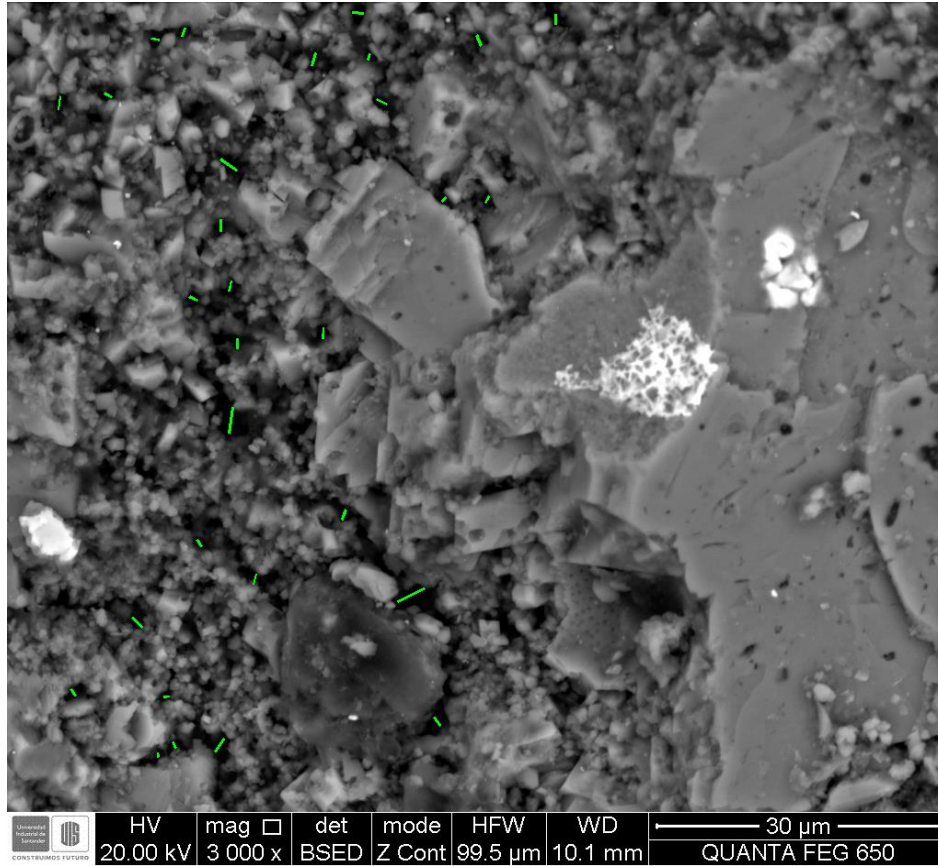


Figura 85. Acercamiento a las venas rellenas por materia orgánica solidificada en arcillolitas calcáreas.

Descripción: se observar un acercamiento a la vena rellena por la materia orgánica solidificada (naranja Claro) y junto se observa un plano de debilidad (línea Color roja) que va en la misma dirección que la vena ya mencionada

Esparitas: En esta litofacie está dominada principalmente por cristales de microesparitas el cual presentan unos contactos fusionados e indistinguibles con respecto a los demás cristales, debido a estos tipos de contactos la porosidad es muy poca, con respecto a la matriz de la muestra, el cual es minoritaria en la muestra, se alcanza a observar en esta matriz unos microporos que se generaron por los contactos intercristalinos puntales hasta coalescentes entre los cristales de micritas. Estos microporos generalmente se encuentran rellenos por la materia orgánica solidificada y a veces sementados por cuarzos microcristalinos. El rango de diámetro estos microporos es 0.5 hasta 3  $\mu\text{m}$  con un promedio de 1.25  $\mu\text{m}$ . (ver Figura. 86)



*Figura 86.* Microporosidades en la matriz de la Esparita.

Descripción: en la matriz de esta litofacie está compuesta principalmente por cristales de micritas y cuarzo microcristalino, los contactos intercristalinos entre estos dos minerales genera los microporos señalados con las líneas verdes que se observan en la micro-fotografía. Los contactos entre estos minerales son puntuales hasta coalescentes.

### 7.3 Índice de Kübler

A partir de los valores de índices de Kübler obtenidos se puede asegurar que las illitas de las arcillitas calcáreas analizadas por medio del DRX, no son autigénicas sino son vistas como detritos aportados por la erosión de algún macizo rocoso cercano. En la Tabla 87, realizada por

Bonilla. G, (2014) se puede observar que los valores obtenidos de índice de Kübler (0.119 y 0.122) pertenecen a la epizona y anquizona tardía respectivamente.

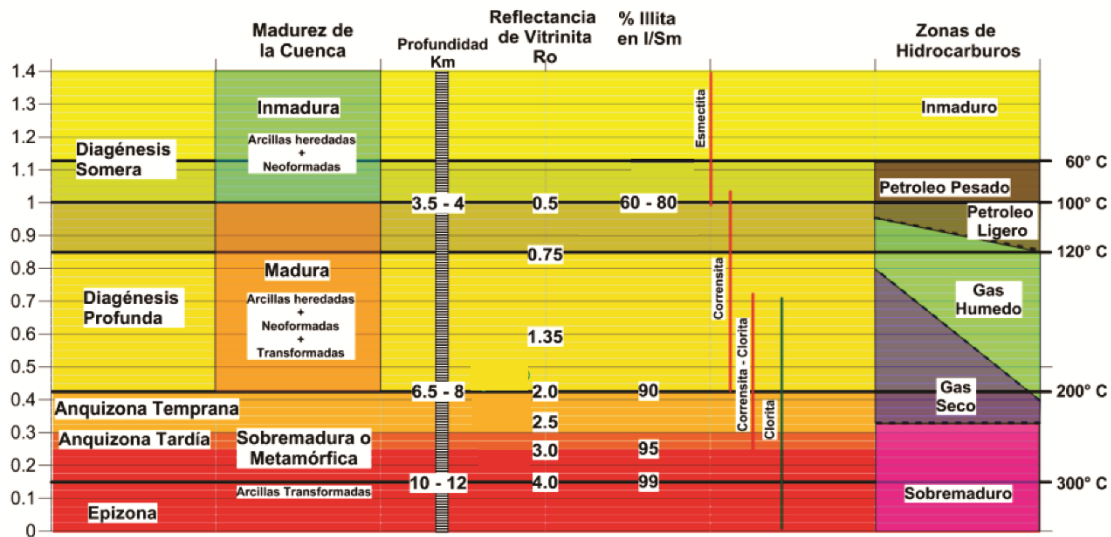


Figura 87. Tabla de Índice de Kübler

Descripción: Tabla realizada por Bonilla .G, 2014, de los IK y de los porcentajes de illita en I/S.

## 8. Discusión.

En la revisión del estado del arte, partiendo de diversas investigaciones realizadas a la Formación La Luna, desde nivel petrográfico hasta estudios que incluyen técnicas más avanzadas como la microscopía de barrido electrónica (SEM) y ensayos por difracción de rayos X (DRX) entre otras. En el desarrollo del presente trabajo se ha logrado determinar con precisión la composición mineralógica de dicha formación litológica y también se ha podido demostrar las fuentes de sedimentos que suplieron a la Formación La Luna.

Esta investigación permite refinar y verificar con certeza los resultados de otras investigaciones previas ofreciendo también una propuesta donde se da espacio a analizar otras fuentes de sedimentación.

Este trabajo retoma lo propuesto en la tesis de maestría de Casadiego (2014) permitiendo agregar más detalles y profundizar acerca de la fábrica de las litofacies caracterizadas por él, tales como la litofacie wackestone, micritas lodosas, arcillolitas calcárea, esparitas, biomicroesparita packestone

Para el caso de la Wackestone, la distribución en la matriz en este trabajo se determinó mediante SEM, y se encontró en una proporción un poco mayor a la que se describe en la literatura, este hallazgo y sus implicaciones permiten analizar la matriz como un sistema con microporos medidos de un rango 0.8 hasta 6  $\mu\text{m}$  con un promedio de 1.64  $\mu\text{m}$  gran parte de estos poros se desestimaron por estar rellenos de materia orgánica solidificada.

El origen del cuarzo microcristalino mencionado por Casadiego (2014) analizando los resultados de este trabajo y dada las condiciones en la que se forma esta litofacie wackestone permite proponer que este mineral puede haberse generado por la precipitación de sílice biogénico proveniente de fragmentos de organismos ricos en sílice.

Con respecto a la litofacie arcillolitas calcáreas o Facies B mencionadas en la tesis de Casadiego (2014) este trabajo permite concluir y ampliar sobre el origen de los minerales arcillosos que no todos son autigénicos, como por ejemplo la illita, de igual forma permite considerar las illitas como detritos que posiblemente fueron erosionadas de un macizo rocoso cercano, esto basado en el índice de Kübler obtenido de las muestras analizadas, se infiere que este mineral arcilloso ha sufrido un metamorfismo de bajo grado, bajo esta premisa es coherente afirmar que esta litofacie se formó bajo corrientes submarinas como lo plantea Casadiego (2014). De esta

investigación proporciona más información y profundiza acerca de la composición mineralógica, fábrica y texturas de las litofacies tales como Biomicrosparita Packestone y Biomicrita lodosa.

En la litofacie de arcillolitas calcáreas, se observó por medio de la microscopía electrónica de barrido (SEM), la distribución y las longitudes de microporos que se encontraron en su mayoría entre los contactos intercristalinos de los minerales como micritas y cuarzo microcristalino principalmente, coincidiendo con los resultados reportados por Ríos et al., (2016), De los resultados de este trabajo se resalta que muchos de estos poros se encuentran cubiertos y rellenados por minerales arcillosos y materia orgánica solidificada. Se observa también que esta materia orgánica toma la forma del molde negativo de los fragmentos de foraminíferos recristalizados, para que esto suceda se requiere que los poros estuvieran alguna vez interconectados como lo afirma Bernard, et al., (2013). adicionalmente se observaron fracturas y planos debilidad que tienden a ser paralelas entre sí, correspondientes a eventos post-diagenéticos, los cuales fueron posteriormente rellenados por calcita y por materia orgánica, estos pueden considerarse como micro-canales de fluidos y representa una mejora la permeabilidad de la roca. (Slatt and O'Brien, 2011). A partir de las anteriores observaciones se puede intuir que los “moldes negativos” que deja la materia orgánica solidificada brindan pistas acerca como es la arquitectura de los poros interconectados en las litofacies presentes en dicha Formación.

Este trabajo permite establecer en detalle y de manera precisa la composición mineralógica de cada litofacie con el fin de aportar insumos para la caracterización geomecánica de la roca, al disminuir la incertidumbre de la composición mineralógica se aumenta la precisión al determinar si la roca es frágil o dúctil y en qué magnitud, esta información resulta crítica y muy útil en operaciones de fracturamiento de unidades litológicas como es el caso de los reservorios de

hidrocarburos no convencionales los cuales requieren inducir fracturas hidráulicas para su explotación.

La caracterización mineralógica se logra haciendo uso de múltiples técnicas y mejorando constantemente las mismas. La petrografía, la microscopía electrónica de barrido (SEM), la espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), la difracción de rayos X (DRX), la catodoluminiscencia de cátodos fríos a base de microscopio óptico (CL) entre otros, son aplicadas para cualificar y semi-cuantificar las fases minerales con el fin de aportar y documentar el comportamiento frágil de las lodolitas y otras litofacies. Milliken, et al., (2016) aplica estas técnicas mencionadas en la Eagle Ford Formation con el fin de determinar y discriminar las fases minerales de la roca. También logra diferenciar el tipo de cuarzo según su origen (autigénico y/o detrítico), y en el caso del cuarzo autigénico, discriminar la fuente de Sílice y determinar la transición del ópalo –A hasta ópalo-CT ya que juega un rol importante en el comportamiento frágil la roca.

## 9. Conclusiones.

A partir de la microscopía de barrido (SEM) y Espectrometría de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS) se pudo determinar los componentes minerales predominantes en las litofacies En la Formación La Luna Miembro Galembo, para la litofacie **wackestone** predomina el carbonato de calcio (representado por cristales de esparita, fósiles recristalizados), se identifica también la composición mineral de la matriz representada por micritas seguida por cuarzo microcristalino, minerales arcillosos y apatitos. Se observa minerales accesorios sulfuros (piritas framboidales) y

sulfatos (barita). La litofacie **esparita** lo compone mayoritaria carbonato de calcio (Cristales de esparitas con contactos fusionados entre si casi indistinguibles), la matriz está compuesta por cuarzo microcristalino y como minerales accesorios están las esfaleritas, piritas, barita y apatitos. La litofacie **arcillolita calcárea** tiene un predominio de cuarzo microcristalino e illita, en menor proporción se observa cristales de micritas, y como minerales accesorios se encuentran las piritas framboidales, algunos óxidos (resultado de alteración de sulfuros), apatitos y fragmentos fósiles esta litofacie es matriz soportada. La litofacie **micritas lodosas** tienen un predominio de carbonatos de calcio (micritas y microesparitas), la matriz está por micritas, cuarzo microcristalino y minerales arcillosos. Se observaron cristales euhedrales de esparitas, como también minerales accesorios tales como piritas y óxido. La litofacie **Biomicroesparita Packestone** está compuesta principalmente carbonato de calcio representado por los fragmentos fósiles recristalizados, micritas y microesparitas, la matriz de esta litofacie está compuesta por cuarzo microcristalino, minerales arcillosos y micritas, como minerales accesorios están los apatitos, barita y micas tipo moscovita.

Se determinó la fracción mineral  $< 2\mu\text{m}$  por medio de la difracción de rayos x (DRX), por medio de esta técnica se pudo determinar los minerales arcillosos que pertenecen a la litofacie de arcillolita calcárea, que son illita y caolinita, también se encontraron fases minerales de cuarzo y calcita. Una vez identificado la illita tras calcular el índice de Kübler se determinó que estas illitas no son autigénicas sino detritos y se infiere que su fuente de sedimentos es un macizo rocoso cercano.

Se propone que el origen de los minerales carbonatados en las litofacies analizadas, se debe a la desintegración de la biota, es decir, de la desintegración de fragmentos de conchillas de

microorganismos. Se observa también que algunas micro-esparitas se originaron por la recristalización y disolución causada por los eventos diagenéticos.

Se plantea como conclusión de este trabajo que la fuente de la sílice del cuarzo microcristalino y minerales arcillosos proviene de dos fuentes principales, la primera los sedimentos aportados (illitas) por la erosión de macizos rocosos, aporte de material terrígeno y la segunda fuente es la precipitación de sílice biogénico, el cual es aportado por la desintegración de fragmentos de conchillas ricas en sílice.

Se propone a partir de las evidencias encontradas el aporte del fósforo proviene de la desintegración de los fragmentos óseos de peces fragmentos esqueléticos por lo tanto el origen de los apatitos es biogénico. La presencia de barita se forma a por la mezcla de fluidos ricos en bario y el metano y se precipita al reaccionar con agua marina atrapada en los poros ricos por el ion. Los sulfuros se generan en condiciones reductoras y en ambientes ricos en materia orgánica.

La microporosidad observada se encuentra principalmente en la matriz de litofacies, el cual corresponde a los contactos intergranulares entre las micritas y el cuarzo microcristalino. También se observa la microporosidades por texturas de disolución de los fósiles recristalizados. Y otra forma de microporosidades se debe a las fracturas y planos de debilidad que se encuentran rellenos por calcita.

## **10. Recomendaciones.**

Con el fin de avanzar en esta línea de investigación se recomienda aplicar técnicas de catodoluminiscencia de cátodos fríos (CL) para discriminar los cuarzos microcristalinos autigénicos con los detritos.

caracterizar con mayor detalle la arquitectura de los poros se recomienda realizar limpieza profunda la de materia orgánica solidificada.

### Referencias Bibliográficas

- A°KE Kvick. (1999) Materials Science Applications of X-Ray Diffraction. *Elsevier Ltd.* 2. 1248–1257
- Ballesteros, C. & Parra, J. (2012) *Estudio Estratigráfico Secuencial para la Formación La Luna en el Costado Oriental de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena: Una visión Exploratoria de Hidrocarburos No Convencionales*. (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas,. Bucaramanga, Colombia.
- Bernal, L., A. (2009) Caracterización Estratigráfica y Petrográfica de la Formación La Luna en el Sector de El Tablazo, Valle Medio del Magdalena.
- Bernard, S., Wirth, R., et. al. (2013). FIBSEM and TEM investigations of an organic-rich shale maturation series from the lower Toarcian Posidonia Shale, Germany: Nanoscale pore system and fluid-rock interactions. In: Camp, W., Diaz, E., Wawak, B. (Eds.), *Electron Microscopy of Shale Hydrocarbon Reservoirs*. AAPG Memoir **102**: 53-66. Bob Hafner. (2015) *Energy Dispersive Spectroscopy on the SEM: A Primer*.
- Bonilla, G, Sarmiento, G & Gaviria, S. (2011), Proveniencia y Transformación Diagenéticas de Minerales Arcillosos del Maastrichtiano - Paleoceno al Norte de Bogotá, Cordillera Oriental de Colombia. *Geología Colombiana, Edición Especial* 36 (1): 179-196.
- C. E. Macellari. (1988) Cretaceous Paleogeography and Depositional Cycles Of Western South America, *Journal of South American Earth Sciences* 1 (4): 373-418.
- Casadiegos, E. (2014) Sedimentología del Miembro Pujamana, Sección Aguablanca y sus implicaciones como reservorio. (Tesis de Maestría). Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Bucaramanga, Colombia.
- Cornelis Klein, Cornelius S. Hurlbut, (1996). *Manual de Mineralogía*, España, Editorial Reverté, S.A.

- Dos Santos, D., Soto, G., Zapata, E., & Padrón, V.. (2003), Caracterización Diagenéticas de La Formación La Luna, en La Sección, de La Quebrada Chiriría, Estado Táchira, Venezuela. *Geoceta* 33: 139-142, ISSN: 0213683X.
- Erlich, R.N., Macsotay, O. I., Nederbragt, A.J., Antonieta Lorente, M. (2000)., Birth And Death Of The Late Cretaceous "La Luna Sea", And Origin Of The Tres Esquinas Phosphorites, *Journal of South American Earth Sciences* 13: 21-45.
- Flügel, E. (2010) *Microfacies of Carbonate Rocks*, Springer. p. 73 (Microfacies Data: Matrix and Grains).
- Folk, R. L., (1974) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin Texas, , 184 pp.
- Galvis-Portilla, et al.. (2014) Regional Sequence Stratigraphy of The Upper Cretaceous La Luna Formation In The Magdalena Valley Basin, Colombia. *Unconventional Resources Technology Conference*.
- Gary G. (2014), Authigenic barite nodules and carbonate concretions in the Upper Devonian shale succession of western New York e A record of variable methane flux during burial.
- Gira, A.V., Caputo, G. & M.C. Ferro. (2017) Application of Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS).
- Hedberg, H., J. (1931) Cretaceous Limestone As Petroleum Source Rock In Northwestern Venezuela: *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. March. 15, (3).
- Herrera, S. (2015). *Caracterización Mineralógica De La Formación La Luna, En El Sinclinal Del Nuevo Mundo Mediante Difracción De Rayos X (DRX)* Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Ketterer, M. E. (2010). *Geology and Mineralogy Applications Of Atomic Spectroscopy*, Northern Arizona University, Arizona, USA. Elsevier Ltd.
- Liborius-Parada, A. & Slatt, R.M.. (2014) Geological Characterization of La Luna Formation as an Unconventional Resource in Lago De Maracaibo Basin, Venezuela. *Unconventional Resources Technology Conference*.

- Mancin, N., Basso, E., Kaminski, M. A. & Dogan A., U. (2014). A standard SEM-EDS methodology to determine the test microstructure of fossil agglutinated foraminifera, *Micropaleontology*, 60, (1).
- Martinez, J., I., & Hernandez, R.. (1992) Evolution And Drowning Of The Late Cretaceous Venezuelan Carbonate Platform, *Journal of South American Earth Sciences*, 5, (2), 197-210.
- Matthieu Deville De Periere , Christophe D., Vennin E., Lambert L., Bourillot R., Caline B., Poli (2011) E. Morphometry of micrite particles in cretaceous microporous limestones of the Middle East: Influence on reservoir properties. En: *Marine and Petroleum Geology* Vol.28 1727-750.
- Meyer, M., C., Austin, P. & Tropper, P. (2013) Quantitative Evaluation Of Mineral Grains Using Automated SEM-EDS Analysis And Its Application Potential In Optically Stimulated Luminescence Dating. *Radiation Measurements* 58, 1-11.
- Milliken, Kitty L; Ergene, Suzan M y Ozka, Aysen (2016).. Quartz types, authigenic and detrital, in the Upper Cretaceous Eagle Ford Formation, South Texas, USA, *Sedimentary Geology* 339 273-268.
- Moore & Reynolds, R (1997), *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*, 2nd ed. xviii. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Morales, L., G. & The Colombian Petroleum Industry. (1954). *General Geology And Oil Occurrences Of Middle Magdalena Valley, Colombia*.
- Notestein, Et al, (1944) Geology of the Barco Concession, Republic Of Colombia, South America. *Bulletin of the Geological Society Of America*. October, 55: 1165-1216.
- Pacheco-Sintura, P., A., Cardona-Molina, A. & Farid B. C.. (2015) Caracterización composicional y de capacidad de almacenamiento en muestras de superficie de las formaciones Conejo y La Luna (Valle medio del Magdalena y Cordillera Oriental): Implicaciones para la evaluación del shale gas cretácico en Colombia, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Abril Vol. 37: 45-53. ISSN 0120-3630.

- Parra, M., Moscardelli, L. & Lorente, M. A. (2003) Late Cretaceous Anoxia and Lateral Microfacies Changes in the Tres Esquinas Member, La Luna Formation, Western Venezuela, *Palaios*. 18, 321–333.
- Pérez, G, Puentes, E.O. & Sierra, C. (2015). Estratigrafía y Petrofacies de la Formación La Luna en el Sinclinal de Nuevo Mundo, Valle Medio del Magdalena, Agosto
- Ramon J. C., L. Dzou A & Giraldo, B. (1997), Geochemical Evaluation of The Middle Magdalena Basin, Colombia.
- Ramon, J.C., & Dzou, L.I. (1999). Petroleum geochemistry of Middle Magdalena Valley, Colombia, *Organic Geochemistry*, January
- Rangel, A., parra, p. & Niño, C. (2000) The La Luna formation: chemostratigraphy and organic facies in the Middle Magdalena Basin. *Organic Geochemistry*, Vol. 31.
- Rey, O., Simo (Toni), J.A. & Lorente, M., A. (2004). Record Of Long- And Short-Term Environmental And Climatic Change During OAE3: La Luna Formation, Late Cretaceous (Santonian–Early Campanian). *Venezuela, Sedimentary Geology*, 170: 85-105.
- Riccardi, A. C. (1987) Cretaceous Paleogeography Of Southern South America, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59: 169-195
- Richards, H. G.. (1968) Cretaceous Section In Barco Area Of Northeastern Colombia, *The American Association Of Petroleum Geologists Bulletin*, December. (52), 12.
- Ríos, C., Castellanos, O & Casadiego, E. Q. (2016) Microstructural characterization of pore types in unconventional gas reservoirs utilizing FEG-SEM: An example from the Galembó Member of the Cretaceous La Luna Formation, Middle Magdalena Valley Basin (Colombia), *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* 40(154):161-175, enero-marzo.
- Royero, J., M., & Clavijo, J. (2001) Mapa Geológico Generalizado Departamento De Santander, Memoria Explicativa.

- VILLAMIL, T. (1999) Campanian–Miocene Tectonostratigraphy, Depocenter Evolution And Basin Development Of Colombia And Western Venezuela. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Abril, Vol. 153: 239-275.
- Welton, J. E. (2003). SEM Petrology Atlas, Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists,
- Zapata, E., Soto, G. & Kertzus, V.. (2006) Modelo de desarrollo y formación de concreciones carbonáticas en los sedimentos lutíticos anóxicos (Coniaciense-Campaniense), de la Formación La Luna en Venezuela Occidental. *Geogaceta*, 39: 11-13. ISSN: 0213683X.
- Zumberge, J., E.. (1984) Source Rocks of the La Luna Formation (Upper Cretaceous) in the Middle Magdalena Valley, Colombia.